ISSN 2522-9052

Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

National Technical University
“Kharkiv Polytechnic Institute”

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Sučasnì ìnformacìjnì sistemi

Том 5, № 3 **Volume 5, No. 3**

Щоквартальний науково-технічний журнал

Заснований у березні 2017 року

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.

Засновник і видавець:
Національний технічний університет
“Харківський політехнічний інститут”

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

Телефон:
+38 (057) 707-61-65

E-mail редколегії:
kuchuk56@ukr.net

Інформаційний сайт:
http://ais.khpi.edu.ua

Quarterly scientific and technical journal

Founded in March 2017

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.

Founder and publisher:
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

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

Phone:
+38 (057) 707-61-65

E-mail of the editorial board:
kuchuk56@ukr.net

Information site:
http://ais.khpi.edu.ua

Затверджений до друку Вченою Радою Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут” (протокол від 24 вересня 2021 року № 9).

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

© Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”

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 Балайі 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:
ПОДОРОЖНЯК 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-Biała, Poland*);
Andriy KOVALENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Pavlo KOSTENKO
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Heorhii KUCHUK
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);
Vasyl LYTVYN
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Lviv, Ukrain*e);
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*).

ЗМІСТ

ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Гороховатський В. О., Стяглик Н. І., Царевська В. В.
Комбінаційний метод прискореного метричного пошуку даних у задачах класифікації зображень 5

Пустовойтов П. Є., Охрименко М. Ю., Воронець В. М., Удалов Д. В.
Метод підвищення швидкості модельного вузла Маркова (eng.) 13

МОДЕЛЮВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Серков О. А., Бреславець В. С., Яковенко І. В., Фоменко А. А.
Збудження магнітоплазмових коливань у напівпровідникових структурах потоками заряджених часток (eng.) 18

МЕТОДИ СИНТЕЗУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Онищенко В. В., Корольова Я. Ю., Носик А. М.
Формування узагальненої семантичної мережі концептів 22

Пащенко Р. Е., Марюшко М. В.
Оцінка швидкості процесу фотосинтезу рослин при нечіткому описі факторів впливу та індикаторів 31

Федорович О. Є., Прончаков Ю. Л., Лещенко Ю. О., Єлізєва А. В.
Використання компонентного методу в логістиці постачання комплектуючих високотехнологічного виробництва 40

Шостак І. В., Кривова С. Г., Зубаньов О. Є.
Інформаційне підтримування процесу проведення переговорів на етапі ініціації проєктів кооперацийного виробництва в літакобудуванні 46

ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Александров Є. Є., Александрова Т. Є., Моргун Я. Ю.
Про стійкість руху автомобіля – паливозаправника з цифровою системою розподілу гальмівних зусиль в режимі екстреного гальмування (eng.) 59

Карпенко А. С., Тарасюк О. М., Горбенко А. В.
Дослідження узгодженості та продуктивності у нереляційних реплікованих базах даних 66

Кошман С. О., Краснобаєв В. А., Нікольський С. Б.
Метод діагностики помилок даних комп'ютерної системи, що функціонує у системі залишкових класів (eng.) 76

Настакалов А. Р.
Оцінка надійності, ефективності і продуктивності топології військово-польової локальної мережі (eng.) ... 81

Струцінський О. В., Карлов В. Д., Ковальчук А. О., Бархударян М. В., Ковальчук В. А.
Аналіз стійкості автосупроводження високоманеврених повітряних об'єктів радіотехнічними слідкуючими системами багатоканальної РЛС 86

TABLE OF CONTENTS

PROBLEMS OF IDENTIFICATION IN INFORMATION SYSTEMS

Volodymyr Gorokhovatskyi, Natalia Stiahlyk, Vytaliia Tsarevska
Combination method of accelerated metric data search in image classification problems (ukr) 5

Pavlo Pustovoitov, Maxim Okhrimenko, Vitalii Voronets, Dmitry Udalov
The speed calculating increasing method of the Markov model network 13

INFORMATION SYSTEMS MODELING

Aleksandr Serkov, Vitaliy Breslavets, Igor Yakovenko, Andrii Fomenko
Excitation of magnetoplasma oscillations in semiconductor structures by fluxes of charged particles 18

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS SYNTHESIS

Valerii Onyshchenko, Yana Korolova, Andrii Nosyk
Formation of a generalized semantic network of concepts (ukr) 22

Ruslan Pashchenko, Maksym Mariushko
Evaluation of the speed of the plant photosynthesis process with a fuzzy description of impact factors and indicators (ukr) 31

Oleg Fedorovich, Yurii Pronchakov, Yuliia Leshchenko, Alina Yelizieva
Using of the component method in logistics of supplies of high-tech production components (ukr) 40

Igor Shostak, Svetlana Kryvova, Alexander Zubanyov
Information support of the negotiation process at the stage of initiation of the cooperative production project in aircraft (ukr) 46

INFORMATION SYSTEMS RESEARCH

Yevgen Aleksandrov, Tetiana Aleksandrova, Yaroslav Morhun
About stability of the movement of the refueling vehicle equiped with digital system of brake forces distribution during the emergency braking 59

Andrii Karpenko, Olga Tarasyuk, Anatoliy Gorbenko
Research consistency and perfomance of NoSQL replicated databases (ukr) 66

Serhii Koshman, Victor Krasnobayev, Serhii Nikolsky
Method for diagnosing data errors of a computer system functioning in the system of residual classes 76

Adil Ramazan Nastakalov
The assess the fault-tolerance, efficiency and performance of military field local network topology 81

Oleh Strutsinsky, Volodymyr Karlov, Andrii Kovalchuk, Mykola Barkhudarian, Viktor Kovalchuk
Analysis of the stability of automatic tracking of supermaneuvering air objects by radiotechnical tracking systems of the multichannel radar (ukr) 86

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ

Подорожняк А. О., Любченко Н. Ю., Квочка М. М., Суарес І.
Застосування інтелектуальних методів мультиспектральної обробки даних у галузі екомоніторингу (eng.) 97

МЕТОДИ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Клімушин П. С., Соляник Т. М., Колісник Т. П., Можаєв О. О.
Потенційне застосування апаратно захищених мікросхем симетричної автентифікації для забезпечення безпеки інтернет речей (eng.) 103

Рубан І. В., Бологова Н. М., Мартовицький В. О., Ярошевич Р. О.
Методологія оцінки ефективності методів вбудови цифрових водяних знаків (eng.) 112

Семенов С. Г., Цао Вейлін, Чжан Ліцян, Бульба С. С.
Метод автоматизованого тестування на проникнення з використанням технології глибокого машинного навчання (eng.) 119

ПРИКЛАДНІ ПРОБЛЕМИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А.
Виконання на мобільних пристроях арифметичних операцій з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу 128

Калінін Є. І., Лебедєва І. А., Лисиця Д. О.
Динамічні ефекти в багатомасових реономних системах при високочастотній пульсації «форм» коливань 137

Козлов В. Є., Козлов Ю. В., Мощенко І. О., Новикова О. О., Оленченко В. Т.
Інформаційна технологія реалізації компетентнісного методу оцінювання професійної діяльності працівника системи освіти (eng.) 142

Макогон О. А., Чалапко В. В., Губа С. М., Стариченко В. В., Москаленко В. І., Красношапка Ю. В.
Використання математичного апарату регресійного аналізу для уніфікації методики розрахунків міжремонтного ресурсу танка Т-64Б (eng.) 151

Алфавітний покажчик 158

INTELLIGENT INFORMATION SYSTEMS

Andrii Podorozhniak, Nataliia Liubchenko, Mykyta Kvochka, Ivan Suarez
Usage of intelligent methods for multispectral data processing in the field of environmental monitoring 97

METHODS OF INFORMATION SYSTEMS PROTECTION

Petro Klimushin, Tetiana Solianyk, Tetiana Kolisnyk, Oleksandr Mozhaev
Potential application of hardware protected symmetric authentication microcircuits to ensure the security of internet of things 103

Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovitskyi, Roman Yaroshevych
Methodology for assessing the effectiveness of methods for embedding digital watermarks 112

Serhii Semenov, Cao Weilin, , Zhang Liqiang, Serhii Bulba
Automated penetration testing method using deep machine learning technology 119

APPLIED PROBLEMS OF INFORMATION SYSTEMS OPERATION

Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin, Oleg Kobylin
Performance of arithmetical operations on mobile gadgets using axioms of classical and nonstandard interval analysis (ukr) 128

Yevhen Kalinin, Irina Lebedeva, Dmytro Lysytsia
Dynamic effects in multi-mass rheonomic systems at high-frequency ripple of "forms" of oscillations (ukr) ... 137

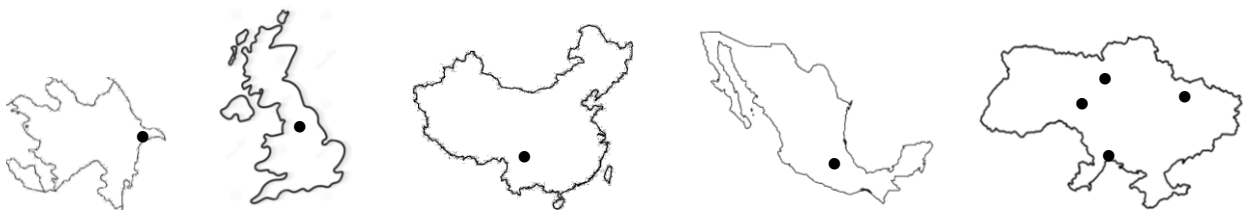
Valentyn Kozlov, Yury Kozlov, Inna Moshchenko, Olena Novykova, Victor Olenchenko
Implementation information technology of competency assessment method of professional activity of the educational system employee 142

Helen Makogon, Volodymyr Chalapko, Serhiy Guba, Vladyslav Starychenko, Viktor Moskalenko, Yuriy Krasnoshapka
Using of the mathematical apparatus regression analysis to unify the calculating methodology for the T-64B tank's overhaul life 151

Alphabetical index 158

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

Географія статей цього номера



Азербайджан *Azerbaijan*
Великобританія *Great Britain*
Китай *China*
Мексика *Mexico*
Україна *Ukraine*

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Александров Є. Є. (Yevgen Aleksandrov)..... 59
Александрова Т. Є. (Tetiana Aleksandrova) 59
Бархударян М. В. (Mykola Barkhudarian) 86
Бологова Н. М. (Nataliia Bolohova) 112
Бреславець В. С. (Vitaliy Breslavets) 18
Бульба С. С. (Serhii Bulba)..... 119
Воронець В. М. (Vitalii Voronets)..... 13
Горбенко А. В. (Anatoliy Gorbenko)..... 66
Гороховатський В. О. (Volodymyr Gorokhovatskyi) .. 5
Губа С. М. (Serhiy Guba)..... 151
Дубницький В. Ю. (Valeriy Dubnitskiy) 128
Єлізєва А. В. (Alina Yelizieva) 40
Зубаньов О. Є. (Alexander Zubanyov) 46
Калінін Є. І. (Yevhen Kalinin) 137
Карлов В. Д. (Volodymyr Karlov) 86
Карпенко А. С. (Andrii Karpenko) 66
Квочка М. М. (Mykyta Kvochka)..... 97
Клімушин П. С. (Petro Klimushin) 103
Кобилін А. М. (Anatolii Kobylin) 128
Кобилін О. А. (Oleg Kobylin) 128
Ковальчук А. О. (Andrii Kovalchuk) 86
Ковальчук В. А. (Viktor Kovalchuk)..... 86
Козлов В. Є. (Valentyn Kozlov)..... 142
Козлов Ю. В. (Yury Kozlov) 142
Колісник Т. П. (Tetiana Kolisnyk) 103
Корольова Я. Ю. (Yana Korolova)..... 22
Кошман С. О. (Serhii Koshman) 76
Краснобаєв В. А. (Victor Krasnobayev)..... 76
Красношапка Ю. В. (Yuriy Krasnoshapka) 151
Кривова С. Г. (Svetlana Kryvova)..... 46
Лебедєва І. А. (Irina Lebedeva) 137
Лещенко Ю. О. (Yuliia Leshchenko)..... 40
Лисиця Д. О. (Dmytro Lysytsia) 137
Любченко Н. Ю. (Nataliia Liubchenko) 97
Макогон О. А. (Helen Makogon) 151
Мартовицький В. О. (Vitalii Martovitskyi)..... 112
Марюшко М. В. (Maksym Mariushko)..... 31
Можаєв О. О. (Oleksandr Mozhaev) 103
Моргун Я. Ю. (Yaroslav Morhun) 59
Москаленко В. І. (Viktor MosKalenko) 151
Мощенко І. О. (Inna Moshchenko) 142
Настакалов А. Р. (Adil Ramazan Nastakalov)..... 81
Нікольський С. Б. (Serhii Nikolsky) 76
Новикова О. О. (Olena Novykova) 142
Носик А. М. (Andrii Nosyk) 22
Оленченко В. Т. (Victor Olenchenko)..... 142
Онищенко В. В. (Valerii Onyshchenko) 22
Охрименко М. Ю. (Maxim Okhrimenko)..... 13
Пащенко Р. Е. (Ruslan Pashchenko) 31
Подорожняк А. О. (Andrii Podorozhniak) 97
Прончаков Ю. Л. (Yurii Pronchakov)..... 40
Пустовойтов П. Є. (Pavlo Pustovoitov)..... 13
Рубан І. В. (Igor Ruban) 112
Семенов С. Г. (Serhii Semenov)..... 119
Серков О. А. (Aleksandr Serkov)..... 18
Соляник Т. М. (Tetiana Solianyk)..... 103
Стариченко В. В. (Vladyslav Starychenko) 151
Струцінський О. В. (Oleh Strutsinsky)..... 86
Стяглик Н. І. (Natalia Stiahlyk) 5
Суарес І. (Ivan Suarez) 97
Тарасюк О. М. (Olga Tarasyuk)..... 66
Удалов Д. В. (Dmitry Udalov)..... 13
Федорович О. Є. (Oleg Fedorovich)..... 40
Фоменко А. А. (Andrii Fomenko) 18
Цао Вейлін (Cao Weiling) 119
Царевська В. В. (Vytaliia Tsarevska) 5
Чалапко В. В. (Volodymyr Chalapko)..... 151
Чжан Ліцян (Zhang Liqiang) 119
Шостак І. В. (Igor Shostak) 46
Яковенко І. В. (Igor Yakovenko) 18
Ярошевич Р. О. (Roman Yaroshevych) 112

Наукове видання

Сучасні інформаційні системи

Advanced Information Systems

Науковий журнал
Том 5, № 3

Відповідальний за випуск *С. Г. Семенов*
Технічні редактори *Д. С. Гребенюк, А. П. Шиман*
Комп`ютерна верстка *Н. Г. Кучук*

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

Підписано до друку 30.09.2021 Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 20,75. Тираж 100 прим. Зам. 930-21

Адреса редакції: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"
Кафедра ОТП, вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків, Україна, тел. 707-61-65

Віддруковано з готових оригінал-макетів у друкарні ФОП Петров В.В.
Єдиний державний реєстр юридичних осіб та фізичних осіб-підприємців.
Запис № 24800000000106167 від 08.01.2009.

61144, м. Харків, вул. Гв. Широнінців, 79в, к. 137, тел. **(057) 778-60-34**
e-mail: **bookfabrik@mail.ua**

Problems of identification in information systems

УДК 004.932.2:004.93’1 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.01

В. О. Гороховатський[1], Н. І. Стяглик[2], В. В. Царевська[2]

[1] Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна
[2] ННІ «Каразінський банківський інститут» ХНУ імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

КОМБІНАЦІЙНИЙ МЕТОД ПРИСКОРЕНОГО МЕТРИЧНОГО ПОШУКУ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Предметом досліджень статті є методи класифікації зображень за множиною дескрипторів ключових точок у системах комп’ютерного зору. Метою є підвищення продуктивності структурних методів класифікації шляхом впровадження індексованих хеш-структур на множині дескрипторів бази еталонних образів та узгодженого ланцюжкового поєднання кількох етапів аналізу даних у процесі класифікації. Застосовувані методи: детектор та дескриптори BRISK, засоби хешування даних, методи пошуку в об’ємних масивах даних, метричний апарат визначення релевантності векторів, програмне моделювання. Отримані результати: розроблено ефективний метод класифікації зображень на основі впровадження швидкісного пошуку із використанням індексованих хеш-структур, що прискорює обчислення в десятки разів; виграш у часі обчислень збільшується при зростанні числа еталонів та дескрипторів у описах; особливості класифікатора полягають у тому, що здійснюється не точний пошук, а із врахуванням допустимого відхилення даних від еталону; експериментально перевірена результативність класифікації, що вказує на працездатність та ефективність запропонованого методу. Практична значущість роботи – побудова моделей класифікації у трансформованому просторі хеш-подання даних, підтвердження працездатності запропонованих модифікацій класифікаторів на прикладах зображень, розроблення прикладних програмних моделей для впровадження запропонованих методів класифікації у системах комп’ютерного зору.

Ключові слова: комп’ютерний зір; структурні методи класифікації зображень; дескриптор BRISK; хешування із врахуванням близькості, хеш-кошик, швидкодія класифікації.

Вступ

Структурні методи класифікації зображень, що впроваджуються у сучасних системах комп’ютерного зору, ґрунтуються на даних про образи візуальних об’єктів у вигляді множини дескрипторів ключових точок (КТ) [1-5]. Дескриптор КТ – це вектор розміром 64…512 бінарних компонентів, що є апроксимацією для фрагмента функції яскравості зображення. Побудова традиційного класифікатора зображень заснована на метричному визначенні ступеня релевантності виду множина-множина між образами розпізнаваного об’єкту і еталону та оптимізації значення релевантності у базі еталонів.

Загалом клас візуального об'єкта визначається як нескінченна множина зображень об'єкту з урахуванням його допустимих геометричних перетворень: зсувів, поворотів, масштабування в межах поля зору системи [1-4]. Представником класу виступає еталонне зображення, за яким комп’ютерна система визначає образ (множину ознак) еталона. Множина обраних користувачем еталонних образів створює скінченну базу зразків, у рамках якої здійснюється класифікація об'єктів, що полягає у віднесенні вхідного зображення до одного із еталонних класів або у відмові від класифікації [1, 2].

Більш універсальним у аспекті забезпечення завадостійкості вважається по-елементний аналіз компонентів опису, що на основі формування статистичних класифікаційних характеристик для цілісного образу дає можливість у процесі класифікації знизити вплив завад [2].

Для способу по-компонентного аналізу традиційний підхід структурної класифікації зводиться до визначення для кожного дескриптора із опису розпізнаваного об’єкта деякої підмножини релевантних йому у комплектній множині дескрипторів бази еталонів та підрахунку числа дескрипторів – компонентів об’єкту, віднесених відповідно до кожного із класів (голосування). Ступінь релевантності визначається на підставі обчислення значення метрики. Зважаючи на те, що число дескрипторів у описі еталону досягає 300…500, а класів може бути десятки і навіть сотні, такий підхід призводить до процедури повного перебору та потребує досить громіздких обчислень [3-5].

Впровадження засобів хешування даних суттєво скорочує часові затрати у процесі практичної реалізації процедур метричного пошуку та класифікації. При хешуванні дані бази еталонів попередньо розкладають на групи подібних за деякою ознакою елементів, що значно (у тисячі разів) прискорює процес оброблення за рахунок відповідного зростання вимог до об’ємів пам’яті [5-7]. Хешування реалізує перспективну ідею зниження розмірності аналізованих даних шляхом попередньої побудови для еталонної множини деякої індексованої структури, що спрощує оброблення та знижує обчислювальні затрати на класифікацію.

У роботах [8, 9] досліджено наближені методи метричного пошуку за зразком на підставі створення індексованих структур даних на множині ієрархічних ознак сегментованих зображень. Індексована структура на підґрунті кластеризації для об’ємних масивів

© Гороховатський В. О., Стяглик Н. І., Царевська В. В., 2021

багатовимірних даних впроваджена у професійних системах пошуку [10], де задля покращення продуктивності застосована багатоетапна схема кластеризації з моделлю наближеного пошуку релевантних елементів всередині кластеру. Створення кластерних структур як сучасний підхід інтелектуального аналізу даних дає можливість краще адаптуватися до змісту еталонної інформації, що застосовано нами при визначенні релевантності візуальних об'єктів у технологіях «мішок слів» [2, 11, 16, 17].

Алгоритмічні та програмно-апаратні засоби швидкого пошуку у об'ємних сховищах даних (наприклад, у веб-застосунках) успішно розвиваються і знаходять впровадження у сучасних прикладних пошукових системах [6-8, 11-14].

У роботі [6] детально вивчається спектр засобів швидкісного пошуку, серед яких можна виділити застосування принципу комбінаційного поєднання ряду методів у вигляді ланцюжка: хешування, розбиття даних на блоки (проектування), LSH-оброблення (locality-sensitive hashing, тобто хешування із врахуванням близькості) у вигляді сортування за значенням хеш-функції для блоків даних, логічний аналіз (узгоджена фільтрація) значень хеш-функції для блоків. Ідея LSH-оброблення зосереджує увагу тільки на парах даних, які можуть бути схожими, щоб не перевіряти кожну із пар [6, 15].

Впровадження будь-якого нового засобу оброблення даних вимагає від дослідників уваги в аспекті забезпечення стабільності для функціоналу класифікатора. Зрозуміло, що для систем комп'ютерного зору ключовим критерієм при впровадженні засобів швидкого пошуку є все-таки гарантоване забезпечення достатніх показників результативності класифікації.

Мета роботи – підвищення продуктивності структурних методів класифікації зображень шляхом впровадження індексованих хеш-структур на множині дескрипторів бази еталонних образів та узгодженого ланцюжкового поєднання етапів аналізу.

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

Класифікація за множиною компонентів опису

Розглянемо простір B^n багатовимірних бінарних векторів розмірністю n, у якому будемо конструювати образи розпізнаваного об'єкту і еталонів. Зафіксуємо деяку мультимножину векторів $E_i \subseteq B^n$ як опис еталону $E_i = \{e_v(i)\}_{v=1}^{s}$ у просторі дескрипторів КТ, $s = card\, E_i$ – число дескрипторів у множині [1, 2]. Компоненти опису – це вектори $e_k \in B^n$, скінченна множина яких створює опис об'єкту.

Процес класифікації передбачає наявність деякої бази E описів еталонів розмірністю $N : E = \bigcup_{i=1}^{N} E_i$. Кожний еталонний опис E_i репрезентує окремий клас, представлений скінченною множиною дескрипторів КТ.

Опис розпізнаваного об'єкту є множина $Z \subset B^n$, $Z = \{z_w\}_{w=1}^{s}$. Поставимо задачу побудови класифікатора K як відображення $K : Z \to [1, 2, ..., N]$ у множину номерів класів на основі попереднього конструювання індексованої структури на множині E.

Класифікацію K за множиною компонентів представимо як двоетапний процес $K = K_2 K_1$, де на першому етапі $K_1 : B^n \to [1, 2, ..., N]$ здійснюємо визначення класу d_w для кожного дескриптора $z_w \in Z$, а на другому етапі $K_2 : D \to [1, 2, ..., N]$ із множини $D = \{\mathrm{d}_w\}_{w=1}^{s}$ отриманих локальних рішень першого етапу формуємо висновок про клас об'єкту Z. Такий принцип оброблення узагальнює множину рішень однорідних локальних класифікаторів за моделлю бустінгу [2, 14]. Етап K_1 тут можна розглядати як багатозначну характеристичну функцію для визначення еталонного класу E_i щодо окремого дескриптора із опису об'єкта. Етапи K_1, K_2 можна побудувати і в інших варіантах, наприклад, шляхом створення на етапі K_1 деякого ймовірнісного розподілу за класами еталонів, включаючи процедури логічного оброблення таких розподілів [1, 2].

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

Якщо класифікацію K_1 здійснювати традиційним методом лінійного метричного пошуку (повний перебір) шляхом послідовного аналізу кожного елемента набору E, то застосовують конкурентне правило [2, 16, 17]

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

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

Важливим задля результативної класифікації є впровадження логічного аналізу значення мінімуму, що досягнуто при здійсненні (1) [16]. Значення d_w визначається тільки у випадку, якщо отриманий мінімум відстані в (1) не перевищує заданий поріг δ_ρ: $\rho_{\min} \le \delta_\rho$. У противному випадку клас d_w не визначається, тобто аналізований дескриптор вважається хибним. Необхідну кількість Q обчислених значень метрики в (1) у повній базі еталонів лінійним пошуком можна оцінити значенням параметру $Q = N \cdot s^2$, вважаючи обсяги описів еталонів та об'єкта рівноцінними. Для векторів простору B^n в (1) може бути

застосована проста в обчислювальному сенсі метрика Хемінга χ, що підраховує число не співпадаючих бітів для векторів [2]

$$\chi(z_w, e_v(i)) = \sum_{j=1}^{n} 1[z_{wj}, e_{vj}(i)], \quad (2)$$

де логічна функція $1[\ldots]$ приймає значення 1, якщо j -ті біти векторів z_{wj}, $e_{vj}(i)$ не співпадають, і значення 0 – у протилежному випадку.

Етап K_2 полягає у тому, що на кожному кроці за правилом (1) за значенням d_w інкрементується число r_i голосів елементів, віднесених до *i*-го класу:

$$\begin{cases} r_i + 1, & d_w = i; \\ r_i, & d_w \neq i, \end{cases} \quad (3)$$

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

$$i_0 = \arg \max_{i=1,\ldots,N} r_i. \quad (4)$$

Значення $\{r_i\}^N{}_{i=1}$ відображають гістограму класів за числом голосів елементів із Z. Вирази (3), (4) конкретизують етап K_2, що полягає у обробленні голосів для компонентів опису Z. Розглянута двоетапна процедура класифікації базується на основоположному принципі інтелектуального аналізу даних, що полягає у підрахунку числа позитивних рішень (підтримка, рейтинг зустрічальності) на аналізованій множині даних [14, 18].

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

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

Індексована структура і трансформація даних для швидкого пошуку

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

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

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

$$T_k(E) \cap T_j(E) = \varnothing. \quad (5)$$

На сьогодні існує два найбільш поширених способи розбиття: хешування та кластеризація [3, 5, 6, 18]. Впровадження хешування пов'язують із точними засобами оброблення, а кластеризацію – із наближеними способами самонавчання. Трансформація (5) здійснює попередню класифікацію і повністю зберігає усю сукупність аналізованих даних, яка тепер розподіляється між групами $T_k(E)$. У результаті перетворення (5) кожний дескриптор $e_v \in E$ бази еталонів отримує параметр k номеру групи (кошика).

Зважаючи на уже існуюче розбиття

$$E = \bigcup_{i=1}^{N} E_i$$

даних на окремі еталонні образи, визначимо величину

$$t_{i,k} = card\{e_v \mid e_v \in E_i \,\&\, e_v \in T_k\} \quad (6)$$

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

$$b_i(T_k) = \frac{t_{i,k}}{card\, T_k}. \quad (7)$$

Вираз (7) визначає статистичний розподіл елементів кожного сегменту даних за класами еталонів у вигляді вагових коефіцієнтів класів, причому $\sum_{i=1}^{N} b_i = 1$. Розподіл b є спільною характеристикою усіх елементів сегменту даних, отриману за результатами аналізу (навчання) для бази E. На етапі навчання ефективним для підвищення результативності класифікації може бути запровадження логічного оброблення вектору b задля використання вагомого впливу коефіцієнтів b_i для найбільш значущих класів у кошику [2].

Для хешування ознакою окремого кошику даних виступає значення хеш-функції. Важливим параметром, що впливає на швидкодію пошуку, є число кошиків M. Чим менше число кошиків, тим вища швидкодія переходу до кошику. Чим більше число кошиків, тим менше об'єм даних для аналізу всередині кошиків. Граничними ситуаціями є один кошик (M =1) та повна відсутність хешування ($M = N \cdot s$), що відповідають лінійному пошуку. За думкою дослідників можна формулювати задачу оптимізації числа M кошиків, де критерієм виступає число Q обчислень метрики для компонентів опису [6, 9, 10, 14].

Якщо в одному кошику в середньому число елементів є $N \cdot s/M$, то кількість обчислень (1) всередині індексної структури з використанням значень хеш-коду пропорційна

$$Q_1 = s \cdot M + \frac{N \cdot s}{M},$$

що значно менше, ніж $Q_2 = N \cdot s^2$ для традиційного лінійного пошуку. Для конкретних значень $s = 500$, $N = 10$, $M = 10$ виграш $\beta = Q_1/Q_2$ складає приблизно 450 разів і зростає зі збільшенням обсягів N, s даних.

Метод оброблення даних з використанням хешування [5, 6] фактично здійснює попередню класифікацію на окремі кошики та має свої особливості.

Число кошиків для цього методу, як правило, задане і пов'язане із діапазоном значень хеш-ключа $h(e_v)$ для хешування, яке задає користувач.

Ключ – це, як правило, ціле число, що приймає множину із L фіксованих значень $h(e_v)$, $h(e_v) \in H_0, H_0 = \{h_i\}_{i=1}^{L}$ – множина значень хеш-функції [5, 7]. Для векторів із B^n таким ключем може бути, наприклад, число одиничних бітів у складі дескриптору, число вибраних комбінацій бітів довільної довжини та ін. Взагалі ознаку $h(e_v)$ для хешування можна корисно адаптувати до значень описів наявної бази еталонів.

Із впровадженням хешування розбиваємо множину даних E на непересічні групи $H_k(E)$ (кошики) числом L з рівнозначним значенням хеш-ключа

$$E = H(E) = \bigcup_{k=1}^{L} H_k(E),$$

$$H_i(E) \cap H_j(E) = \varnothing,$$

$$H_k(E) = \{e_v \in E \,|\, h(e_v) \in h_k\}. \qquad (8)$$

Впровадимо тепер конкретний ланцюжок засобів попереднього оброблення даних задля забезпечення прискореного пошуку. Застосуємо блокове подання даних множини дескрипторів, обчисливши два значення хеш-функції $h(1), h(2)$ для кожного із дескрипторів бази еталонів. Конкретно для дескриптора BRISK розміром 512 бітів обчислимо значення $h(1), h(2)$ для першої та другої його половини за схемою «256+256».

Далі впровадимо LSH-оброблення [6]: відсортуємо еталонний масив $E = \{e_v\}_{v=1}^{s*N}$ дескрипторів усієї бази за значенням хеш-функції $h(1)$ для 1-го блоку.

Класифікація на основі синтезованої структури

Застосовуємо детектор КТ до зображення розпізнаваного об'єкту, формуємо опис $Z = \{z_w\}_{w=1}^{s}$ об'єкту як множину дескрипторів.

Побудуємо класифікатор з використанням швидкісного пошуку у базі E на підставі створеної структури.

Пропонований спосіб із впровадженням ланцюжка засобів включає такі дії.

1) Для будь-якого дескриптора $z^* \in Z$ вхідного образу обчислюємо значення хеш-ключів $h^*(1), h^*(2)$ як значення хеш-функції для аргументу z^*.

2) При визначенні у базі дескриптора, ідентичного аналізованому $z^* \in Z$ зі значеннями $h^*(1), h^*(2)$, застосуємо лінійний пошук у «полосі даних» за значенням хеш-функції $h(1)$ для 1-го блоку, що обмежується заданою границею $h^*(1) \pm \Delta$. Результат визначається введеним параметром Δ, який можна назвати точністю пошуку. Крім того, параметр Δ забезпечує ідентифікацію варіативних даних, що незначно відрізняються від еталонних.

3) Логічне узгоджене оброблення. Здійснюємо зіставлення $\rho(z^*, e_v)$ за метрикою Хемінга (2) і пошук мінімуму

$$b = \arg\min_{v} \rho(z^*, e_v)$$

тільки у випадку, якщо значення хеш-функції для 2-го блоку знаходиться у межах $h^*(2) \pm \Delta$.

4) За результатом пошуку на етапі 3 для елемента z^* визначаємо клас d^*.

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

6) За виразом (4) класифікуємо розпізнаваний об'єкт до класу, що набрав найбільшу кількість голосів компонентів.

Запропонований продуктивний за швидкодією спосіб класифікації на підґрунті впровадження хешування може реалізувати як точний, так і наближений види пошуку.

Параметрами є вид хеш-функції, точність Δ, кількість блоків, число кошиків хешу, побудованих для компонентів даних в індексованій структурі. Цими параметрами можна керувати, виходячи із наповненості кошиків для конкретних даних.

Розподіли (6), (7) за класами еталонів для створених груп даних теж несуть важливу інформацію для класифікації, на підставі чого можна видалити із аналізу окремі кошики (якщо класи всередині них розподілені суто рівномірно), або за значеннями розподілу приймати однозначне класифікаційне рішення (якщо спостерігаються суттєві переваги значень для окремих класів).

Результати комп'ютерного моделювання

Моделювання виконано у середовищі PyCharm Community Edition 2020.2.3 із використанням засобів бібліотеки Open CV та мови програмування Python. Апаратне забезпечення – ноутбук з процесором Intel Pentium CPU N3540 2.16 ГГц та ОЗП 4 ГБ. Для визначення дескрипторів КТ застосовано детектор ключових точок BRISK [19] з дескриптором розмірністю n=512. Розроблені моделі класифікатора вжито на

прикладі зображень шаржів людей (політик, артист, вчений), розмір зображень масштабовано до 500x500 пікселів. Ілюстрація класів еталонних зображень та сформовані координати КТ показані на рис. 1.

Кількість обчислених дескрипторів у описі кожного із еталонів складає s =500.

Рис. 1. Еталонні зображення з координатами КТ
(**Fig. 1.** Reference images with coordinates of key points)

У якості хеш-функції $h(...)$ взята кількість одиниць у двійковому коді вектору, параметр точності Δ =13 для обох блоків використано як $\pm$ 5% від розміру блока 256, що відображає допустиме відхилення для значення хеш-функції.

Зважаючи на бінарний вид аналізованих даних, для зіставлення векторів застосовано метрику Хемінга. Всередині полоси фіксованих значень хешу у кошиках у експерименті застосовано традиційний лінійний пошук.

З метою зіставлення характеристик швидкодії програмно змодельований метод лінійного пошуку на усій множині еталонних даних (1500 дескрипторів) без застосування індексованих структур. Для множини еталонних зображень із застосуванням індексованих хеш-структур на 256 кошиків та для лінійного пошуку отримано максимально точний результат: усі 500 дескрипторів кожного із еталонів правильно віднесено до свого класу. При цьому час оброблення без індексного хешування склав приблизно 500 сек, а із комбінаційним хешуванням – лише 49 сек.

Для пошуку полоси даних у відсортованому масиві за значенням $h(1)$ можна замість лінійного пошуку запровадити, наприклад, метод дихотомії [7, 13], що зробить виграш ще суттєвішим.

Як бачимо, виграш у часі обчислень для запропонованого підходу (при заданому числі 3 еталонів та s =500) складає більше 10 разів у порівнянні із традиційним.

При цьому ясно, що виграш у часі обчислень збільшується при зростанні числа еталонів та дескрипторів у описах. Крім того, час обчислень суттєво залежить від створеної програмної моделі, типу комп'ютера, способу доступу до використаного програмного забезпечення, тому об'єктивними є лише відносні показники.

Хешування належить до точних методів трансформації даних.

Природно зрозуміло, що похибка класифікації із впровадженням хешування може виникнути через те, що всередині корзини згрупованих даних можуть зустрітися рівноцінні або близькі за хеш-функцією дескриптори різних класів.

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

Експерименти з впливом перетворення повороту (найбільшим чином викривляє зображення, рис. 2) для вхідних еталонних зображень показали, що пропонований метод успішно класифікує усі еталонні зображення.

Гістограми голосів для зображення рис. 2 містить значення 415, 52, 33, (для інших двох трансформованих зображень – (104, 330, 66) та (60, 59, 381)), що підтверджує впевнену класифікацію для кожного із класів. Максимум числа голосів за «правильний» еталон більше ніж утричі перевищує найближче значення.

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

Задля більш детального аналізу кількісного складу кошиків за показниками (6), (7) проведено обчислення цих значень шляхом розбиття відсортованої множини даних на 8 рівноцінних блоків за значенням хеш-функції $h(1)$ у діапазоні 0…255.

Табл. 1 містить значення показника (6) для 8-ми рівнозначних діапазонів значень $h(1)$. Із табл. 1 видно, що задля подальшого скорочення обчислень на класифікацію для даного набору еталонів деякі діапазони (0…63, 192…255) можна взагалі виключити із аналізу, для діапазонів 64…95, 160…191 встановити значущу перевагу одного із класів, а для решти діапазонів застосовувати розроблений метод. Це дає можливість додатково скоротити час класифікації.

Таблиця 1 – **Числові показники класів для значень хеш-функції $h(t)$**

Класи	**Діапазони значень $h(t)$**							
	31	63	95	127	159	191	223	255
1	0	0	43	140	224	92	1	0
2	0	0	25	143	257	72	3	0
3	0	0	6	111	254	122	7	0

У всіх проведених експериментах класифікація здійснювалася вірно, тобто усі вхідні зображення з перетвореннями правильно отримали свій номер класу. Отримані результати підтверджують ефективність розробленого методу.

Таким чином, із введенням індексної структури та хешування у експерименті отримано суттєвий виграш у часі класифікації більше ніж у 10 разів. Основним недоліком впровадження хешування традиційно вважається деяке зростання необхідних обсягів пам'яті комп'ютера [5-10].

Висновки

У запропонованому підході з метою скорочення обсягів метричного пошуку для класифікації застосовано поєднання ланцюжка методів: хешування, розбиття на блоки (проектування), LSH-оброблення у вигляді сортування за значенням хеш-функції, логічний аналіз (узгоджена фільтрація) значень хеш-функції для блоків. Переваги запропонованого методу – лінійний пошук тільки у обмеженій і параметрично керованій полосі, зниження розмірності даних, пристосування до особливостей прикладної задачі класифікації із врахуванням відхилення значень схожості у певних межах.

Впровадження додаткового аналізу еталонних даних на попередньому етапі оброблення сприяє подальшому скороченню часу класифікації.

Особливості класифікатора полягають у тому, що здійснюється не точний пошук, а з можливостями допустимого відхилення.

Розглянуті методи класифікації базуються на принципі «порівняння з еталоном» і можуть бути універсально застосовані до довільних векторів даних бітового виду.

При застосуванні хеш-структур ключовим моментом є вибір результативної та адаптованої до даних хеш-функції, яка здійснює часткову класифікацію, не змінюючи дані. Більш детальний аналіз значень хеш-функції для конкретних даних дає можливість щодо подальшого скорочення необхідних обчислювальних витрат.

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

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

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

Список літератури

1. Daradkeh Y.I., Tvoroshenko I., Gorokhovatskyi V., Latiff,L.A., Ahmad N. Development of Effective Methods for Structural Image Recognition Using the Principles of Data Granulation and Apparatus of Fuzzy Logic, *IEEE Access*, 2021, 9, pp. 13417-13428, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051625.
2. Гороховатський В.О., Гадецька С.В. Статистичне оброблення та аналіз даних у структурних методах класифікації зображень (монографія). Харків : ФОП Панов А.Н., 2020. 128 с. DOI: http://dx.doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6.
3. Svyrydov A., Kuchuk H., Tsiapa O. Improving efficienty of image recognition process: Approach and case study. *Proceedings of 2018 IEEE 9th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*, DESSERT 2018, 2018, pp. 593-597, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409201.
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, DOI: http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.093.
5. Gorokhovatskiy V.A., Gorokhovatskiy A. V., Peredrii Ye.O. Hashing of Structural Descriptions at Building of the Class Image Descriptor, Computing of Relevance and Classification of the Visual Objects. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2018. Vol. 77 (13). P. 1159–1168. DOI: http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i13.40.
6. Лесковец Юре, Раджараман Ананд, Ульман Джеффри Д. Анализ больших наборов данных. Москва : ДМК Пресс, 2016. 498 с.
7. Ахо А., Хопкрофт Д., Ульман Д. Структуры данных и алгоритмы. Москва : Изд. дом «Вильямс», 2003. 384 с.
8. Berman A., Shapiro L. A flexible image database system for content-based retrieval. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol. 75, No. 1/2. 1999. P. 175–195.
9. Kinoshenko D., Mashtalir V., Yegorova E., Vinarsky V. Hierarchical partitions for content image retrieval from large-scale database. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition / Perner P., Imlya A. (Eds.). *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag, 2005. Vol. 3587. P. 445−455.
10. Babenko A., Slesarev A., Chigorin A., Lempitsky V. Neural codes for image retrieval. Conference Paper. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 2014, 8689 LNCS(PART 1), p. 584-599.
11. Gorokhovatskyi O., Gorokhovatskyi V., and Peredrii O. Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features, *Data*, 2018, 3(4), 52. DOI: http://dx.doi.org/10.3390/data3040052.
12. Manning C.D., Raghavan P., and Schutze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge : University Press, 2008. 528 p.
13. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р., Штайн К. Алгоритмы: построение и анализ. М.: ИД Вильямс, 2005. 1296 с.
14. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. Москва : ДМК Пресс, 2015. 400 с.

15. Gionis A., Indyk P., Motwani R. Similarity search in high dimensions via hashing, *Proc. Intl. Conf. on Very Large Databases*. 1999. pp. 518–529,
16. Гороховатский В.А., Путятин 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.
17. Gorokhovatsky V.A., Putyatin Ye. P. Image Likelihood Measures of the Basis of the Set of Conformities. *Telecommunications and Radio Engineering*. 2009. 68 (9). P. 763–778.
18. Nong Ye. Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples (1st. ed.). CRC Press, Inc., USA. 2013.
19. Leutenegger Stefan, Chli Margarita, Roland Y. Siegwart. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. *Computer Vision* (ICCV). 2011. pp. 2548 – 2555.
20. Yakovleva, O., Nikolaieva, K. Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors. *Advanced Information Systems*. 2020. Vol. 4, No. 4. P. 89-101. DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13.
21. Xu Zhang, Felix X. Yu, Svebor Karaman, Shih-Fu Chang. Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors. *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2017. P. 6818-6826.

REFERENCES

1. Daradkeh, Y.I., Tvoroshenko, I., Gorokhovatskyi, V., Latiff, L.A., and Ahmad, N. (2021), “Development of Effective Methods for Structural Image Recognition Using the Principles of Data Granulation and Apparatus of Fuzzy Logic”, *IEEE Access*, 9, pp. 13417-13428, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3051625.
2. Gorokhovatskyi, V.O. and Gadetska, S.V. (2020), *Statistical processing and data mining in structural image classification methods* (monograph), FLP Panov A.N., Kharkiv, 128 p., DOI: http://dx.doi.org/10.30837/978-617-7859-69-6.
3. Svyrydov, A., Kuchuk, H. and Tsiapa, O. (2018), “Improving efficienty 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.
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, DOI: http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2018.1.093.
5. Gorokhovatskiy, V.A., Gorokhovatskiy, A.V. and Peredrii, Ye.O. (2018), “Hashing of Structural Descriptions at Building of the Class Image Descriptor, Computing of Relevance and Classification of the Visual Objects”, *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 77 (13), pp. 1159–1168, DOI: http://dx.doi.org/10.1615/TelecomRadEng.v77.i13.40.
6. Leskovets, Yure, Radzharaman, Anand and Ulman, Dzheffry D. (2016), *Analyzing large datasets*, DMK Press, Moscow, 498 p.
7. Akho, A., Hopcroft, D. and Ulman, D. (2003), *Data structures and algorithms*, Williams, Moscow, 384 p.
8. Berman, A. and Shapiro, L. (1999), “A flexible image database system for content-based retrieval”, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 75, No. ½, pp. 175–195.
9. Kinoshenko, D., Mashtalir, V., Yegorova, E. and Vinarsky, V. (2005), “Hierarchical partitions for content image retrieval from large-scale database. Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition” / Perner, P., Imlya, A. (Eds.), *Lecture Notes in Artificial Intelligence*. Springer-Verlag. Vol. 3587. P. 445−455.
10. Babenko, A., Slesarev, A., Chigorin, A. and Lempitsky, V. (2014), “Neural codes for image retrieval”, Conference Paper. *Lecture Notes in Computer Science* (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 8689 LNCS(PART 1), pp. 584-599.
11. Gorokhovatskyi, O., Gorokhovatskyi, V. and Peredrii, O. (2018), “Analysis of Application of Cluster Descriptions in Space of Characteristic Image Features”, *Data*, 3(4), 52, DOI: http://dx.doi.org/10.3390/data3040052.
12. Manning, C.D., Raghavan, P. and Schutze, H., (2008), *Introduction to Information Retrieval*, Cambridge, University Press, 528 p.
13. Cormen, T., Leizerson, Ch., Ryvest, R. and Shtain, K. (2005), *Algorithms: construction and analysis*, Publishing house "Williams", Moscow, 1296 p.
14. Flach, P. (2015), *Machine learning. The science and art of building algorithms that extract knowledge from data*, DMK Press, Moscow, 400 p.
15. Gionis, A., Indyk, P. and Motwani, R. (1999), “Similarity search in high dimensions via hashing”, *Proc. Intl. Conf. on Very Large Databases*, pp. 518–529.
16. Gorokhovatskyi, V.A., Putyatin, E.P. and Stolyarov, V.S. (2017), “Study of the effectiveness of structural methods of image classification using a cluster data model”, *Radioelectronics, informatics, management*, No. 3 (42), pp. 78–85.
17. Gorokhovatsky, V.A. and Putyatin, Ye. P. (2009), “Image Likelihood Measures of the Basis of the Set of Conformities”, *Telecommunications and Radio Engineering*, 68 (9), pp. 763–778.
18. Nong, Ye. (2013), *Data Mining: Theories, Algorithms, and Examples*, CRC Press, Inc., USA.
19. Leutenegger, Stefan, Chli, Margarita and Roland Y., Siegwart (2011), “BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints”, *Computer Vision* (ICCV), pp. 2548 – 2555,
20. Yakovleva, O. and Nikolaieva, K. (2020), “Research of descriptor based image normalization and comparative analysis of SURF, SIFT, BRISK, ORB, KAZE, AKAZE descriptors“, *Advanced Information Systems*, Vol. 4, No. 4, pp. 89-101, DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.4.13.
21. Xu. Zhang, Felix, X. Yu, Svebor, Karaman and Shih-Fu, Chang (2017), Learning Discriminative and Transformation Covariant Local Feature Detectors, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 6818-6826.

Received (Надійшла) 28.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Гороховатський Володимир Олексійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Volodymyr Gorokhovatskyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Science Department, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gorohovatsky.vl@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7839-6223.

Стяглик Наталя Іванівна – кандидат педагогічних наук, завідувач кафедри інформаційних технологій і математичного моделювання, Навчально-науковий інститут «Каразінський банківський інститут» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Natalia Stiahlyk – Candidate of Pedagogical Sciences, Head of Department of Information Technology and Mathematical Modeling, Educational and Research Institute "Karazin Banking Institute" of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: natastyaglick@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-5938-2013.

Царевська Віталія Віталіївна – студентка кафедри інформаційних технологій і математичного моделювання, Навчально-науковий інститут «Каразінський банківський інститут» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Vytaliia Tsarevska – student of Department of Information Technology and Mathematical Modeling, Educational and Research Institute "Karazin Banking Institute" of V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vitaliya.tsarevskaya42@gmail.com, ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1865-016X

Комбинационный метод ускоренного метрического поиска данных в задачах классификации изображений

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

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

Ключевые слова: компьютерное зрение; структурные методы классификации изображений; дескриптор BRISK; хеширование с учетом близости; хеш-корзина; быстродействие классификации.

Combination method of accelerated metric data search in image classification problems

Volodymyr Gorokhovatskyi, Natalia Stiahlyk, Vytaliia Tsarevska

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

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

UDC 004.7 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.02

Pavlo Pustovoitov, Maxim Okhrimenko, Vitalii Voronets, Dmitry Udalov

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

THE SPEED CALCULATING INCREASING METHOD OF THE MARKOV MODEL NETWORK NODE

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

Keywords: computer vision; structural methods of image classification; ORB descriptor; hashing; linear search; hash; processing speed; classification accuracy.

Introduction

A network node solves a set of tasks for servicing packet flows, which in terms of Markov, queuing systems are called queries. Queries are generated by various sources in a random way, at random time moments and arrive at the network node interface. Next, the packets pass through the node interface to a free intelligent node to initiate the service process. If all intelligent nodes are busy at the moment, then the newly arrived query from the interface enters the queue to wait for service (Fig. 1).

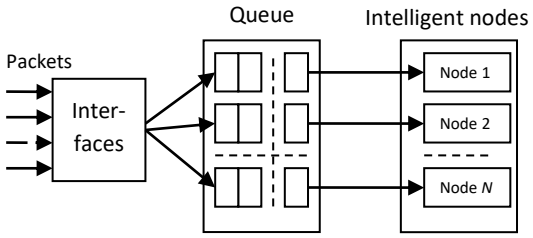


Fig. 1. Scheme of the work of network node f or packets service

The network node functioning for packet flows service can be described by using models of multidimensional continuous random processes with a discrete states set.

Analysis of the literature

Queuing systems (QS) are the most common mathematical apparatus used to analyze processes in networks. Classical works in the field of the theory of QS are [1, 2, 3]. Sources [2, 3] generalize the theory of QS, considering the subject area objects as a set of "queues" and "service channels" at the input of which queries for service are received. Single and multi-link, single and multichannel QS with a normal uniform and exponential queries flow are considered in these sources. The general laws of the query delay time calculating, the length of the queue, etc., depending on the type of QS and the flow of queries, are substantiated and deduced. The source [2] considers the QS theory for substantiating the structure and topology of ARPONET networks. In this work, the main assumptions that allowed to obtain analytical dependencies for the network quality assessment are substantiated. Kleinrock-Jackson Model represents a network as a set of independent networks, each of them is a single-channel QS with an infinite queue and flow of packets (queries). Kleinrock Independence Approximation is the assumption about the independence of the flow at each node, the independence of the query arrival time and its length from the previous queries, while it is assumed that the query flow is stationary and the query arrival time and service time are distributed exponentially. In [2] the main network quality indicators (QoS) are formulated as:

- average time of query service;
- effective bandwidth with constraints on the denial of service probability, on the network topology, on the network cost (directly proportional to the length and maximum network bandwidth);
- denial of service probability.

The constraints and assumptions of [2] will subsequently form the basis of many studies on the information computing network (ICN) quality assessment. Further works set the goal of various types network modeling on the QS basis. It were substantiated the ALOHA models for satellite channels [4, 2], multiple access models for air radio communication networks [2, 12], models of wired (including fiber-optic) "point-to-point" type networks [4, 2, 5, 6]. Based on the QS, two-level models were built, which include backbone network model, serving traffic between computer complexes and terminal networks, describing terminal access to computer complexes [7, 4, 8, 9, 11]. However, the traffic redistribution, the new data transmission technologies emergence [10, 11], the formation of glob-

© Pustovoitov P., Okhrimenko M., Voronets V., Udalov D., 2021

al networks associated with the information and computing support growth in the 80-90s lead to the needs of new adequate ICN models forming [12, 13]. For adequately describe processes in ICN it starts to widely use models with constraints on buffer devices, adaptive traffic distribution models, models with priority dispatching of incoming queries, multichannel service models [9, 12]. However, all of the above models, describing real traffic in network nodes, have an ultra-high dimension, which makes the problem solving as very time-consuming or impossible. The paper proposes a technology for accelerating the problem solution using the decomposition approach.

The problem formulation

Let's postulate that the total flow of queries at the node interface, which resulting from the superposition of several flows from different sources, is Markov flow. This assumption is natural and has the following substantiation.

Let's assume that each of the queries flows entering the computer network is a stationary, ordinary random process, and the number of generate query sources is quite large. If the query sources have the same priority, then they have an approximately equal influence on the overall process. Then, similar to the central limit theorem, we can prove that summing (overlapping) of a large number of ordinary stationary flows with practically any aftereffect leads to a flow arbitrarily close to the simplest one. In practice, it is enough to add 4-5 flows to get a flow that can be operated as the simplest one [1].

Let at random time moments from different sources queries arrive to the network input with intensity λ_i, and the queries service intensity by intelligent nodes is equal to μ_j. Let's create a graph of states and transitions for a quite simple system with three servicing nodes, a superposition of two flows comes to the input of it (Fig. 2).

In the resulting graph, the vertices correspond to the states of the system. Each state corresponds to N-dimensional vector, the components of which reflect the queries amount in the queue in front of the corresponding node.

When a new query arrives or an already received one is processing, the system switches to another state corresponding to the queries amount in the queue in front of each node.

To find the final probability distribution of the system, the Kolmogorov differential equations system can be used, based of which a system of linear algebraic equations relative to the sought states probabilities of the system forms. In this case it is significantly that for a real network node and real traffic the problem dimension is very large and its solution is associated with serious computational problems.

The states and transitions graph for the simplest network (Fig. 2) illustrates this remark well.

Due to this, the work goal is to substantiate a practical methodology for solving the problem of analyzing service quality indicators for network nodes, the model of which has a large dimension.

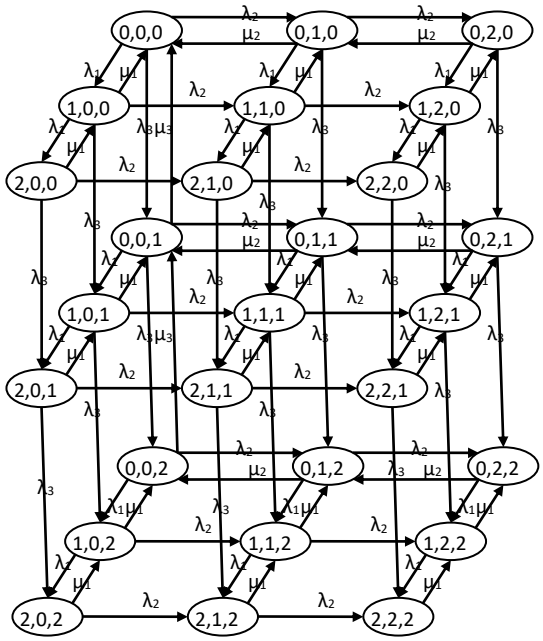


Fig. 2. The states and transitions graph of the network functioning Markov model with three independent incoming flows of queries, when the maximum number of each type queries in the system is two

Analysis method for high dimensional Markov systems

To solve the large dimension problems, the phase consolidation technology of the Markov chain states, which implements the decomposition approach, can be applied [2]. The essence of the method is as follows. The problem solution is cyclical. Each cycle contains a number of iterations. Let's consider the first cycle content. The set of all system states is divided into subsets, and all subsets, except one, are upsized. At the first iteration the first subset remains non-upsized. As a result, the problem dimension is significantly reduced, which allows to calculate the states probabilities for such a system (Fig. 3, a). At the next iteration the second subset is downsized and all others are upsized. The states probabilities are calculated already for such a system (Fig. 3, b). The probabilities of the system stay in each upsized states are equal to the sum of the probabilities of being in the states of the corresponding subset. Thus, if the upsized state I_q contains states with numbers $i_{q1}, i_{q2}, ..., i_{qn_4}$, then the probability of the system being in this upsized state $\pi_{I_4}^{(k)}$, calculated at the next step, is calculated by the formula

$$\pi_{I_4}^{(k)} = \sum_{s=1}^{n_4} \pi_{qs}^{(k)}, \; q = 1, 2, 3, ..., \ell - 1, \ell + 1, ..., m. \quad (1)$$

In this case we obtain a system with a set of possible states

$$\{I_1, I_2, ..., I_{\ell-1}, i_{\ell 1}, i_{\ell 2}, ..., i_{\ell n_1}, I_{\ell+1}, ..., I_m\}$$

and the probability distribution of the system being in these states

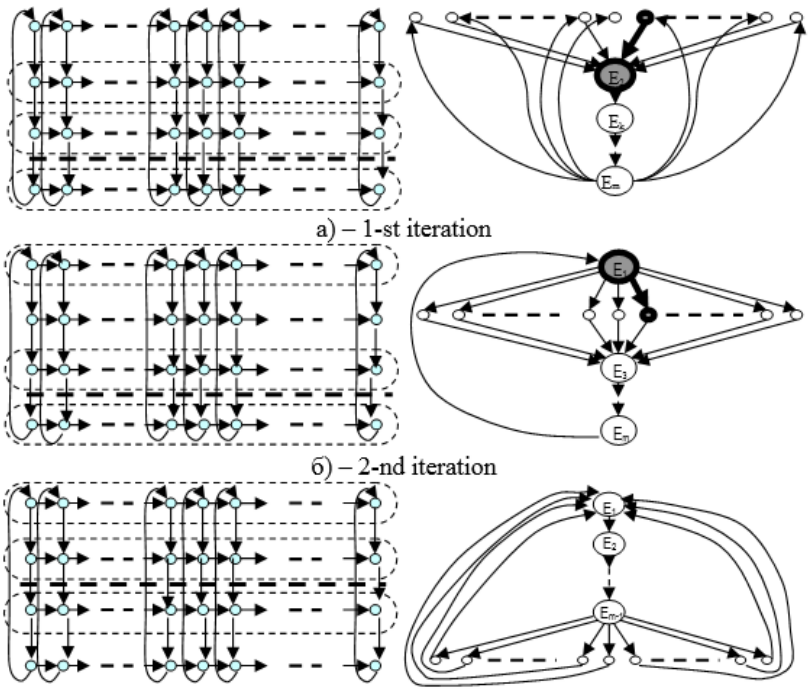


Fig. 3. Phase coarsening of states method

$$\tilde{\pi}^{(k)} = \left(\pi_{I_1}^{(k)}, \pi_{I_2}^{(k)}, ..., \pi_{I_{\ell-1}}^{(k)}, \pi_{\ell 1}^{(k)}, \pi_{\ell 2}^{(k)}, ..., \pi_{\ell n_\ell}^{(k)}, \pi_{I_{\ell+1}}^{(k)}, ..., \pi_{I_m}^{(k)}\right).$$

This distribution will be called group distribution.

Let's calculate the transition probabilities in this new system. The numerical value of these probabilities depends on the type of the corresponding states.

The transition probabilities from the states of the selected subset ℓ to the states of the same subset remain the same as they were in the original matrix W, that is

$$\tilde{p}_{\ell s_1, \ell s_2}^{(k)} = p_{\ell s_1, \ell s_2}, \quad (\ell s_1, \ell s_2) \in E_\ell.$$

The transition probability from any non-upsized state $i_{\ell s}$ to any upsized state I_v is equal to the sum of the true transitions probabilities from this non-upsized state $i_{\ell s}$ to all states of the subset E_v, that is

$$\tilde{p}_{\ell s, I_V}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_V} p_{\ell s, vq}, \quad \ell s \in E_\ell, \quad v = 1, 2, ..., \ell-1, \ell+1, ..., m. \tag{2}$$

The transition probability from the upsized state I_v to some non-upsized state $i_{\ell s}$ is equal to the sum of the products of the true transition probabilities $p_{vq,\ell s}$ from the states of subsets E_v to the state $i_{\ell s}$ by conditional probabilities $W_{vq}^{(k)}$ of the system stay in these states of the subset E_v. In turn of, this conditional probability $W_{vq}^{(k)}$ of the system stay in the state i_{vq} of subset E_v is calculated as the ratio of the probability of being in this state, corresponding to the next obtained complete distribution, to the sum of such probabilities for all states of the subset. Thus

$$\tilde{p}_{Iv,\ell s}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_v} p_{vq,\ell s} \cdot W_{Vq}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_v} p_{vq,\ell s} \cdot \pi_{vq}^{(k)} \Big/ \sum_{q=1}^{n_v} \pi_{vq}^{(k)}. \tag{3}$$

Finally, the transition probability from any upsized state I_{v_1} to another upsized state I_{v_2} is calculated as the sum of the system transition probabilities from the upsized state I_{v_1} to all states included in the upsized state I_{v_2}, that is

$$\tilde{p}_{Iv_1 Iv_2}^{(k)} = \sum_{q_2=1}^{n_{v_2}} \sum_{q_1=1}^{n_{v_1}} p_{v_1 q_1, v_2 q_2} \cdot \pi_{v_1 q_1}^{(k)} \Big/ \sum_{q_1=1}^{n_{v_1}} \pi_{v_1 q_1}^{(k)}. \tag{4}$$

Thus, using formulas (1) - (4), the next group probability distribution of the system stay on the set of states $\tilde{\pi}^{(k)}$, obtained after the upsizing, and the transition probability matrix corresponding to the next upsizing stage are calculated as

$$\tilde{W}^{(k)} = \left(\tilde{p}_{ij}^{(k)}\right),$$

$$(i, j) \in \left\{I_1, I_2, ...I_{\ell-1}, i_{\ell_1}, i_{\ell_2}, ..., i_{\ell n_\ell}, I_{\ell+1}, ..., I_m\right\}. \tag{5}$$

The preparatory calculations have been completed. Now the new group probability distribution is calculated using the formula

$$\tilde{\pi}^{(k+1)} = \left(\pi_{I_1}^{(k+1)}, \pi_{I_2}^{(k+1)}, ..., \pi_{I_{\ell-1}}^{(k+1)}, \pi_{\ell 1}^{(k+1)}, \pi_{\ell 2}^{(k+1)}, ...,\right.$$

$$,\pi_{\ell n_\ell}^{(k+1)},\pi_{I_{\ell+1}}^{(k+1)},...,\pi_{I_m}^{(k+1)}\Big)=\tilde{\pi}^{(k)}\tilde{W}^{(k)}. \qquad (6)$$

The resulting group distribution is used to obtain a new whole distribution

$$\pi^{(k+1)}=\Big(\Big(\pi_{11}^{(k+1)},\pi_{12}^{(k+1)},...,\pi_{1n_1}^{(k+1)}\Big),..,$$

$$\Big(\pi_{\ell 1}^{(k+1)},\pi_{\ell 2}^{(k+1)},...,\pi_{\ell n_\ell}^{(k+1)}\Big),...,\Big(\pi_{m1}^{(k+1)},\pi_{m2}^{(k+1)},...,\pi_{mn_m}^{(k+1)}\Big)\Big).$$

The components of this distribution are calculated by the formulas

$$\pi_{\ell s}^{(k+1)}=\tilde{\pi}_{\ell s}^{(k+1)}, s=1,2,...,n_\ell, \qquad (7)$$

$$\pi_{vq}^{(k+1)}=\tilde{\pi}_{v}^{(k+1)}\cdot\pi_{vq}^{(k)}\Big/\sum_{q=1}^{n_v}\pi_{vq}^{(k)}, \qquad (8)$$

$$v=1,2,...,\ell-1,\ell+1,...,m,\ q=1,2,...,n_v.$$

The iterations are repeated until the last subset is downsized (Fig. 3, c).

The resulting probability distribution is compared with that one obtained at the end of the previous cycle. The solving process continues until the difference between the probabilities of the system being in states with the same indices in two adjacent cycles is lower than a predetermined small value ε.

The fundamental advantage of the described method is that it allows transforming the original complex high dimension problem to a sequence of significantly lower dimension problems, the solving of each of them no longer creates serious computational problems.

Conclusions

The paper proposes a simple practical method for analyzing multiinput and multichannel computer networks. The method realizes the technology of complex problem decomposition to set of simpler ones. The described method can be used to analyze any high dimensional Markov systems. Further research can be aimed at constructing hierarchical procedures for phase consolidation, the needs for which will arise in the study of ultrahigh dimensional systems.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания: пер. с англ. / под ред. В.И. Неймана. Москва: Машиностроение, 1979. 330 с.
2. Клейнрок Л. Вычислительные сети с очередями: пер. с англ. Москва: Мир, 1979. 406 с.
3. Кофман А., Крюон Р. Массовое обслуживание (теория и приложения): пер. с фр. под ред. И.Н. Коваленко. Москва: Мир, 1965. 302 с.
4. Авен О.И., Гурин Н.Н., Коган Я.А. Оценка качества и оптимизация вычислительных систем. Москва: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1982. 132 с.
5. Пороцкий С. Моделирование алгоритма маршрутизации транспортной АТМ сети. *Электросвязь*. 2000. №10. С. 16-19.
6. Турко С.А., Фомин Л.А., Будко П.А., Зданевич С.Н., Гахова Н.Н. Оптимизация пропускной способности звеньев ШЦСИС при ограниченных сетевых ресурсах. *Электросвязь*. 2002. №2. С. 17-19.
7. Ябных Г.А., Столяров Б.А. Оптимизация информационно вычислительных сетей. Москва: Радио и связь, 1987. 230 с.
8. Якубайтис Э.А. Информационно вычислительные сети. Москва: Финансы и статистика, 1984. 310 с.
9. Будко П.А. Выбор пропускных способностей каналов при синтезе сети связи в условиях изменяющейся нагрузки. *Физика волновых процессов и радиотехнические системы*. 2000. Т. 3, № 3-4. С. 68-72.
10. Мизин И.А., Богатырев В.А., Кулешов А.П. Сети коммутации пакетов / под ред. В.И. Семинихина. Москва: Радио и связь, 1986. 408 с.
11. Морозов В.К., Долганов А.В. Основы теории информационных сетей: учебник. Москва: Высшая школа, 1987. 271 с.
12. Будко П.А., Федоренко В.В. Управление в сетях связи. Математические модели и методы оптимизации: монография. Москва: Изд. физико-математической литературы, 2003. 228 с.
13. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. Монография. Москва: Машиностроение-1, 2004. 216 с.

REFERENCES

1. Kleinrock, L. (1979), *Queuing Theory*, Mechanical Engineering, Moscow, 330 p.
2. Kleinrock, L. (1979), *Computing networks with queues*, Mir, Moscow, 406 pp.
3. Kofman, A. and Kruon, R. (1965), *Mass Service (Theory and Applications)*, Mir, Moscow, 302 pp.
4. Aven, O.I., Gurin, N.N. and Kogan, Ya.A. (1982), *Assessment of the quality and optimization of computing systems*, Nauka, Moscow, 132 pp.
5. Porotsky, S. (2000), "Modeling the routing algorithm of the transport ATM network", *Electrosvyaz*, no. 10, pp. 16-19.
6. Turko, S.A., Fomin, L.A., Budko, P.A., Zdanevich, S.N. and Gakhova, N.N. (2002), "Optimization of the bandwidth of SH-ISDN links with limited network resources", *Electrosvyaz*, No. 2, pp. 17-19.
7. Yabnykh, G.A. and Stolyarov, B.A. (1987), *Optimization of information computer networks*, Radio i svyaz, Moscow, 230 p.
8. Yakubaitis, E.A. (1984), *Information computing networks*, Finance and statistics, Moscow, 310 p.
9. Budko, P.A. (2000), "The choice of channel capacities in the synthesis of a communication network under changing load conditions", *Physics of wave processes and radio engineering systems*, Vol. 3, No. 3-4, pp. 68-72.
10. Mizin, I.A., Bogatyrev, V.A. and Kuleshov, A.P. (1986), *Packet Switching Networks*, Radio i svyaz, Moscow, 408 p.
11. Morozov, V.K. and Dolganov, A.V. (1987), *Fundamentals of the theory of information networks*, Vysshaya Shkola, Moscow, 271 p.
12. Budko, P.A. and Fedorenko, V.V. (2003), *Management in communication networks. Mathematical models and optimization methods*,:Izd. physico-mathematical literature, Moscow, 228 p.
13. Pasechnikov, I.I. (2004), *Methodology for analysis and synthesis of extremely loaded information networks*, Machine building-1, Moscow, 216 p.

Received (Надійшла) 24.04.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 28.07.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Пустовойтов Павло Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри "Системи інформації" імені В. О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Pavlo Pustovoitov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head at V. O. Kravets System Information Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.
e-mail: p.pustovoitov@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3884-0200.

Охрименко Максим Юрійович – старший викладач кафедри "Системи інформації" імені В. О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Maxim Okhrimenko - Senior Lecturer at V. O. Kravets System Information Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.
e-mail: Maksym.Okhrymenko@khpi.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1292-748X

Воронець Віталій Миколайович – аспірант кафедри "Системи інформації" імені В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Vitalii Voronets– postgraduate student at V. O. Kravets System Information Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.
e-mail: voronets.vitaliy@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7793-3824.

Удалов Дмитро Володимирович – асистент кафедри "Системи інформації" імені В.О. Кравця, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Dmitry Udalov – assistant at V. O. Kravets System Information Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.
e-mail: dmytro.v.udalov@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-2586-5513.

Метод підвищення швидкості модельного вузла Маркова

П. Є. Пустовойтов, М. Ю. Охрименко, В. М. Воронець, Д. В. Удалов

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

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

Метод повышения скорости модельного узла Маркова

П. Е. Пустовойтов, М. Ю. Охрименко, В. М. Воронец, Д. В. Удалов

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

Ключевые слова: компьютерное зрение; структурные методы классификации изображений; дескриптор ORB; хеширование; линейный поиск; хеш-корзина; скорость обработки; точность классификации.

Information systems modeling

UDC 621.3 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.03

Aleksandr Serkov, Vitaliy Breslavets, Igor Yakovenko, Andrii Fomenko

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

EXCITATION OF MAGNETOPLASMA OSCILLATIONS IN SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY FLUXES OF CHARGED PARTICLES

Abstract. The **subject** of the papers is the processes of analysis and physical model of excitation (amplification) of magnetoplasma oscillations (helicons) by fluxes of charged particles (electrons) in the presence of a constant magnetic field. This model is based on the Cherenkov mechanism for converting kinetic energy of particles into the energy of natural electromagnetic oscillations of solid-state (semiconductor) structures under resonance conditions when the particle velocities coincide with phase velocities of oscillations. The **aim** here is to justify the formulation of theoretical studies basing on the proposed physical model of generation (amplification) of electromagnetic oscillations (emergence of oscillation instabilities, i.e., exponential growth of their amplitude). We define parameters intervals for the external magnetic field, particle fluxes and types of semiconductor structures which this physical model is applied to. We perform theoretical study of the influence charged particle fluxes have on waveguide characteristics of semiconductor structures. The study justifies the possibility of generation and amplification of magnetoplasma oscillations in the submillimeter range. Our **objectives** are theoretical studies of the interaction of moving charges with electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of Cherenkov radiation. The **methods** used are the method of successive approximations for solving the dispersion equations for a system of charged particle flux - semiconductor structure within the framework of hydrodynamic approach. The following **results** are obtained: Theoretical studies of the functioning of semiconductor components of electrical radio equipment in the presence of charged particle fluxes have been carried out. It is shown that the effect of the particle flux is characterized by the emergence of oscillation instabilities in the semiconductor structure. We have determined one of the mechanisms for the excitation of magnetoplasma oscillations based on the interaction of moving charges with the intrinsic fields of the structures that constitute a semiconductor unit. Such equipment failures occur under conditions of Cherenkov radiation. We have shown that this interaction leads to appearance of a mode of oscillation generation. The results of a comparative analysis of the data obtained in this work make it possible to use the proposed physical model to determine the criteria for the occurrence and development of instabilities of magnetoplasma oscillations. **Conclusions**. The results obtained in this work can be used in the development of active microwave range devices (amplifiers, generators and transducers of electromagnetic oscillations of the millimeter and submillimeter bands). The comparative analysis of quantitative estimates of the growth rates of oscillation instabilities, depending on the spatial configuration of the acting field (when induced current is parallel to the structure boundary), carried out in this work, provides a solution to the problem of optimizing the operating characteristics of active microwave devices.

Keywords: charged particle flux; electromagnetic radiation; semiconductor structures; surface vibrations; vibration instability increment.

Introduction

Studies of the possibilities of exciting surface plasma oscillations by a flux of charged particles moving along the surface of a conducting solid were carried out within the framework of the hydrodynamic approach in [1-9]. In these staties, it was assumed that the behavior of the beam particles is of a collective nature, i.e. the energy of its own (plasma) oscillations can be converted into the energy of oscillations of the medium.

In this section, we discuss the kinetic mechanisms of this kind of interaction, which are independent from the collective properties of the beam particles, are partially individual by nature and are caused by resonance relations between the phase velocities of the excited waves and the velocity of the beam particles. The interest in such studies is justified by a number of reasons. First, the objects of excitation are waves whose phase velocities are less than their volumetric velocities, which expands the possibilities of excitation of such waves in conducting solids, where the drift velocities are small. In addition, sources of electromagnetic radiation can be created in a vacuum, where the carrier velocities are an order of magnitude higher than the drift velocities. Finally, the use of third-party sources expands the possibilities of exciting various types of electromagnetic oscillations since the choice of a source can be determined by their polarization. In this paper, we develop a kinetic theory of interaction of surface electromagnetic oscillations with sources of electromagnetic radiation that move along the interface. We also propose a method to determine probabilities with which particles emit or absorb oscillation energy and formulate kinetic equations that describe the change in the number of surface oscillations.

Task solution

Let us consider the interaction of a helicon and a particle moving in a magnetoactive plasma along a helical trajectory relative to a constant magnetic field [8]. We choose the coordinate system in such a way that the 0Z axis is parallel to the direction H_0 along which the particle moves with constant speed v_{0z}. The velocity components along X and Y axes are respectively equal to:

$$v_{0x} = -R\omega_H \sin\omega_H t, v_{0y} = -R\omega_H \cos\omega_H t\,, \quad (1)$$

where R – Larmor radius, ω_H – cyclotron frequency of an electron with charge e and mass m.

A charged particle creates current in the plasma, the density of which is determined by the equation:

$$\vec{j} = e\vec{v}\delta(x-x_0)\,\delta(y-y_0)\delta(z-v_{0z}t)\,, \quad (2)$$

© Serkov A., Breslavets V., Yakovenko I., Fomenko A., 2021

where $x_0 = R\cos\omega_H t, \quad y_0 = -R\sin\omega_H t$. (3)

The system of equations describing the interaction of a particle with a helicon in magnetized plasma has the following form:

$$rot\,\vec{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}; \quad \vec{E} + \frac{1}{c}\left[\vec{u}\vec{H}_0\right] = 0;$$
$$rot\,\vec{H} = \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{D}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c}\vec{j}; \quad \vec{D} = 4\pi e n_0 \int_{-\infty}^{t} \vec{u}\,dt, \tag{4}$$

where $\vec{u}$ is the velocity of the conduction electrons of the medium and n_0 is their concentration. Using the Fourier expansion, we represent the electromagnetic field created by a particle as a set of space-time harmonics. For example, the strength of the electric field in a medium at an arbitrary point $\vec{r}$ at a time t is determined by the equation:

$$E(\vec{r},t) = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \int d\vec{q}\, E(\omega,\vec{q}) e^{i(\vec{q}\vec{r}-\omega t)}, \tag{5}$$

where $\vec{q}$ is the wave vector, ω is the wave frequency. Taking the value of the electric field strength at the point where the charged particle is located, i.e. at the point $\vec{r} = r_0(t)$, $r_0(t) = (x_0, y_0, v_{0z}t)$ and using the equation to find the energy loss of a particle per unit time

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = e\vec{v}\vec{E}\big|_{r=r_0(t)}, \tag{6}$$

we get:

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = \frac{ieR\omega_H}{2} \times$$
$$\times \int \begin{bmatrix} E_+(\omega,\vec{q}) e^{i\omega_H t} - \\ -E_-(\omega,\vec{q}) e^{-i\omega_H t} \end{bmatrix} e^{i(\vec{q}\vec{r}_0 - \omega t)} d\omega\, d\vec{q}. \tag{7}$$

After integration over ω we get:

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = \frac{i(eR\omega_H)^2}{\pi c^2} v_{0z} \times$$
$$\times \int_0^{\infty} q_\perp J_1^2(q_\perp R)\, dq_\perp \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{q_z\, dq_z}{q_\perp^2 + q_z^2 - \tilde{q}_0^2}, \tag{8}$$

where $\tilde{q} = q_0 + iq_0'$; $q_0 = \frac{4\pi e n_0 v_{0z}}{H_0 c}$; $q_0' = \frac{2\pi n_0 m v_{0z}\nu}{H_0^2}$, $q_0 >> q_0'$. Here q_0 is the value of the wave vector of the helicon under the conditions of Vavilov-Cherenkov resonance $\omega_q = q_z v_{0z}$, where $\omega_q = q q_z H_0 c/(4\pi e n_0)$. Assuming $q_0 R << 1$, find the loss of a particle at Vavilov-Cherenkov radiation of helicons:

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = -\frac{e^2 R^4 \omega_H^2 q_0^4 v_{0z}}{32c^2}. \tag{9}$$

If we introduce the magnetic moment generated by a charged particle rotating in the plane XY, $M_{0z} = mv_\phi^2/(2H_0)$ where $v_\phi^2 = v_{0x}^2 + v_{0y}^2 = R^2\omega_H^2$ then equation (9) takes the following form:

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = -\frac{M_{0z}^2 q_0^4 v_{0z}}{8}. \tag{10}$$

So the energy a particle loses during emission of Vavilov-Cherenkov helicons can be interpreted as interaction of a magnetic dipole with the magnetic field of the wave created by the dipole. Knowing the energy losses due to emission of Vavilov-Cherenkov helicons, we define the collisionless damping of these waves. For this purpose, for $q_\perp R << 1$, we rewrite equation (9) as:

$$\frac{d\,\varepsilon}{dt} = \sum_q \frac{d\,\varepsilon_q}{dt}. \tag{11}$$

Changes in the number of bosons (helicons) per unit time resulted from their interactions with conduction electrons $n_{\vec{k}}$ being in the state $\vec{k} = m\vec{v}/\hbar$ can be calculated by the kinetic equation:

$$\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{\vec{k}_1,\vec{k}_2} \left|W_{\vec{k}_1,\vec{q},\vec{k}_2}\right|^2 \delta\left(E_1 - E_2 - \hbar\omega_{\vec{q}}\right) \times$$
$$\times \left[\left(N_q + 1\right) n_{\vec{k}_1}\left(1 - n_{\vec{k}_2}\right) - N_q n_{\vec{k}_2}\left(1 - n_{\vec{k}_1}\right)\right]; \tag{12}$$
$$\vec{k}_2 = \vec{k}_1 - \vec{q}$$

where $N_{\vec{q}}$ is the number of helicons in a state with a wave vector $\vec{q}$; $\hbar\omega_{\vec{q}}$ is the energy of the quantum of the electromagnetic field of the helicon; $W_{\vec{k}_1,q,\vec{k}_2}$ is the matrix element of the Hamiltonian of the interaction of electromagnetic oscillations and electrons. The first term in (8) determines the probability of transitions per unit time such that an electron from a state with energy E_1 transits to a state with energy E_2 with emission of a quantum of energy of electromagnetic field $\hbar\omega_{\vec{q}}$; the second term is the transition with the absorption of the quantum. The collisionless damping of the helicon γ is equal to:

$$\gamma = \frac{1}{2N_{\vec{q}}}\frac{\partial N_{\vec{q}}}{\partial t}. \tag{12}$$

Consider the interaction of helicons with an electron beam, the distribution function of which is described by the expression:

$$f_b(\vec{p}) = \frac{n_{0b}}{(2\pi m T_b)^{3/2}} \times \exp\left(-\frac{(\vec{p} - \vec{p}_0)^2}{2mT_b}\right), \tag{13}$$

where n_{0b} is electron density in a beam, T_b is their temperature in energy units and $\vec{p}_0 = (p_{0x}, p_{0y}, p_{0z})$ is constant. When $p_{0x} = p_{0y} = 0$, decrement (increment) of helicons is equal to:

$$\gamma_1 = \gamma_0 \frac{n_{0b}}{n_0}\sqrt{\frac{mT_b}{m_e T}}\left(1 - \frac{q_z v_{0z}}{\omega_q}\right). \tag{14}$$

It is obvious from (14) that the amplification of helicons is possible if the beam velocity along the constant

magnetic field exceeds the phase velocity of the wave in the same direction. Thus, the energy loss of a particle moving along a helical line relative to a constant magnetic field is equivalent to the energy loss of a magnetic dipole spent for the excitation of helicons. In this case, the dipole moves along H_0.

This mechanism underlies the drainless damping (amplification) of helicons.

Analysis

It was shown in [9] that the radiation of helicons is small in comparison to the radiation of the charge. Indeed, in a quantizing magnetic field, when the transverse energy of the oscillator is equal $\hbar\omega_H/2$, the magnitude of the magnetic moment is equal to Bohr magnetron $e\hbar/2mc = 10^{-29}\,erg/\text{g}$ and is negligible in comparison with its value in classical case

$$M_{0z} = mv_\phi^2/(2H_0) \approx 10^{-14}\,erg/\text{g},$$

where $v_\phi \approx 10^8\,sm/\text{s}$, $H_0 \approx 10^3\,\text{E}$.

For an electron bunch in the form of a sphere with radius of $a = 10^{-1}$ cm, with current density $j \sim 100$ A/cm^2, ($v_0 = 3\cdot10^9$ cm/s, $n_0 \sim 10^{11}$ cm^{-3}), energy losses for helicon excitation ($\omega \sim 10^{10}$ s^{-1}, $q \sim 3$ cm^{-1}) are equal to $\left|\frac{d\varepsilon}{dt}\right| = 10^{-2}(q_0R)^4$ W when $q_0R \sim 10^{-1}$ $\left|\frac{d\varepsilon}{dt}\right| \sim 1$ μW.

Conclusions

The research results revealing the mechanisms of interactions between charged particles and helicons, which has been obtained in this work can be useful in solving practical problems of radiophysics. This is due to a number of features of this kind of magnetoplasma oscillations. First, these waves exist in a wide frequency range, regardless of the ratio between the signal frequency and the collision frequency of charge carriers in classical and quantizing magnetic fields. Second, they have relatively low phase velocities and can interact with acoustic vibrations in semiconductors due to the inductive coupling of conduction electrons and the crystal lattice. And, finally, since the components of the magnetic field of the helicon are small in comparison with the electric field, then at the semiconductor-ferrite interface, coupled helicon-spin surface waves emerge, at certain frequency intervals, which can be used to filter electromagnetic oscillations.

References

1. Beletsky, N.N., Svetlichny, V.M., Halameida, D.D. and Yakovenko, V.M. (1991), *Electromagnetic phenomena of the microwave - range in inhomogeneous semiconductor structures*, Naukova Dumka, Kyiv, 216 p.
2. Zee, C. (1984), *Physics of semiconductor devices*, Mir, Moscow, 456 p.
3. Mikhailov, M.I., Razumov, L.D. and Sokolov, S.A. (1979), *Electromagnetic effects on communication facilities.* Radio and communication, Moscow, 225 p.
4. Steele, M., and Vural, B. (1973), Interaction of waves in solid plasma, Atomizdat, Moscow, 312 p.
5. Myrova, L.O. and Chepizhenko, A.Z. (1988), *Ensuring the resistance of communication equipment to ionizing electromagnetic radiation*, Radio and communication, Moscow, 235 p.
6. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2012), "Excitation of electromagnetic oscillations in 2-D electronic structures by currents induced by external radiation", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 21, pp. 154–161.
7. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2012), "Generation of electromagnetic oscillations of a semiconductor structure under conditions of external electromagnetic influence", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 21, pp. 161–169.
8. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2013), "Influence of the flux of charged particles. Induced by external electromagnetic radiation on the waveguide characteristics of semiconductor components for electrical radio products", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 83–89.
9. Kravchenko, V.I., Yakovenko, I.V. and Losev, F.V. (2013), "Kinetic mechanisms of interaction of surface vibrations with conduction electrons of semiconductor structures under the influence of external electromagnetic radiation", *Bulletin of NTU "KhPI"*, No. 27, pp. 103–111.

Received (Надійшла) 15.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

About the authors / Відомості про авторів

Серков Олександр Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Aleksandr Serkov– Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e mail: saa@kpi.kharkov.ua; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6446-5523.

Бреславець Віталій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Breslavets Vitaliy – candidate of technical sciences, Associate Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e mail: bres123@ukr.net; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-9954-159X.

Яковенко Ігор Володимирович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Yakovenko Igor – Doctor of Physico-Mathematical Sciences, Professor, Professor of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e mail: yakovenko60iv@ukr.net; ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0963-4347.

Фоменко Андрій Анатолійович – старший викладач кафедри систем інформації, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Fomenko Andrii – Senior Lecturer of Information Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: fomenkoandrey1978@gmail.com; ORCID: http://orcid.org/0000-0001-7718-5419.

Збудження магнітоплазмових коливань у напівпровідникових структурах потоками заряджених часток

О. А. Серков, В. С. Бреславець, І. В. Яковенко, А. А. Фоменко

Анотація. Предмет дослідження – процеси аналізу та фізичної моделі збудження (посилення) магнітоплазменних колес (геліконов) потоків заряджених частин (електронів) при наявності постійного магнітного поля. Данна модель базується на черенківському механізмі перетворення кінетичної енергії частинок на енергію власних електромагнітних колекторів твердотільних (напівпровідникових) структур в умовах резонансу, коли швидкість частки та фазові швидкості коливань співпадають. **Мета статті** – обгрунтування постановки теоретичних досліджень на базі запропонованої фізичної моделі генерації (посилення) електромагнітних коливань (появи нестійкостей коливань, тобто експоненціального поста їх амплітуди). Визначено області параметрів зовнішнього магнітного поля, потоків частинок і типів напівпровідникових структур, при яких реалізується дана фізична модель. Проведено теоретичні дослідження впливу потоків заряджених частинок на хвильове характеристики напівпровідникових структур. Вони показали можливість генерації та посилення магнітоплазмових коливань субміліметрового діапазону. **Завдання:** теоретичні дослідження взаємодії рухомих зарядів з електромагнітними коливаннями напівпровідникової структури в умовах черенковского випромінювання. **Методи досліджень**: метод послідовних наближень рішення дисперсійних рівнянь системи потік заряджених частинок - напівпровідникова структура в рамках гідродинамічного підходу. **Результати досліджень.** Проведено теоретичні дослідження функціонування напівпровідникових комплектуючих електрорадіовиробів при наявності потоків заряджених частинок. Показано, що вплив потоку частинок характеризується виникненням нестійкостей коливань напівпровідникової структури. Визначено один з механізмів порушення магнітоплазмових коливань, заснований на взаємодії рухомих зарядів, з власними полями структур, комплектуючих напівпровідниковий виріб. Подібні відмови реалізуються в умовах черенковського випромінювання. Показано, що дана взаємодія проводить до появи режиму генерації коливань. Результати порівняльного аналізу, отриманих в даній роботі розрахункових даних, дозволяють використовувати запропоновану фізичну модель для визначення критеріїв виникнення і розвитку нестійкостей магнітоплазмових коливань. **Висновки.** Результати, отримані в роботі, можуть бути використані при розробці активних приладів НВЧ-діапазону (підсилювачів, генераторів і перетворювачів електромагнітних коливань міліметрового та субміліметрового діапазонів). Проведений в роботі порівняльний аналіз кількісних оцінок інкрементів нестікостей коливань в залежності від просторової конфігурації впливає поля (наведений струм паралельний кордоні структури) дозволяє вирішувати задачі оптимізації робочих характеристик активних приладів НВЧ-діапазону.

Ключові слова: потік заряджених частинок; електромагнітне випромінювання; напівпровідникові структури; поверхневі коливання; інкремент нестійкості коливань.

Возбуждение магнитоплазменных колебаний в полупроводниковых структурах потоками заряженных частиц

А. А. Серков, В. С. Бреславец , И. В. Яковенко, А. А. Фоменко

Аннотация. **Предмет исследования** – процессы анализа и физическая модель возбуждения (усиления) магнитоплазменных колебаний (геликонов) потоками заряженных частиц (электронов) при наличии постоянного магнитного поля. Данная модель базируется на черенковском механизме преобразования кинетической энергии частиц в энергию собственных электромагнитных колебаний твердотельных (полупроводниковых) структур в условиях резонанса, когда скорости частиц и фазовые скорости колебаний совпадают. **Цель статьи** – обоснование постановки теоретических исследований на базе предложенной физической модели генерации (усиления) электромагнитных колебаний (появления неустойчивостей колебаний, т.е. экспоненциального поста их амплитуды). Определены области параметров внешнего магнитного поля, потоков частиц и типов полупроводниковых структур при которых реализуется данная физическая модель. Проведены теоретические исследования влияния потоков заряженных частиц на волноводные характеристики полупроводниковых структур. Они показали возможность генерации и усиления магнитоплазменных колебаний субмиллиметрового диапазона. **Задача:** теоретические исследования взаимодействия движущихся зарядов с электромагнитными колебаниями полупроводниковой структуры в условиях черенковского излучения. **Методы исследований**: метод последовательных приближений решения дисперсионных уравнений системы поток заряженных частиц – полупроводниковая структура в рамках гидродинамического подхода. **Результаты исследований.** Проведены теоретические исследования функционирования полупроводниковых комплектующих электрорадиоизделий при наличии потоков заряженных частиц. Показано, что влияние потока частиц характеризуется возникновением неустойчивостей колебаний полупроводниковой структуры. Определен один из механизмов возбуждения магнитоплазменных колебаний, основанный на взаимодействии движущихся зарядов, с собственными полями структур, комплектующих полупроводниковое изделие. Подобные отказы реализуются в условиях черенковского излучения. Показано, что данное взаимодействие проводит к появлению режима генерации колебаний. Результаты сравнительного анализа, полученных в настоящей работе расчетных данных, позволяют использовать предложенную физическую модель для определения критериев возникновения и развития неустойчивостей магнитоплазменных колебаний. **Выводы.** Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при разработке активных приборов СВЧ –диапазона (усилителей, генераторов и преобразователей электромагнитных колебаний миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов). Проведенный в работе сравнительный анализ количественных оценок инкрементов неустойчивостей колебаний в зависимости от пространственной конфигурации воздействующего поля (наведенный ток параллелен границе структуры) позволяет решать задачи оптимизации рабочих характеристик активных приборов СВЧ –диапазона.

Ключевые слова: поток заряженных частиц; электромагнитное излучение; полупроводниковые структуры; поверхностные колебания; инкремент неустойчивости колебаний.

Methods of information systems synthesis

УДК 004.7:519.1 DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.04

В. В. Онищенко, Я. Ю. Корольова, А. М. Носик

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

ФОРМУВАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ СЕМАНТИЧНОЇ МЕРЕЖІ КОНЦЕПТІВ

Анотація. Предметом дослідження є особливості формування узагальненої семантичної мережі концептів. **Мета статті** – обґрунтування складу та основних типів вершин і відношень, характерних для семантичної мережі концептів, а також формування узагальненої семантичної мережі концептів для структурно-лінгвістичного розпізнавання зображень у комп'ютерних системах і мережах. **Методи дослідження:** методи теорії математичної логіки, математичної лінгвістики та теорії множин; методи візуалізації інформації за допомогою графів. **Результати**: запропоновано підхід до формування узагальненої семантичної мережі структурно-лінгвістичних концептів контурних зображень об'єктів, отриманих під різними кутами зйомки; проведено обґрунтування складу та типів вершин і відношень, характерних для семантичної мережі концептів; сформульовані основні принципи побудови семантичної мережі структурно-лінгвістичних концептів об'єктів розпізнавання. **Висновки**. Для побудови опису зображення, що відповідає концепції семантичної обробки інформації та може використовуватися в системах збору релевантних зображень в комп'ютерних системах і мережах, доцільно використовувати структурно-лінгвістичний підхід до розпізнавання з використанням узагальненої семантичної мережі концептів. Застосування цієї мережі при класифікації та ідентифікації об'єктів дозволяє суттєво розширити діапазон прийнятих до розгляду зображень, які враховують різні напрямки зйомки та різні кути відхилення камери від положення в надир.

Ключові слова: семантичний визначник; семантична мережа; концепт; релевантна інформація; пошук зображень; узагальнена семантична мережа концептів.

Вступ

Постановка проблеми. В даний час забезпечення ефективного змістовного доступу до релевантної інформації, зокрема до електронних колекцій зображень, є досить актуальною проблемою [1]. Особливої актуальності вона набула з розвитком мережі Інтернет, яка щодня поповнюється величезною кількістю зображень. Пошук потрібної інформації стає все більш складним, трудомістким і неефективним процесом. Користувач у більшості випадків отримує велику кількість посилань на ресурси, які лише формально стосуються суті запиту. Завдання ще більше ускладнюється, якщо мова йде про пошук зображень. У зв'язку з цим виникає необхідність у скороченні списку отриманих посилань шляхом здійснення релевантного пошуку зображень та зменшення часу на аналіз сторінок завдяки врахуванню семантики [2] і застосування процедур класифікації та ідентифікації. При цьому методи й алгоритми, які розробляються для вирішення цієї задачі, повинні задовольняти ряду вимог щодо швидкодії та точності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для побудови опису зображення, що відповідає концепції семантичної обробки інформації та може використовуватися в системах збору релевантних зображень, доцільно використовувати структурно-лінгвістичний підхід до розпізнавання [3]. Існуючі методи не дозволяють отримати подібний опис внаслідок неможливості створення універсальних процедур, які здійснюють побудову структур ознак класів розпізнавання інваріантних афінним перетворенням та деформаційним спотворенням контурів зображень [4]. Одним з методів, що задовольняє вищезазначеним вимогам, є метод структурно-лінгвістичного розпізнавання зображень тривимірних об'єктів з використанням семантичної мережі концептів (СМК) [5]. Відомо, що даний метод передбачає класифікацію та ідентифікацію контурних зображень тривимірних об'єктів і складається з: семантичного перетворення контурного зображення об'єкта на структуру концепту [6]; зіставлення отриманого концепту з фрагментами СМК, що відповідають за різні положення камери відносно об'єкта зйомки; прийняття рішення про приналежність об'єкта до певного класу (підкласу); при необхідності ідентифікації об'єкта – здійснення декомпозиції концепту класифікації [7] та зіставлення множини декомпозиційних концептів з фрагментами СМК, що містять еталонні декомпозиційні концепти в межах обраної області; прийняття рішення про приналежність об'єкта до певного типу в межах класу на основі аналізу ознак ідентифікації.

Для застосування цього методу необхідно спочатку сформувати узагальнену семантичну мережу концептів (УСМК), а також провести її коригування в процесі навчання.

Розвиток методів машинного навчання і обробки великих даних (Big Data) призвели до того, що ряд завдань, які раніше розв'язувалися за допомогою семантичних мереж (СМ), стали вирішуватися без них [8-16]. Але, незважаючи на успіхи машинного навчання, СМ як і раніше є незамінними при розміченні об'єктів на зображеннях [17]. СМ з усталеною системою ідентифікаторів зручно використовувати для зв'язування даних між собою. Крім того, цікавим застосуванням СМ є об'єктний або семантичний пошук, коли в якості результатів представляється фактографічна інформація, яка має відношення до пошукового запиту.

Метою статті є обґрунтування складу й основних типів вершин і відношень, характерних для

© Онищенко В. В., Корольова Я. Ю., Носик А. М., 2021

СМК, і формування УСМК для структурно-лінгвістичного розпізнавання зображень у комп'ютерних системах і мережах (КСМ).

Виклад основного матеріалу

Сформулюємо основні принципи побудови УСМК контурних зображень тривимірних об'єктів, отриманих під різними кутами зйомки, і розглянемо основні типи відношень, характерних для пропонованої СМК, на прикладі підкласу класу "літак".

Згаданий метод структурно-лінгвістичного розпізнавання зображень тривимірних об'єктів передбачає, що у процесі розпізнавання здійснюється виділення контуру об'єкта та проводиться його верифікація [18]. Потім відбувається нормалізація [19, 20] отриманої структури більш високого рівня спільності та будується структурно-лінгвістичний концепт $LCpt(I)$ зображення I досліджуваного об'єкта, представленого у вигляді конкатенації структурних елементів $\upsilon_{k,\sigma}$:

$$LCpt(I) = \upsilon_{1,\sigma} * \upsilon_{2,\sigma} * ... * \upsilon_{n,\sigma}, \qquad (1)$$

де $*$ – пропозиційні зв'язки; σ – номер сектора (рис. 1), який характеризує сукупність напрямків орієнтації розвитку структури ($\sigma = \{1, 2, ..., 8\}$); n – кількість структурних елементів концепту.

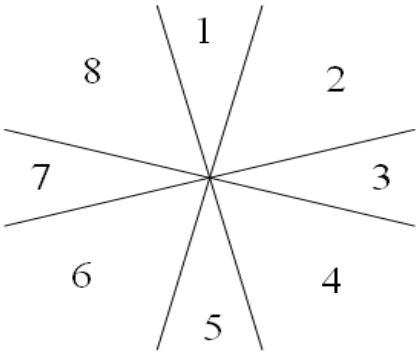


Рис. 1. Система орієнтації структурних елементів
(**Fig. 1**. Orientation system of structural elements)

Побудова множини структурно-лінгвістичних концептів (СЛК), отриманих для різних кутів α_n (рис. 2) відхилення камери від положення в надир і різних напрямків γ_k камери по відношенню до об'єкта зйомки (рис. 3), спричиняє необхідність пошуку варіантів представлення отриманих знань.

Одним з таких варіантів може бути СМ, яка дозволяє описувати об'єкти, явища та поняття предметної області за допомогою мережевих структур, заснованих на теорії графів [16, 21].

Під семантичною мережею будемо розуміти орієнтований граф $W = (N, R)$, де в ролі вершин виступають поняття, а в ролі дуг – відношення між ними. Згідно з [21], можна запропонувати кілька різних класифікацій семантичних мереж, пов'язаних з типами відношень між поняттями. За кількістю типів відношень СМ можуть бути однорідними (з єдиним типом відношень) і неоднорідними (з різними типами відношень). За типами відношень СМ поділяються на бінарні (в яких відношення пов'язують два об'єкти) і N-арні (в яких є спеціальні відношення, що зв'язують більше двох понять).

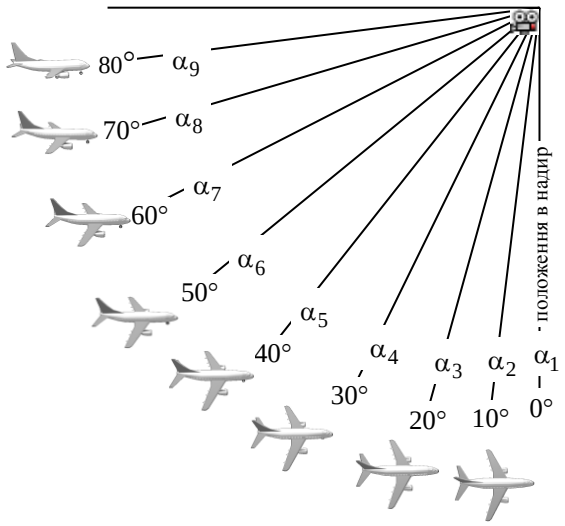


Рис. 2. Відхилення камери від положення в надир
(**Fig. 2**. Camera deviation from nadir position)

Найчастіше при розгляді семантичних мереж використовують наступні відношення: зв'язки, що визначають тип об'єкту "частина – ціле" ("клас – підклас", "елемент – множина"); функціональні зв'язки (визначені зазвичай дієсловами "виробляє", "впливає"); кількісні зв'язки ("більше", "менше", "дорівнює"); просторові зв'язки ("далеко від", "близько від", "за", "під", "над"); часові зв'язки ("раніше", "пізніше", "протягом"); атрибутивні зв'язки ("мати властивість", "мати значення"); логічні зв'язки ("І", "АБО", "НЕ"); лінгвістичні зв'язки та ін.

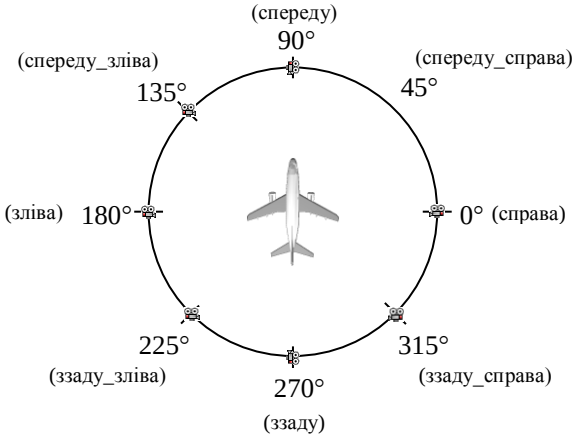


Рис. 3. Відповідність кутів і напрямків зйомки
(**Fig. 3**. Correspondence of angles and directions of survey)

Оскільки зйомка проводиться з різних боків, то одним з визначальних типів відношень будуть просторові відношення r_{np} : "зліва", "справа", "спереду", "ззаду", "спереду_зліва", "спереду_справа", "ззаду_зліва", "ззаду_справа", "зверху" (рис. 3).

Другим типом відношень будуть логічні відношення $r_л$ типу "І" та "І/АБО". Відношення "І" характерні для випадку, коли одній вершині $n_i^{(j)}$ ($i=\overline{1,m}$, m – кількість класів) відповідає єдина вершина $n_i^{(j+1)}$. Наведене в дужках значення означає ступінь вкладеності (рівень ієрархії) СМ. Даний тип відношень визначає напрямок розвитку СМ в глибину. Відношення "І/АБО" характерні для випадку, коли одній вершині $n_i^{(j)}$ відповідає кілька вершин $n_i^{(j+1)}, n_{i+1}^{(j+1)}, \ldots, n_{i+m}^{(j+1)}$. Дана ситуація визначає розвиток СМ як в глибину, так і в ширину.

Крім того, нашій мережі будуть властиві також відношення "частина – ціле", "клас – підклас" і "елемент – множина". Таким чином, фактично ми маємо справу з неоднорідною N-арною СМ.

Розглянемо основні типи вершин $n_i^{(j)}$, які будуть характерними для нашої СМК. Перш за все, це вершина мережі $n^{(0)}$, яка властива будь-якій СМ. З цієї вершини, розташованій на нульовому рівні, починається формування СМК в глибину. Другим типом вершин будуть вершини, що визначають клас об'єкта, де $i=\overline{1,m}$, m – кількість класів. Назвемо їх семантичними визначниками класу. Якщо умови поставленого завдання вимагають більшої деталізації, то класи можуть бути розбиті на підкласи, представлені вершинами $n_{i,k}^{(1)}$, де, $k=\overline{1,n}$, n – кількість підкласів у межах класу. Назвемо їх семантичними визначниками підкласу. В нашому випадку, клас "літак" може бути розбитий на підкласи за принципом аеродинамічної схеми літака. В якості прикладу, будемо розглядати підклас літаків з нормальною аеродинамічною схемою. У загальному випадку ступінь деталізації може бути довільним і визначатися кількістю нижніх індексів під час опису вершини СМ першого рівня.

Наступний рівень вкладеності СМК буде визначатися типами вершин $n_{\gamma_k}^{(2)}$, що відображають відповідність напрямків γ_k камери по відношенню до об'єкта зйомки, і пов'язаних між собою просторовими зв'язками ("між", "зліва", "справа"). Назвемо їх семантичними визначниками напрямків зйомки.

Фрагмент СМК, що включає три розглянутих рівня ієрархії, наведено на рис. 4.

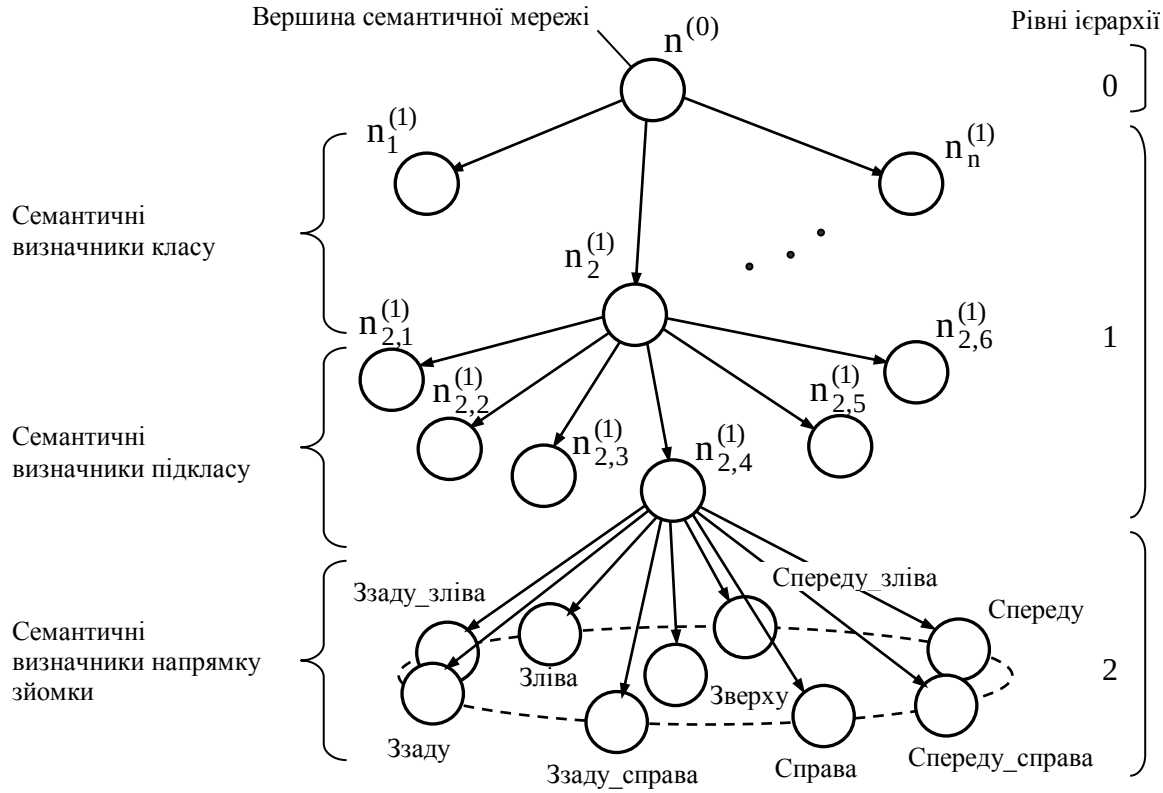


Рис. 4. Фрагмент семантичної мережі концептів (**Fig. 4**. Fragment of the semantic network of concepts)

Для наочності вершини $n_{\gamma_k}^{(2)}$ супроводжуються написами, що пояснюють напрямок камери по відношенню до об'єкта зйомки. Перший рівень ієрархії, який містить два рівня вкладеності, представлений семантичними визначниками класу та підкласу.

Черговий рівень (4-й за рахунком) визначається типами вершин $n_R^{(3)}$ або $n_L^{(3)}$, що характеризують приналежність ланцюжка відповідно до правого $LCpt_R$ або до лівого $LCpt_L$ СЛК відносно осі нормалізації. Назвемо їх семантичними визначниками концептів. Глибина вкладеності даного рівня буде визначатися максимальною довжиною ланцюжка. Вершини СМК, що відображають напрямки орієнтації структурних елементів, будуть позначатися $n_{R,\ell,\varphi}^{(3)}$ або $n_{L,\ell,\varphi}^{(3)}$ для правого або лівого СЛК відпо-

відно. Тут ℓ – номер структурного елемента (порядковий номер символу в ланцюжку), φ – напрямок орієнтації структурного елемента (див. рис. 1).

Розглянемо фрагменти семантичної мережі для рівня ієрархії, що визначає склад лівих (рис. 5) і правих (рис. 6) СЛК, на прикладі напрямку зйомки "справа", розташувавши рівні вкладеності вертикально. Як видно з рис. 5 і 6, фрагменти СМК для лівих і правих концептів (напрямок зйомки "справа") мають сім рівнів вкладеності.

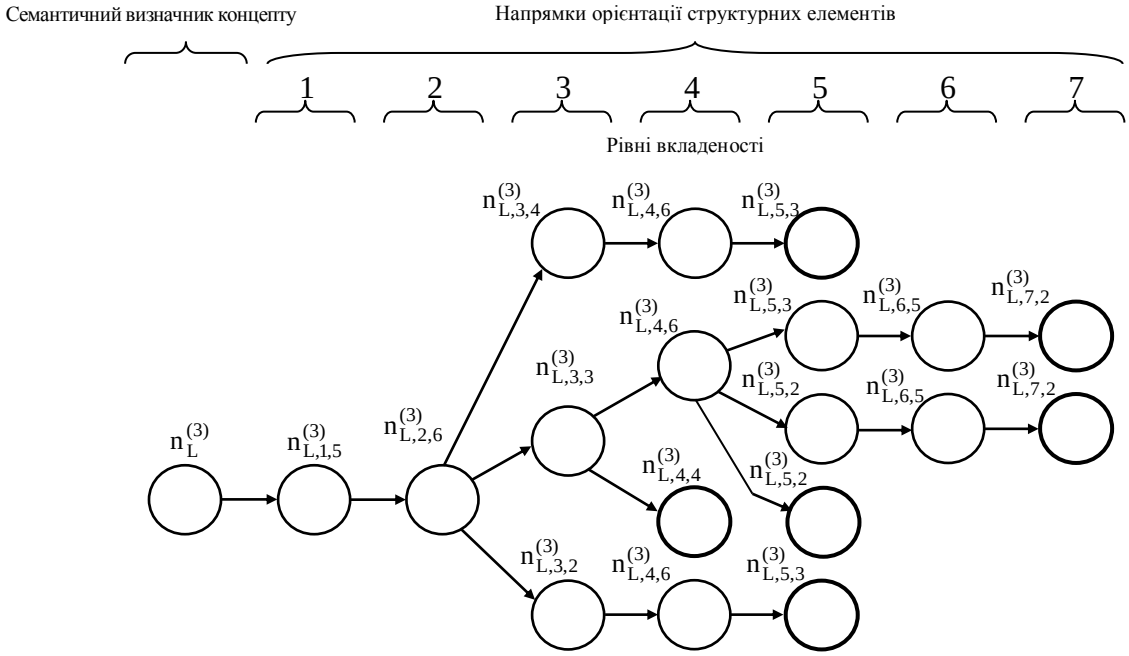


Рис. 5. Фрагмент СМК для лівих концептів ($\gamma_1 = 0°$) (**Fig. 5**. SNC fragment for left concepts ($\gamma_1 = 0°$))

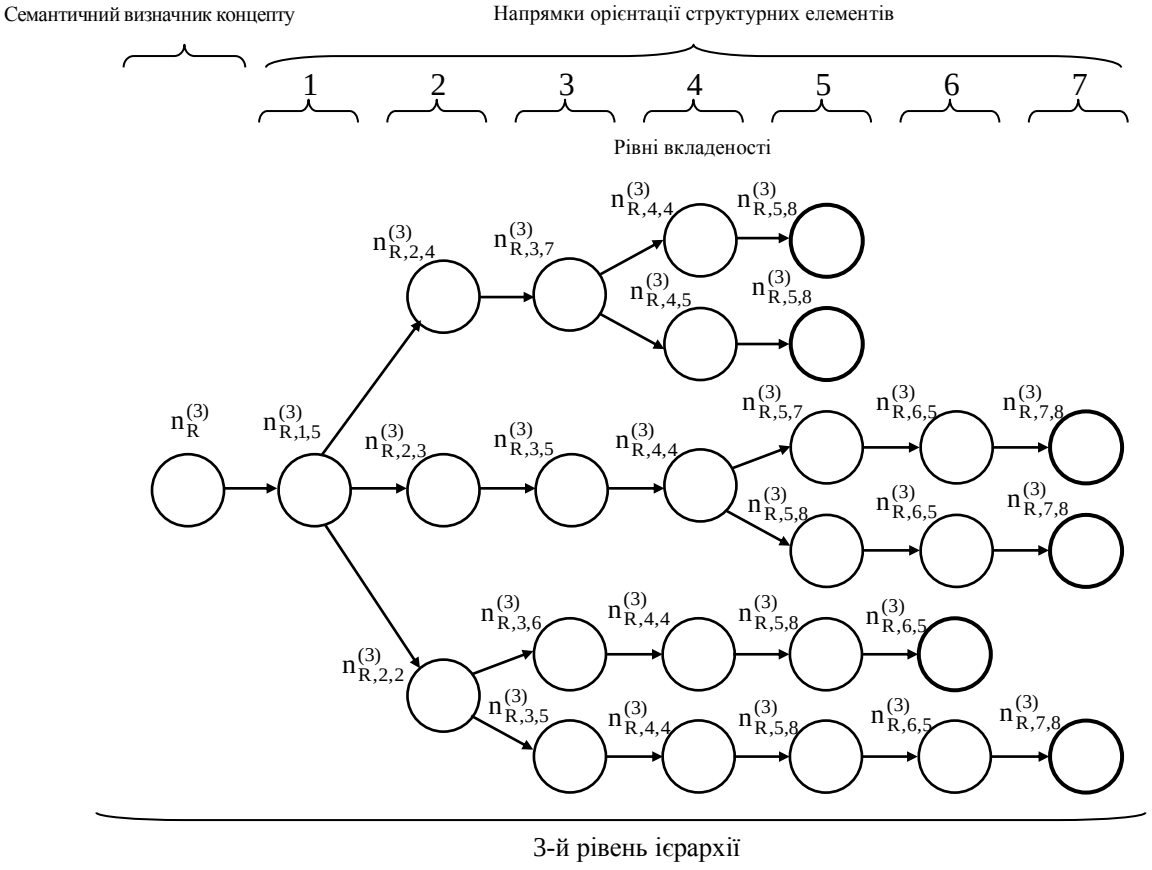


Рис. 6. Фрагмент СМК для правих концептів ($\gamma_1 = 0°$) (**Fig. 6**. SNC fragment for right concepts ($\gamma_1 = 0°$))

Фрагмент СМК для лівих концептів отриманий на підставі об'єднання формул (2-9).

$$\wedge\upsilon_{8,2} \wedge \upsilon_{7,5} \wedge \upsilon_{6,2}; \quad (2)$$

$$\wedge\upsilon_{8,3} \wedge \upsilon_{7,5} \wedge \upsilon_{6,2}; \quad (3)$$

$$\wedge\upsilon_{8,3} \wedge \upsilon_{7,5} \wedge \upsilon_{6,2}; \quad (4)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_5,\gamma_1}) = \upsilon_{12,5} \wedge \upsilon_{11,6} \wedge \upsilon_{10,3} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,2}; \quad (5)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_6,\gamma_1}) = \upsilon_{12,5} \wedge \upsilon_{11,6} \wedge \upsilon_{10,2} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,3}; \quad (6)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_7,\gamma_1}) = \upsilon_{12,5} \wedge \upsilon_{11,6} \wedge \upsilon_{10,4} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,3}; \quad (7)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_8,\gamma_1}) = \upsilon_{10,5} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,3} \wedge \upsilon_{7,4}; \quad (8)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_9,\gamma_1}) = \upsilon_{10,5} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,3} \wedge \upsilon_{7,4}. \quad (9)$$

Фрагмент СМК для правих концептів отриманий на підставі об'єднання формул (10-14).

Фрагменти СМК при зйомці в надир представлені на рис. 7 для лівого (а) та правого (б) концептів відповідно. Дані фрагменти отримані на підставі формул (15, 16). Фрагмент СМК з детекторами для виду "справа" наведено на рис. 8.

$$LCpt_R(I^{\alpha_2,\gamma_1}) = LCpt_R(I^{\alpha_3,\gamma_1}) = \\ = LCpt_R(I^{\alpha_4,\gamma_1}) = LCpt_R(I^{\alpha_5,\gamma_1}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,4} \wedge \upsilon_{3,7} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,8}; \quad (10)$$

$$LCpt_R(I^{\alpha_6,\gamma_1}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,3} \wedge \upsilon_{3,5} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,7} \wedge \upsilon_{6,5} \wedge \upsilon_{7,8}; \quad (11)$$

$$LCpt_R(I^{\alpha_7,\gamma_1}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,3} \wedge \upsilon_{3,5} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,8} \wedge \upsilon_{6,5} \wedge \upsilon_{7,8}; \quad (12)$$

$$LCpt_R(I^{\alpha_8,\gamma_1}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,2} \wedge \upsilon_{3,5} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,8} \wedge \upsilon_{6,5} \wedge \upsilon_{7,8}; \quad (13)$$

$$LCpt_R(I^{\alpha_9,\gamma_1}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,2} \wedge \upsilon_{3,6} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,8} \wedge \upsilon_{6,5}; \quad (14)$$

$$LCpt_L(I^{\alpha_1,\gamma_0}) = \\ = \upsilon_{12,5} \wedge \upsilon_{11,6} \wedge \upsilon_{10,3} \wedge \upsilon_{9,6} \wedge \upsilon_{8,2} \wedge \upsilon_{7,5}; \quad (15)$$

$$LCpt_R(I^{\alpha_1,\gamma_0}) = \\ = \upsilon_{1,5} \wedge \upsilon_{2,4} \wedge \upsilon_{3,7} \wedge \upsilon_{4,4} \wedge \upsilon_{5,8} \wedge \upsilon_{6,5}. \quad (16)$$

Для наочності на рис. 8 більш детально розглянута гілка СМК для семантичного визначника напрямку зйомки "справа", від якого відходять дві вершини $n_R^{(3)}$ і $n_L^{(3)}$. Раніше вже було зазначено, що вони характеризують приналежність вершин, які з них виходять, відповідно до правого $LCpt_R$ або до лівого $LCpt_L$ СЛК відносно осі нормалізації. По суті вершини, які позначені на рівні ієрархії під номером 3, це фрагменти СМК для лівих та правих концептів, наведених на рис. 5 і 6 відповідно.

Вершини, що представлені на рівні ієрархії під номером 4, являють собою детектори кутів і детектор напрямку ("справа"). Детектор кута буде спрацьовувати лише тоді, коли будуть пройдені відповідні ланцюжки правого та лівого концептів для певного кута. Для того, щоб спрацював детектор напрямку, необхідно задіяти один з детекторів кутів. Якщо це станеться, керування передається на рівень ієрархії під номером 5, що свідчить про спрацювання детектору правильної класифікації підкласу класу "літак".

Для інших напрямків зйомки процедура формування узагальненої семантичної мережі концептів відбувається аналогічним чином. Зовнішній вигляд УСМК для підкласу класу "літак" з нормальною аеродинамічною схемою представлений на рис. 9 (для наочності, щоб не перевантажувати рисунок, детектори кутів, напрямку та правильної класифікації не показані).

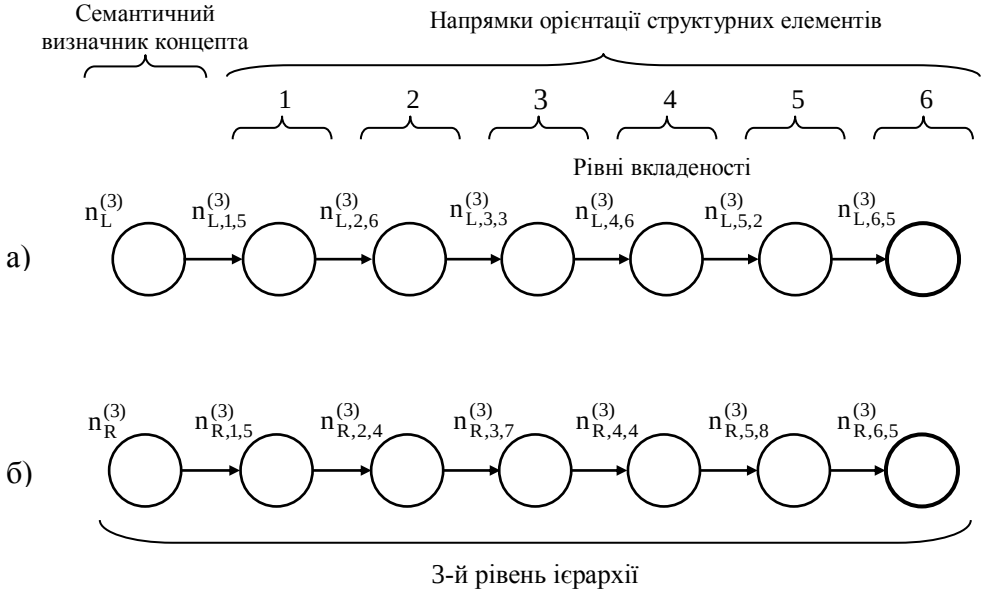


Рис. 7. Фрагмент СМК для лівих (а) та правих (б) концептів (надир, γ_0)
(**Fig. 7**. SNC fragment for left (a) and right (b) concepts (nadir, γ_0))

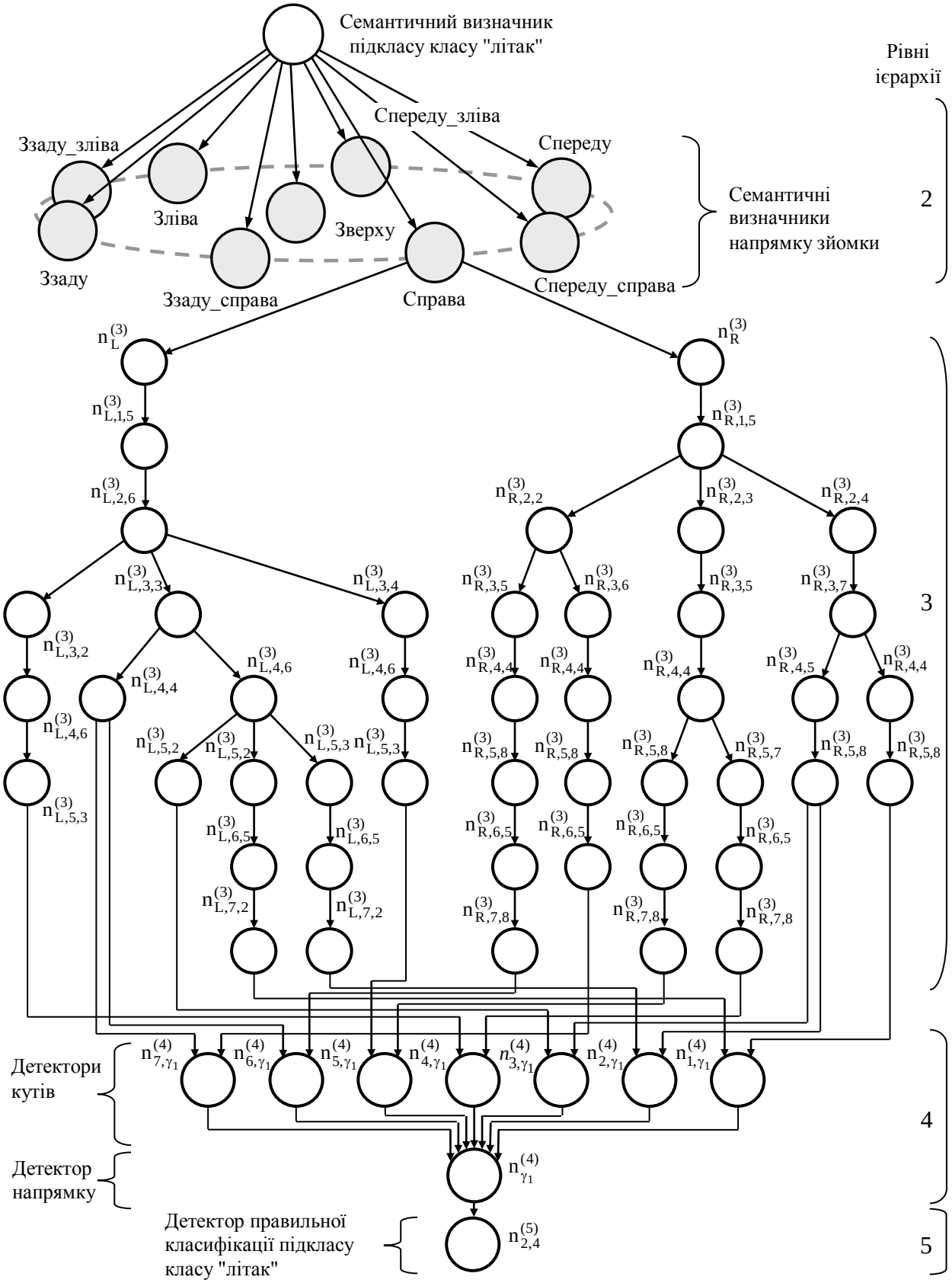


Рис. 8. Фрагмент СМК з детекторами для виду "справа"
(**Fig. 8**. SNC fragment with detectors for the view "right")

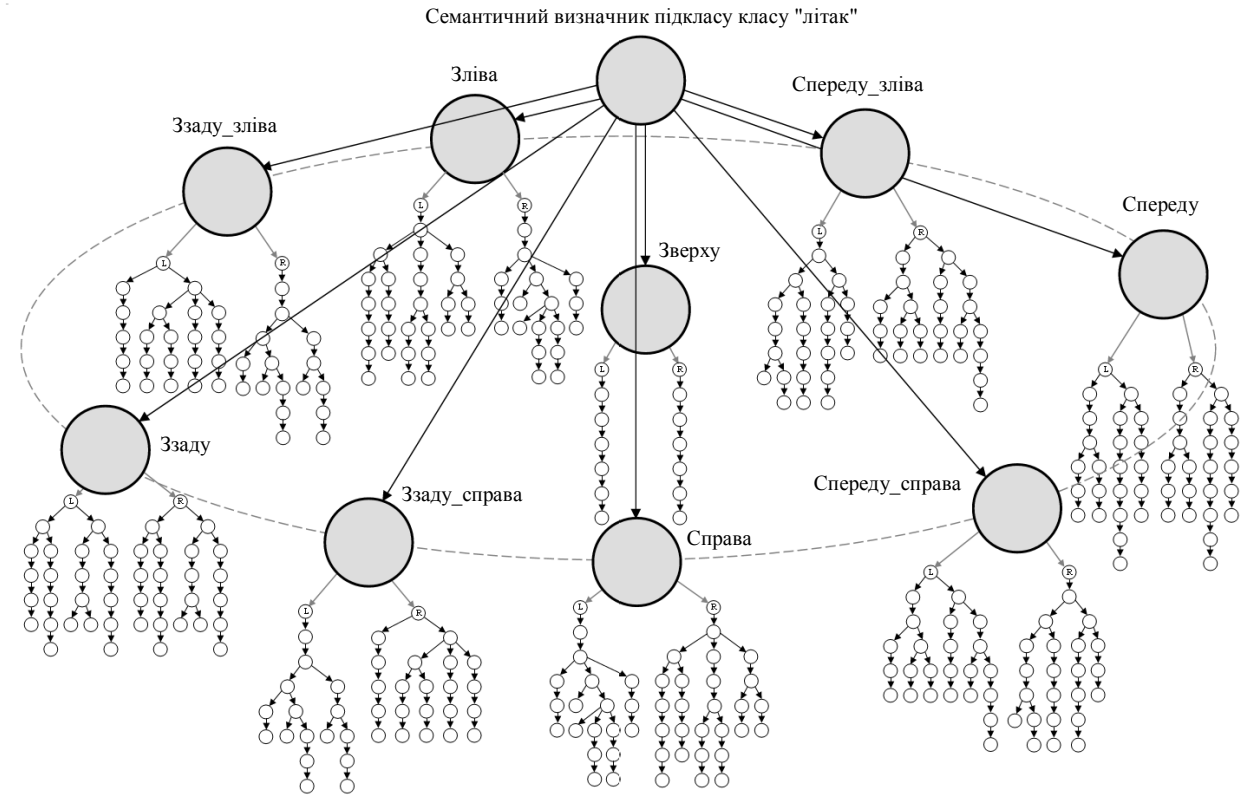


Рис. 9. Фрагмент узагальненої семантичної мережі концептів
(**Fig. 9**. A fragment of a generalized semantic network of concepts)

Висновки

Для побудови опису зображення, що відповідає концепції семантичної обробки інформації та може використовуватися в системах збору релевантних зображень в комп'ютерних системах і мережах, доцільно використовувати структурно-лінгвістичний підхід до розпізнавання з використанням УСМК.

Запропонований підхід до формування узагальненої семантичної мережі структурно-лінгвістичних концептів контурних зображень об'єктів, отриманих під різними кутами зйомки, дозволяє:

- обґрунтувати типи вершин і відношень, характерних для СМК;
- сформулювати основні принципи побудови семантичної мережі структурно-лінгвістичних концептів об'єктів розпізнавання;
- здійснювати класифікацію тривимірних об'єктів, що мають характерні ознаки розпізнавання, та контури яких зазнали значних деформаційних змін в результаті проєктивних спотворень;
- здійснювати пошук рішення в базі знань типу "узагальнена семантична мережа концептів" шляхом виявлення фрагмента мережі (підмережі), що відповідає поставленому запиту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Симанков В. С., Толкачев Д. М. Методы и алгоритмы поиска информации в Интернете. М. : Библио-Глобус, 2017. 332 с., DOI: https://doi.org/10.18334/9785950050183.
2. Папулин С. Ю. Поиск электронных изображений по семантическим признакам. *Программные продукты и системы*. Тверь : НИИ «Центрпрограммсистем», 2011. № 1. С. 16-20.
3. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2012. 1104 с.
4. Чабан Л. Н. Методы и алгоритмы распознавания образов в автоматизированном дешифрировании данных дистанционного зондирования: учебное пособие. М.: МИИГАиК, 2016. 94 с.
5. Онищенко В. В. Способ сбора релевантных изображений с использованием метода структурно-лингвистической классификации и идентификации. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: ХУПС, 2010. Вип. 3(23). С. 129-132.
6. Онищенко В. В. Математическая модель процесса семантического преобразования контурного изображения в структуру концепта. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. Х.: ХУПС. 2010. № 2(4). С. 146-149.
7. Паржин Ю. В., Гринев Д. В., Онищенко В. В. Декомпозиция структур контурных изображений с проективными искажениями. *Системи обробки інформації*. Х.: Харківський університет Повітряних Сил, 2006. Вип. 3(52). С. 119-122.
8. Celik C., Bilge H. S. Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: a comparative study", *Pattern Recognition*, vol. 68, August 2017, pp. 1-13.
9. Ibtihaal M. Hameed, Sadiq H. Abdulhussain, Basheera M. Mahmmod. Content-based image retrieval: A review of recent trends, *Cogent Engineering*, vol. 8:1, 2021, DOI: https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1927469.
10. Lalit Kumar Tyagi, Rama Kant, Anish Gupta. A Comparative Analysis of Various Local Feature Descriptors in Content-Based Image Retrieval System, Conf. Series, vol. 1854, 2021, pp. 9, DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1854/1/012043.

11. Latif Afshan, Aqsa Rasheed, Umer Sajid, Jameel Ahmed, Nouman Ali, Naeem Iqbal Ratyal, Bushra Zafar, Saadat Hanif Dar, Muhammad Sajid, Tehmina Khalil. Content-Based Image Retrieval and Feature Extraction: A Comprehensive Review, Hindawi. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2019, pp. 21, DOI: https://doi.org/10.1155/2019/9658350.
12. Dannina Kishore, Chanamallu Srinivasa Rao. Content-Based Image Retrieval System Based on Fusion of Wavelet Transform, Texture and Shape Features, *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 8, No. 1, February, 2021, pp. 110-116, DOI: https://doi.org/10.18280/mmep.080114.
13. Nicole Tham Ley Mai, Syahmi Syahiran Bin Ahmad Ridzuan, Zaid Bin Omar. Content-based Image Retrieval System for an Image Gallery Search Application, *International Journal of Electrical and Computer Engineering* (IJECE), vol. 8, No. 3, June 2018, pp. 1903-1912, DOI: https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1903-1912.
14. Al-Mohamade A., Bchir O., Ben Ismail M.M. Multiple Query Content-Based Image Retrieval Using Relevance Feature Weight Learning, *J. Imaging* 2020, 6, 2. DOI: https://doi.org/10.3390/jimaging6010002.
15. Vipin Tyagi. Content-Based Image Retrieval – Ideas, Influences, and Current Trends. Springer, 2017, 378 p.
16. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. Питер, 2-е изд..: Пер. с англ. М. : Издательский дом "Вильямс", 2006. 1408 с.
17. Усталов Дмитрий. Семантические сети и обработка естественного языка. Открытые системы СУБД. 2017. № 02. URL: https://www.osp.ru/os/2017/02/13052229.
18. Онищенко В. В. Методика верифікації контурних зображень об'єктів. *Системи озброєння і військова техніка*. Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2006. Вип. 3(7). С. 80-83.
19. Паржин Ю. В., Гринев Д. В., Онищенко В. В. Определение оси нормализации в концептуальных структурах контурных изображений с проективными искажениями. *Системи обробки інформації*. Х.: Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба, 2006. Вип. 9(58). С. 109-112.
20. Паржин Ю. В., Гринев Д. В., Онищенко В. В. Нормализация контуров изображений для распознавания трехмерных объектов средствами дистанционного зондирования Земли в режиме реального времени. *Проблеми управління єдиною державною системою цивільного захисту* : Матеріали НПК. Харків: МНСУ, УЦЗУ. 2007. С. 117-119.
21. Гаврилова Т. А, Хорошевский В. Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000. 384 с.

References

1. Simankov, V.S. and Tolkachev, D.M. (2017), *Methods and algorithms for finding information on the Internet*, Biblio-Globus, Moskva, 332 p., DOI: https://doi.org/10.18334/9785950050183.
2. Papulin, S.Yu. (2011), "Poisk elektronnykh izobrazheniy po semanticheskim priznakam [Search for electronic images by semantic features]". *Programmnyye produkty i sistemy*, NII "Tsentrprogrammsistem", Tver, No. 1, P. 16-20.
3. Gonsales, R. and Vuds, R. (2012), *Digital image processing*, Tekhnosfera, Moskow, 1104 p.
4. Chaban, L.N. (2016), *Methods and algorithms for pattern recognition in automated decryption of remote sensing data*, MII-GAiK, Moskow, 94 p.
5. Onishchenko, V.V. (2010), "A manner for collecting relevant images using the method of structural-linguistic classification and identification". *Systemy ozbrojennja i vijsjkova tekhnika*, KhUPS, Kharkiv, No. 3(23), P. 129-132.
6. Onishchenko, V.V. (2010), "Mathematical model of the process of semantic transformation of the contour image into the structure of the concept". *Nauka i tekhnika Povitrjanykh Syl Zbrojnykh Syl Ukrajiny*, KhUPS, Kharkiv, No. 2(4), P. 146-149.
7. Parzhin, Yu.V., Grinev, D.V. and Onishchenko, V.V. (2006), "Dekompozitsiya struktur konturnykh izobrazheniy s proyektivnymi iskazheniyami [Decomposition of structures of contour images with projective distortions]". *Systemy obrobky informaciji*, Kharkivsjkyj universytet Povitrjanykh Syl, Kharkiv, Vyp. 3(52), P. 119-122.
8. Celik, C. and Bilge, H.S. (2017), "Content based image retrieval with sparse representations and local feature descriptors: a comparative study", *Pattern Recognition*, vol. 68, pp. 1-13.
9. Ibtihaal M. Hameed, Sadiq H. Abdulhussain and Basheera M. Mahmmod (2021) Content-based image retrieval: A review of recent trends, *Cogent Engineering*, vol. 8:1, DOI: https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1927469.
10. Lalit Kumar Tyagi, Rama Kant and Anish Gupta (2021), "A Comparative Analysis of Various Local Feature Descriptors in Content-Based Image Retrieval System", Conf. Series, vol. 1854, 012043. pp. 9, DOI: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1854/1/ 012043.
11. Latif Afshan, Aqsa Rasheed, Umer Sajid, Jameel Ahmed, Nouman Ali, Naeem Iqbal Ratyal, Bushra Zafar, Saadat Hanif Dar, Muhammad Sajid and Tehmina Khalil. (2019), "Content-Based Image Retrieval and Feature Extraction: A Comprehensive Review", Hindawi. *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2019, 9658350, pp. 21, DOI: https://doi.org/10.1155/2019/9658350.
12. Dannina Kishore and Chanamallu Srinivasa Rao (2021), "Content-Based Image Retrieval System Based on Fusion of Wavelet Transform, Texture and Shape Features", *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 8, No. 1, February, 2021, pp. 110-116, DOI: https://doi.org/10.18280/mmep.080114.
13. Nicole Tham Ley, Mai, Syahmi Syahiran Bin Ahmad, Ridzuan and Zaid Bin, Omar (2018), "Content-based Image Retrieval System for an Image Gallery Search Application", *International Journal of Electrical and Computer Engineering* (IJECE) Vol. 8, No. 3, June 2018, pp. 1903-1912, DOI: https://doi.org/10.11591/ijece.v8i3.pp1903-1912.
14. Al-Mohamade, A., Bchir, O. and Ben Ismail, M.M. (2020), "Multiple Query Content-Based Image Retrieval Using Relevance Feature Weight Learning", *J. Imaging* 2020, *6*, 2, DOI: https://doi.org/10.3390/jimaging6010002.
15. Vipin, Tyagi (2017), *Content-Based Image Retrieval – Ideas, Influences, and Current Trends*. Springer, 378 p.
16. Rassel, S. and Norvig, P. (2006), *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Viliams, Moskow, 1408 p.
17. Ustalov, D. (2017), "Semantic networks and natural language processing". *Otkrytyye sistemy*. SUBD. No 02, available at: https://www.osp.ru/os/2017/02/13052229.
18. Onyshhenko, V.V. (2006), "Verification technique for contour images", *Systemy ozbrojennja i vijsjkova tekhnika*, Kharkivsjkyj universytet Povitrjanykh Syl imeni Ivana Kozheduba, Kharkiv, No. 3(7), pp. 80-83.
19. Parzhin, Yu.V., Grinev, D.V. and Onishchenko, V.V. (2006), "Determination of the axis of normalization in conceptual structures of contour images with projective distortions", *Systemy obrobky informaciji*, No. 9(58), pp. 109-112.

20. Parzhin, Yu.V., Grinev, D.V. and Onishchenko, V.V. (2007), "Normalization of image contours for recognition of three-dimensional objects by means of remote sensing of the Earth in real time", *Problemy upravlinnja jedynoju derzhavnoju systemoju cyviljnogho zakhystu*, MNSU, UCZU, Kharkiv, pp. 117-119.
21. Gavrilova, T.A. and Khoroshevskiy, V.F. (2000), *Knowledge bases of intelligent systems*, Piter, Sankt-Peterburg, 384 p.

Received (Надійшла) 11.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Онищенко Валерій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Valerii Onyshchenko – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Multimedia Information Technologies and Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Valerii.Onyshchenko@khpi.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-3104-528X.

Корольова Яна Юріївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Yana Korolova – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of Multimedia Information Technologies and Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yana.korolova@khpi.edu.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7203-5603.

Носик Андрій Михайлович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри мультимедійних інформаційних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Andrii Nosyk – Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Multimedia Information Technologies and Systems Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Andrii.Nosyk@khpi.edu.ua, ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-4171-1875.

Формирование обобщенной семантической сети концептов

В. В. Онищенко, Я. Ю. Королева, А. М. Носик

Аннотация. Предметом исследования являются особенности формирования обобщенной семантической сети концептов. **Цель статьи** – обоснование состава и основных типов вершин и отношений, характерных для семантической сети концептов, а также формирование обобщенной семантической сети концептов для структурно-лингвистического распознавания изображений в компьютерных системах и сетях. **Методы исследования:** методы теории математической логики, математической лингвистики и теории множеств; методы визуализации информации с помощью графов. **Результаты:** предложен подход к формированию обобщенной семантической сети структурно-лингвистических концептов контурных изображений объектов, полученных под различными углами съемки; проведено обоснование состава и типов вершин и отношений, характерных для семантической сети концептов; сформулированы основные принципы построения семантической сети структурно-лингвистических концептов объектов распознавания. **Выводы:** Для построения описания изображения, которое соответствует концепции семантической обработки информации и может использоваться в системах сбора релевантных изображений в компьютерных системах и сетях, целесообразно использовать структурно-лингвистический подход к распознаванию с использованием обобщенной семантической сети концептов. Применение данной сети при классификации и идентификации объектов позволяет существенно расширить диапазон принятых к рассмотрению изображений, учитывающих различные направления съемки и различные углы отклонения камеры от положения в надир.

Ключевые слова: семантический определитель; семантическая сеть; концепт; релевантная информация; поиск изображений; обобщенная семантическая сеть концептов.

Formation of a generalized semantic network of concepts

Valerii Onyshchenko, Yana Korolova, Andrii Nosyk

Abstract. The **subject** of research is the features of formation of a generalized semantic network of concepts. The **purpose** of article is to substantiate the composition and main types of nodes and relationships characteristic of the semantic network of concepts, as well as the formation of a generalized semantic network of concepts for structural and linguistic recognition of images in computer systems and networks. **Research methods:** methods of the theory of mathematical logic, mathematical linguistics and set theory; methods of information visualization using graphs. **Results:** an approach to the formation of a generalized semantic network of structural and linguistic concepts of contour images of objects obtained at different shooting angles is proposed; the substantiation of the composition and types of nodes and relations, characteristic of the semantic network of concepts, has been carried out; the basic principles of constructing a semantic network of structural and linguistic concepts of recognition objects are formulated. **Conclusions:** To construct an image description that corresponds to the concept of semantic information processing and can be used in systems for collecting relevant images in computer systems and networks, it is advisable to use a structural-linguistic approach to recognition using a generalized semantic network of concepts. The use of this network in the classification and identification of objects can significantly expand the range of images accepted for consideration, taking into account different directions of shooting and different angles of camera deviation from nadir position.

Keywords: semantic determinant; semantic web; concept; relevant information; search for images; generalized semantic network of concepts.

УДК 528.88:58.02 + 519.816 DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.05

Р. Е. Пащенко[1], М. В. Марюшко[2]

[1] Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна
[2] Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ОЦІНКА ШВИДКОСТІ ПРОЦЕСУ ФОТОСИНТЕЗУ РОСЛИН ПРИ НЕЧІТКОМУ ОПИСІ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ ТА ІНДИКАТОРІВ

Анотація. Предметом дослідження є оцінка швидкості (інтенсивності) процесу фотосинтезу сільськогосподарських культур при нечіткому описі зовнішніх факторів впливу та спеціальних індикаторів. Об'єктом дослідження є визначення швидкості (інтенсивності) процесу фотосинтезу рослин в заданий момент при відомих факторах впливу і індикаторах процесу фотосинтезу, отриманих з використанням дистанційних засобів. **Мета роботи** полягає у розгляді можливості застосування теорії нечітких множин для розв'язання задачі оцінки швидкості процесу фотосинтезу рослин. **У результаті дослідження** було введено нечіткий опис факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу рослин. На основі такого опису розроблений метод прийняття рішення про характер (швидкість) процесу фотосинтезу з урахуванням індексу NDVI і фрактальної розмірності. Наведено результати визначення швидкості процесу фотосинтезу рослин при трьох різних наборах значень факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу. **Висновки.** Показано, які нечіткі значення факторів і індикаторів впливають на оцінку швидкості процесу фотосинтезу рослин.

Ключові слова: фотосинтез; нечіткий опис; фактор впливу; індекс NDVI; фрактальна розмірність.

Вступ

Швидкість (інтенсивність) процесу фотосинтезу в рослині, яка вимірюється по виділенню кисню, залежить від ряду внутрішніх і зовнішніх факторів. До найбільш важливим внутрішніх чинників відносять: структуру листа і вміст у ньому хлорофілу; накопичення продуктів фотосинтезу в хлоропластах; вплив ферментів; наявність малих кількостей необхідних неорганічних речовин [1]. Основними зовнішніми факторами, що впливають на процес фотосинтезу є: параметри випромінювання, що потрапляє на листя (світло); температура навколишнього середовища; концентрація вуглекислоти і кисню в атмосфері поблизу рослини; вологість повітря [2]. В даний час для визначення інтенсивності засвоєння вуглецю рослиною (фотосинтезу) використовується ряд методів: газометричне визначення інтенсивності фотосинтезу в природних умовах; радіометричний метод визначення інтенсивності фотосинтезу; визначення «чистої» продуктивності фотосинтезу; метод інфрачервоної спектрометрії; манометричний метод визначення інтенсивності фотосинтезу і ін. [3]. Однак ці методи в основному застосовуються в польових або лабораторних умовах і вимагають спеціального обладнання, наприклад, інфрачервоних газоаналізаторів, спектрометрів, приладу Варбурга, а також різних хімічних реагентів [4]. Крім того, для реалізації цих методів потрібні значні тимчасові витрати, а деякі з них призводять до загибелі досліджуваних рослин.

В даний час технології дистанційного зондування Землі активно застосовуються для вирішення різних завдань в сільському господарстві, в тому числі і для прогнозування врожайності сільськогосподарських культур [5]. При цьому супутникові дані забезпечують широке охоплення сільськогосподарських угідь, високу точність результатів, а також високу частоту отримання даних. При оцінці швидкості процесу фотосинтезу рослин дані дистанційного зондування можуть використовуватися для отримання чисельних значень факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу. Ці дані можуть бути отримані з використанням штучних супутників Землі низького і середнього просторового дозволу Terra, Aqua, Suomi NPP, NOAA-20, Landsat, Sentinel-2 і т.д. За допомогою сенсорів, які розташовані на їх борту, можна отримувати дані про різні параметри атмосфери (аерозолях, температурі і вологості, характеристиках хмарності, стан озонового шару, забруднення повітря і т.д.) і поверхні Землі (характеристиках ґрунтово-рослинного покриву, температурі , пожежонебезпечної і паводкової обстановки і т.д.). Космічні знімки в різних діапазонах довжин хвиль, отримані за допомогою супутників дистанційного зондування Землі, можуть бути використані для розрахунку різних вегетаційних індексів, зокрема індексу NDVI, а також розрахунку фрактальних розмірностей підстилаючих поверхонь.

Завдання оцінки швидкості процесу фотосинтезу рослин сформулюємо наступним чином: при відомих факторах впливу і індикаторах процесу фотосинтезу, отриманих з використанням дистанційних засобів, необхідно прийняти рішення про те, яка в даний момент швидкість (інтенсивність) даного процесу.

Оперативна оцінка швидкості процесу фотосинтезу рослин заснована на обліку чинників впливу та індикаторів фотосинтезу при оцінці його інтенсивності. Однак, чисельні значення факторів впливу та індикаторів визначаються в умовах відсутності необхідної статистики про ступінь їх впливу на оцінку швидкості процесу фотосинтезу. Крім того, спільний вплив різних чинників на швидкість і ефективність процесу фотосинтезу залежить від комбінації числових величин цих факторів впливу, при цьому всі вони не обов'язково повинні мати максимальну величину. Так, наприклад, при невеликій інтенсивності освітлення, процес фотосинтезу може прискорюватися за рахунок збільшення температури на-

© Пащенко Р. Е., Марюшко М. В., 2021

вколишнього середовища, збільшення інтенсивності освітлення при збільшенні концентрації вуглекислого газу в повітрі також прискорює процес фотосинтезу. При цьому краще відношення факторів впливу визначається експериментально для різних типів рослин. Таким чином, в умовах нестохастичної невизначеності факторів впливу та індикаторів, оцінка процесу фотосинтезу може відбуватися тільки на основі експертних даних, при цьому експертиза може розглядатися в нечіткій постановці.

Мета роботи: розглянути можливість застосування теорії нечітких множин для розв'язання задачі оцінки швидкості процесу фотосинтезу рослин.

Нечіткий опис факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу

Як зазначалося, вище швидкість процесу фотосинтезу обумовлюється наявністю і значенням певних зовнішніх чинників впливу, а індикаторами цього процесу можуть також бути спеціальні числові показники.

До зовнішніх факторів, що впливають на процес фотосинтезу, в даній роботі будемо відносити:

– інтенсивність світла, що потрапляє на рослини, тобто кількість світла необхідне рослинам для фотосинтезу;
– температуру навколишнього середовища;
– концентрація (вміст) вуглекислого газу в атмосфері поблизу рослини;
– вологість повітря.

До індикаторів процесу фотосинтезу в даній роботі будемо відносити:

– індекс NDVI;
– фрактальну розмірність.

Коротко розглянемо характеристику чинників впливу та індикаторів процесу фотосинтезу.

Дослідження показують [1], що інтенсивність світла є одним з найважливіший факторів фотосинтезу. При його низьких значеннях швидкість фотосинтезу невелика і зростає прямо пропорційно зі збільшенням інтенсивності світла. Однак, при подальшому збільшенні інтенсивності світла наростання швидкості фотосинтезу стає все менше і менше (область світлового насичення), а, коли освітленість досягає певного рівня (близько 10 000 люкс) [2], подальше збільшення інтенсивності світла вже не впливає на швидкість фотосинтезу. Освітлення в яскравий літній, сонячний день відповідає 100 000 люкс [3]. Таким чином, в природних умовах висвітлювати рослина сильніше 10 000 люкс не має сенсу, так як при цьому швидкість фотосинтезу не буде зростати.

Температура впливає на всі процеси життєдіяльності рослини. Нижня температурна межа, при якій може здійснюватися фотосинтез, близько 5° С, найбільш сприятливою для фотосинтезу вважають температуру 25° С. При підвищенні температури на 10° С інтенсивність фотосинтезу приблизно подвоюється. Посилення фотосинтезу, проте, відбувається тільки до температури 30-35° С, подальше підвищення її призводить до зменшення фотосинтезу, а при 40-45° С він припиняється і при подальшому підвищенні температури знижується [2]. Таким чином, на температурній кривій є три основні точки фотосинтезу: мінімум, оптимум, максимум.

До числа зовнішніх факторів відноситься і вміст вуглекислого газу в атмосфері. Вуглекислий газ в сучасній атмосфері має концентрацію в середньому 0.03% [2]. При збільшенні кількості вуглекислого газу в атмосфері фотосинтез зростає, але прямої пропорційності між вмістом вуглекислого газу і фотосинтезом не спостерігається. Встановлено, що ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин буде зростати з підвищенням концентрації вуглекислого газу від 0.3% до 0.5%. Більшість видів рослин негативно реагує на тривалий вплив вуглекислого газу, концентрацією вище 0.5% [1]. Прийнято вважати, що оптимальна концентрація вуглекислого газу залежить від виду рослин, а її середнє значення становить 0.1%.

Вологість повітря і вода є одними з умов життєдіяльності рослин і процесу фотосинтезу. При нестачі вологості повітря (8-12%) сповільнюється процес проникнення вуглекислого газу, а це призводить до зменшення швидкості фотосинтезу [3]. Надмірне зволоження також негативно позначається на інтенсивності фотосинтезу, вуглекислий газ не може проникнути всередину листа. Оптимальна величина відносної вологості, необхідної для фотосинтезу, становить 50-80% [6].

Вегетаційні індекси (математична комбінація двох або більше спектральних діапазонів) дозволяють досліджувати біомасу, інтенсивність росту, густоту рослинного покриву [7]. Нормалізований вегетаційний індекс NDVI можна розрахувати з використанням виразу

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

де NIR – ближній інфрачервоний спектральний діапазон (0.85-0.88 мкм); RED – видимий червоний спектральний діапазон (0.64-0.67 мкм).

Значення індексу NDVI змінюються межах від -1 до 1. Негативні значення індексу NDVI відповідають водним поверхнях, будівлям, горам і т. д. Для відкритого ґрунту значення індексу NDVI змінюються від 0.1 до 0.2, а для рослинності – завжди від 0.2 до 1. Як правило, значення індексу NDVI від 0.2 до 0.4 відповідають території з розрідженою рослинністю, для помірної рослинності – від 0.4 до 0.6, для густої – вище 0.6 [8].

Фрактальна розмірність є дробовою величиною і показує складність (порізаність) форми, яка заповнює простір. Існує багато методів розрахунку розмірності, але всі вони включають підрахунок об'єму або площі фрактальної форми і того, як вона змінюється в різних масштабах. При аналізі цифрових зображень фрактальна розмірність (D) змінюється в межах від 2.0 до 3.0. Для визначення величини фрактальної розмірності на практиці найчастіше застосовують метод покриття [9].

Фрактальну розмірність можна розрахувати з використанням виразу

$$D = \lim_{\varepsilon \to 0} \frac{\log N(\varepsilon)}{\log(1/\varepsilon)}, \quad (2)$$

де ε – довжина сторони кубів, якими покривають зображення; $N(\varepsilon)$ – кількість кубів покриття.

В роботі [10] показано, що при обробці цифрових зображень посівів кукурудзи для «вікна» розміром 16×16 пікселів середнє значення фрактальної розмірності дорівнює $D = 2.922$ (станом на 16.06.2018), $D = 2.946$ (станом на 09.07.2018), $D = 2.910$ (станом на 29.07.2018). При цьому характер змін середнього індексу NDVI для цих зображень був наступним: $NDVI(16.06.18) = 0.688$, $NDVI(09.07.18) = 0.770$, $NDVI(29.07.18) = 0.662$. В роботі [10] також показано, що величина фрактальної розмірності залежить від розміру «вікна» при обробці.

На практиці статистична інформація про фактори впливу та індикаторах процесу фотосинтезу сильно обмежена. Тому завдання оперативної оцінки швидкості (інтенсивності) процесу фотосинтезу треба розглядати в умовах апріорної невизначеності, а її рішення можна здійснювати на основі проведення експертизи з використанням нечітких множин і обробки експертних даних.

Підхід до формалізації поняття нечіткої множини полягає в узагальненні поняття приналежності [10]. Нечіткі множини є природним узагальненням звичайних множин, при відмові від бінарного характеру цієї функції і припущенні, що вона може приймати будь-які значення на відрізку $[0,1]$. В теорії нечітких множин характеристична функція називається функцією приналежності, а її значення $\mu_A(x)$ – ступенем приналежності елемента x нечіткій множині A.

Більш строго, нечіткою множиною A називається сукупність пар [11]

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\}, \quad (3)$$

де μ_A – функція приналежності, тобто $\mu_A : U \to [0,1]$.

Підхід до проведення експертизи в умовах нечіткої постановки завдання і обробки отриманих даних описаний в [12].

При організації експертизи вирішується завдання прийняття рішень про вибір найбільш точної оцінки швидкості процесу фотосинтезу V_{opt} зі всієї безлічі допустимих оцінок значень V (класів швидкостей фотосинтезу). При формуванні безлічі V, як правило, керуються узагальненими значеннями факторів впливу та індикаторів процесу, властивих різним класам швидкостей фотосинтезу. Однак, через відсутність апріорних даних про узагальнені значення факторів впливу і індикаторів, експерт такими значення не керується. Тому при визначенні швидкості фотосинтезу (при проведенні експертизи) використовується безліч оцінок значень факторів впливу та індикаторів, які доступні кожному з N експертів.

При цьому в системі оцінки швидкості фотосинтезу враховується: інформація про значення факторів впливу та індикаторів на швидкість фотосинтезу; множина оцінок значень факторів впливу та індикаторів, доступні кожному експерту; наявність зв'язку між експертами; наявність зворотного зв'язку; метод обробки експертних даних. Облік цих даних дозволяє підвищити точність прогнозної оцінки швидкості процесу фотосинтезу.

Виходячи з цього, в системі оцінки швидкості фотосинтезу може бути реалізована така схема експертизи, в якій кожен N-й експерт свою суб'єктивну думку про прогнозовані значення фактору впливу і індикатора процесу фотосинтезу висловлює в нечітких оцінках прогнозних значень. Це реалізується тоді, коли кожен експерт висловлює свою думку про прогнозовані значення фактору впливу і індикатора у вигляді нечіткого трикутного числа, функція належності якого має вигляд [11]

$$\mu_{A_k}(x) = \begin{cases} \left[x - (A_k - \Delta_1)\right] / \Delta_1, & A_k - \Delta_1 \le x \le A_k, \\ \left[(A_k - \Delta_2) - x\right] / \Delta_2, & A_k \le x \le A_k + \Delta_2, \\ 0, & 0 \le A_k - \Delta_1,\ x \ge A_k + \Delta_2, \end{cases} \quad (4)$$

графічне представлення якого показано на рис. 1.

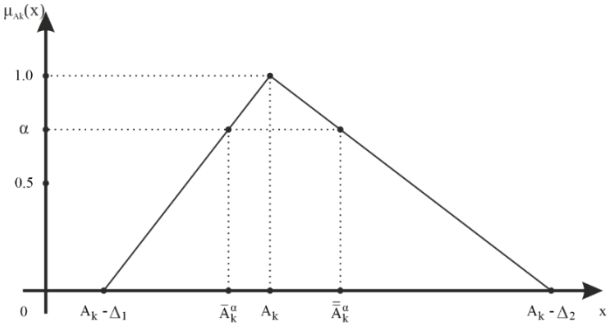


Рис. 1. Представлення значення фактору впливу індикатора нечітким трикутним числом
(**Fig. 1.** Representation of the value of the influence factor of the indicator by a fuzzy triangular number)

При виборі функції приналежності у вигляді нечіткого трикутного числа, кожен N-ий експерт висловлює свою суб'єктивну думку у вигляді трьох значень про кожен фактор впливу і індикаторі процесу фотосинтезу: $(A_k - \Delta_1)$ – негативна оцінка (зростаюча ділянка трикутника); A_k – оцінка, найбільш очікувана (вершина трикутника); $(A_k + \Delta_1)$ – позитивна оцінка (спадаюча ділянка трикутника). Потім отримані оцінки усереднюють з урахуванням вагових коефіцієнтів експертів, що залежать від їхнього досвіду, і виходить опис кожного фактору впливу і індикатора процесу фотосинтезу. Якщо експерт вибирає значення функції приналежності фактору впливу або індикатора рівним $\alpha(\mu_{Ak}(x) = \alpha)$ (рис. 1), то визначаються чіткі α-

рівневі підмножини, де – відповідно ліва і права межі значення фактору впливу або індикатора процесу фотосинтезу. Виходячи зі змісту нечіткого підмножини A_k, експерт вибирає $\alpha \geq \alpha_{нд}$, де $\alpha_{нд}$ – рівень необхідної довіри прогнозних значень факторів впливу або індикаторів процесу фотосинтезу, наприклад, $\alpha_{нд}$ може обраний $\alpha_{нд} = 0.6$ для індексу NDVI. Для оцінки швидкості процесу фотосинтезу за прогнозованими значеннями факторів впливу і індикаторами в нечіткій постановці, розглянемо можливу декомпозицію проблеми в ієрархію, яка представлена на рис. 2.

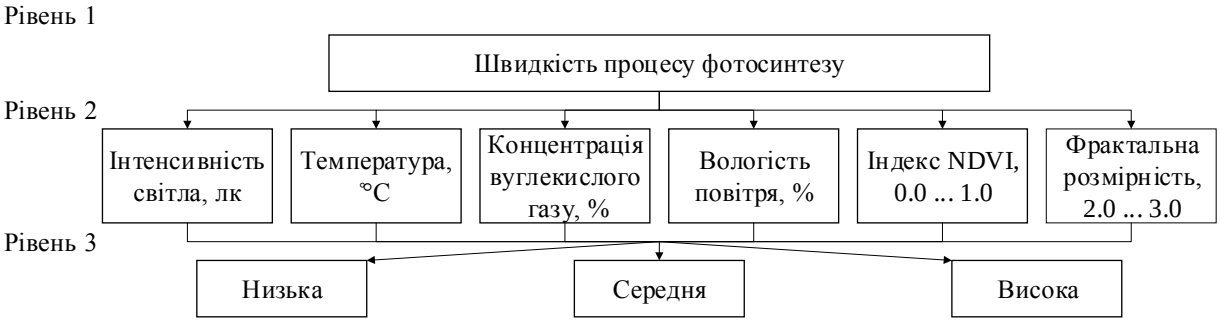


Рис. 2 Декомпозиція проблеми в ієрархію (**Fig. 2** Decomposition of the problem in the hierarchy)

На рис. 2 видно, що декомпозиція проблеми в ієрархію має три рівні. На першому рівні характеризується мета, яка досягається при вирішенні проблеми – оцінка швидкості процесу фотосинтезу. На другому рівні вводяться, аналізуються і описуються фактори впливу та індекси, за якими повинно прийматися рішення про швидкість процесу фотосинтезу. Третій рівень визначає перелік альтернатив, які, на думку експертів, складають повну їх множину. Таким чином, при відомих наборах значень факторів впливу і індексів процесу фотосинтезу (на практиці ці значення перетинаються) необхідно прийняти рішення про швидкість процесу фотосинтезу.

Як видно на рис. 2, нечіткий прогнозований опис значень факторів впливу на процес фотосинтезу (A_1, A_2, A_3, A_4) має чітко виражену кількісну природу і вимірюються у відповідних величинах (люксах, градусах Цельсія і відсотках), нечіткий прогнозований опис індикаторів процесу фотосинтезу $(A_5 \, i \, A_6)$ також може бути віднесено до кількісних (індекс NDVI може змінюватися від 0 до 1, а фрактальна розмірність від 2 до 3). При цьому, як зазначалося вище, фактори впливу та індикатори процесу фотосинтезу будемо прогнозувати в нечіткій постановці і їх прогнозні значення описувати нечіткими трикутними числами.

З використанням апріорної інформації про основні чинники, що впливають на процес фотосинтезу, і його індикатори визначимо (проведемо експертизу) діапазони зміни ступеня впливу факторів і індикаторів на оцінку швидкості процесу фотосинтезу. В якості експертів виступатимуть автори роботи. У табл. 1 наведено діапазони зміни значень факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу при прийнятому рівні α функцій належності для трьох різних умов оцінки процесу фотосинтезу.

Таблиця 1 – **Значення факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу**

Процес фотосинтезу	Інтенсивність світла, лк × 10^3	Температура, °С	Концентрація вуглекислого газу, %	Вологість повітря, %	Індекс NDVI, 0.0 ... 1.0	Фрактальна розмірність, 2.0 ... 3.0
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
ПФ 1	9 … 11	20 … 30	0.1 … 0.3	60 … 80	0.6 … 0.7	2.92 … 2.95
ПФ 2	7 … 10	10 … 20	0.05 … 0.15	40 … 60	0.5 … 0.6	2.90 … 2.93
ПФ 3	8 … 9	25 … 35	0.03 … 0.1	30 … 50	0.6 … 0.7	2.91 … 2.94

Як видно з аналізу даних табл. 1, діапазони зміни значень факторів впливу та індикаторів трьох процесів фотосинтезу перетинаються, і визначити швидкість цих процесів в таких умовах стає неможливо. Тому при обробці експертних даних значення кожного фактору впливу і індикатора процесу фотосинтезу будемо представляти нечіткою підмножиною (нечітким трикутним числом).

При визначенні значень функції приналежності експерти керуються думкою: у скільки разів обраний фактор впливу і індикатор процесу фотосинтезу більш істотний (вагоміший) по відношенню до іншого фактору впливу і індикатору з точки зору можливості оцінки швидкості процесу фотосинтезу. При цьому використовується дев'яти бальна шкала, обґрунтування вибору якої наведено в [13]:

– якщо *i*-й та *j*-й фактори впливу або індикатори $(A_i \, i \, A_j)$ немає сенсу порівнювати, тобто вони не порівнювані, то оцінка за якісною шкалою дорівнює 0;

– за умови, що *i*-й та *j*-й фактори впливу однаково важливі, то за якісною шкалою оцінка дорівнює 1;

– якщо *i*-й фактор впливу незначно важливіше, ніж j-ий, то оцінка дорівнює 3;

– якщо ж *i*-й фактор впливу просто важливіше j-го – оцінці присвоюється значення 5;

– в разі, коли *i*-й фактор впливу значно важливіше j-го – оцінка має значення 7;

– якщо *i*-й фактор впливу за своєю значимістю абсолютно перевершує *j*-й – оцінці присвоюється значення 9.

Для зворотного порівняння *j*-го фактору впливу з і-им $\left(A_j \, i \, A_i\right)$ використовуються зворотні величини: $1, 1/3, ..., або 1/9$.

Значення оцінок 2, 4, 6, 8 і їх зворотні величини використовуються для полегшення компромісів між судженнями, які відрізняються незначно.

Як показано в роботі [13], з використанням такої якісної шкали оцінок кожен експерт може представляти бінарні порівняння значень функції приналежності $\mu_A(x_i)$ і $\mu_A(x_j)$ у вигляді матриці $A(n) = \|a_{ij}(n)\|$, де $n = 1,...N; i, j = 1,..., k$.

Потім в результаті усереднення матриць всіх експертів виходить матриця $A = \|a_{ij}\|$. Якщо отримана матриця є квадратної, то вирішуючи матричне рівняння

$$AX^T = \lambda X \qquad (5)$$

можна визначити власні числа λ матриці, як корені характеристичного рівняння

$$A - \lambda E = 0, \qquad (6)$$

де E – одинична матриця.

При цьому кожному власному числу λ буде відповідати власний вектор X. Якщо матриця A складається з елементів, які дорівнюють $a_{ij} > 0; a_{ji} = 1/a_{ij}; a_{ip} = a_{ij} a_{jp}$, де $i, j, p = 1,..., k$, (матриця є невід'ємною, зворотньосиметричною і узгодженою), то характеристичне рівняння має один корінь $\lambda = \lambda_{\max} = k$, при цьому єдиному корені відповідає єдиний власний вектор X.

У разі подання суб'єктивних суджень експертів у вигляді такої матриці, рішення матричного рівняння

$$AX^T = kX \qquad (7)$$

буде визначати власний вектор

$$X = \{\mu_A(x)/x\}, x \in X,$$

а числова міра розбіжності $\lambda_{\max} i k$ визначатиме числову міру узгодженості суджень експертів. Якщо

$$a_{i,j}^{(n)} = \mu_A(x_i)/\mu_A(x_j), a_{j,p}^{(n)} = 1/a_{i,j}^{(n)} \; i \; a_{i,p}^{(n)} = a_{i,j}^{(n)} a_{j,p}^{(n)},$$

то недіагональні значення матриці будуть $a_{i,j}^{(n)} > 0$, діагональні – $a_{i,i}^{(n)} = 1$, де $\mu_A(x_i), \mu_A(x_j)$ – судження експертів про функції приналежності; $i, j = 1,..., k$.

Також, якщо, то, а отже, відповідно до рівняння

$$A\mu^T = \lambda_{\max} - \mu \qquad (8)$$

можна сформувати вектор $\mu = \{\mu_A(x_j)\}$, $j = 1,..., k$, j = 1, ..., k, тому що $\mu_A(x_j) = 1/p_j$.

Оцінка швидкості процесу фотосинтезу

З використанням методу аналізу ієрархій [13], оцінимо швидкість процесу фотосинтезу при прийнятому рівні α. Для цього проведемо попарне порівняння важливості факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу $(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 \, i \, A_6)$, які представлені у вигляді інтервалів, де $k = 1,...,6$ (табл. 1). При цьому, якщо один фактор оцінюється в α раз вагоміше, ніж інший, то другий фактор оцінюється в $1/\alpha$ раз вагоміше, ніж перший, і т.д.

Результати бінарного порівняння факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу, отримані за результатами експертизи з використанням якісної дев'яти бальної шкали (другий рівень ієрархії), наведені в табл. 2. При складанні таблиці в якості експертів виступали автори роботи.

Коротко розглянемо доводи експертів при заповненні табл. 2, тобто при обґрунтуванні вагомості факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу при оцінці його швидкості.

Таблиця 2 – **Бінарне порівняння факторів впливу та індикаторів процесу фотосинтезу**

Фактори впливу та індикатори процесу фотосинтезу	A_1, лк	A_2, °C	A_3, %	A_4, %	A_5, 0.0 ... 1.0	A_6, 2.0 ... 3.0
A_1 – Інтенсивність світла, лк	1	1	7	5	1/5	1/3
A_2 – Температура, °C	1	1	7	7	1/5	1/3
A_3 – Концентрація вуглекислого газу, %	1/7	1/7	1	1	1/5	1/3
A_4 – Вологість повітря, %	1/5	1/7	1	1	1/5	1/3
A_5 – Індекс NDVI, 0.0 ... 1.0	5	5	5	5	1	1
A_6 – Фрактальна розмірність, 2.0 ... 3.0	3	3	3	3	1	1

Порівнюючи фактори впливу та індикатори самі з собою, їх вагомість рівна, тому в комірках $A_{11}, A_{22}, A_{33}, A_{44}, A_{55} \, i \, A_{66}$ табл. 2 ставиться число 1. Також в таблиці знаходяться фактори впливу та ін-

дикатори, які пов'язані між собою, і, на думку експертів, однаково впливають на оцінку швидкості процесу фотосинтезу, тому у відповідних комірках табл. 2 також ставиться 1. До таких факторів впливу відносяться: інтенсивність світла і температура (комірки $A_{12}\, i\, A_{21}$), що обумовлено фотохімічною і ферментною системами рослин, а також концентрація вуглекислого газу і вологість повітря (комірки $A_{34}\, i\, A_{43}$). Важливість індикаторів процесу фотосинтезу експерти також вважають пов'язаними між собою, і, на їхню думку, вони однаково характеризують процес фотосинтезу, тому у відповідних комірках табл. 2 (комірки $A_{56}\, i\, A_{65}$) також ставиться 1. Інші фактори, на думку експертів, в різному ступені (важливіше) впливають на оцінку швидкості процесу фотосинтезу.

При оцінці швидкості процесу фотосинтезу інтенсивність світла значно важливіше концентрації вуглекислого газу, тому що в реальних умовах концентрація вуглекислого газу в повітрі змінюється незначно, а освітленість може значно змінюватися в залежності від погодних умов і часу доби, тому в комірку A_{13} ставиться число 7, а в комірку A_{31} число $1/7$. Також інтенсивність світла просто важливіше вологості повітря, так як при хорошій освітленості процес фотосинтезу йде швидше, ніж при високій вологості, але слабкому освітленні. З урахуванням цього ставимо в комірку A_{14} число 5, а в комірку $A_{41} - 1/5$.

Крім того, при оцінці швидкості процесу фотосинтезу температура повітря значно важливіше таких факторів впливу, як концентрація вуглекислого газу і вологість (відповідно, ставимо числа 7 в комірках $A_{23}\, i\, A_{24}$, а числа $1/7$ в комірках $A_{32}\, i\, A_{42}$). Це обумовлено тим, що при високих температурах процес фотосинтезу збільшується, але у рослин при підвищенні температури вище 25 °С ефективність фотосинтезу перестає зростати, відбувається закривання пор, і рослина починає економити воду. Тому вологість повітря менш важлива, ніж температура. Закриття пор при збільшенні температури не дозволяє вуглекислому газу потрапити в зелені клітини рослини, тому його концентрація в рослині не змінюється і навіть зменшується, тобто при високій температурі спостерігається нестача вуглекислого газу.

Індикатори процесу фотосинтезу, отримані з використанням дистанційних засобів, на думку експертів, є важливішими при оцінці швидкості процесу фотосинтезу, ніж фактори впливу, хоча вони і дають лише відносні оцінки характеристик рослинності. Це обумовлено тим, що індикатори дозволяють оперативно отримувати оціночні значення процесу фотосинтезу і можуть одночасно охоплювати великі площі. Крім того, вони можуть бути отримані швидше і точніше, ніж фактори впливу. Однак, індикатори не значно важливіші від факторів впливу, так як при їх визначенні необхідне їх калібрування і врахування похибки через погодні умови, а також необхідне порівнювання отриманих результатів з даними тестових еталонних ділянок, які враховують сезонні еколого-кліматичні показники на момент отримання даних. Виходячи з цього, індекс NDVI просто важливіше всіх чотирьох факторів впливу (відповідно, ставимо числа 5 в комірках $A_{51}, A_{52,} A_{53}\, i\, A_{54}$, а числа $1/5$ в комірках $A_{15}, A_{25,} A_{35}\, i\, A_{45}$). У той же час фрактальна розмірність незначно важливіше просто важливіше всіх чотирьох факторів впливу (відповідно, ставимо числа 3 в комірках $A_{61}, A_{62,} A_{63}\, i\, A_{64}$, а числа $1/3$ в комірках $A_{16}, A_{26,} A_{36}\, i\, A_{46}$). Різниця важливості індикаторів над чотирма факторами впливу обумовлено, тим, що в даний час існують накопичені бази індексів NDVI для різних рослин, що розвиваються в різних умовах, чого поки немає для фрактальної розмірності.

Дані, наведені в табл. 2, можуть бути представлена у вигляді матриці $A = \|a_{ij}\|, \partial e\, i, j = 1,...,6$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 7 & 5 & 1/5 & 1/3 \\ 1 & 1 & 7 & 7 & 1/5 & 1/3 \\ 1/7 & 1/7 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 1/5 & 1/7 & 1 & 1 & 1/5 & 1/3 \\ 5 & 5 & 5 & 5 & 1 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

В результаті рішення матричного рівняння $A\mu^{\alpha T} = \lambda_{\max} - \mu^{\alpha}$ отримуємо власний вектор

$$\mu_i^{\alpha} = \{0.097;\ \ 0.097;\ \ 0.042;\ \ 0.045;\ \ 0.357;\ \ 0.3\}.$$

Нормований вектор

$$\mu_i^{n\nu,\alpha} = \mu_i^{\alpha} \Big/ \sum_{i=1}^{6} \mu_i^{\alpha} \qquad (9)$$

має вигляд

$$\mu_i^{n\nu,\alpha} = \{0.103;\ \ 0.103;\ \ 0.045;\ \ 0.048;\ \ 0.381;\ \ 0.320\}.$$

Результат $\mu_i^{n\nu,\alpha}$ відповідає прийнятому для всіх факторів впливу та індикаторів рівня α функцій приналежності.

Розглянемо бінарні відношення швидкостей процесу фотосинтезу, які складають зміст третього рівня ієрархії, з точки зору кожного, з перерахованих вище, чинників впливу і індикаторів. Такі шість матриць представлені у вигляді табл. 3. При складанні таблиці в якості експертів виступали автори роботи.

Коротко розглянемо доводи експертів при побудові матриць *V*1–*V*6, тобто при обґрунтуванні вагомості оцінки швидкості процесу фотосинтезу по кожному з шести факторів впливу та індикаторів. Бінарні порівняння на третьому рівні ієрархії експерти проводять, керуючись думкою: як окремо кожен фактор впливу і індикатор визначає оцінку швидкості процесу фотосинтезу. При цьому експерти також використовують дев'яти бальну шкалу, описану вище.

Таблиця 3 – **Бінарне порівняння швидкостей процесу фотосинтезу для всіх факторів впливу та індикаторів**

A_1	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	5	7
ПФ2	1/5	1	3
ПФ3	1/7	1/3	1
A_2	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	9	5
ПФ2	1/9	1	1/5
ПФ3	1/5	5	1
A_3	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	5	9
ПФ2	1/5	1	7
ПФ3	1/9	1/7	1
A_4	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	3	5
ПФ2	1/3	1	3
ПФ3	1/5	1/3	1
A_5	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	5	1
ПФ2	1/5	1	1/5
ПФ3	1	5	1
A_6	ПФ1	ПФ2	ПФ3
ПФ1	1	5	3
ПФ2	1/5	1	1/3
ПФ3	1/3	3	1

Швидкості процесів фотосинтезу при всіх факторах впливу і індикаторах, на думку експертів, в різній мірі важливі одна щодо іншої.

При аналізі першого фактору впливу (інтенсивність світла) експерти роблять висновок, що ПФ1 в різному ступені, але вагомішим, ніж ПФ2 і ПФ3, так як ПФ1 характеризується найбільшими значеннями інтенсивності світла, тому у відповідні комірки $V1_{12}\, i V1_{13}$ заносяться, відповідно, числа 5 і 7, а в комірки $V1_{21}\, i V1_{31}$ – числа $1/5 i 1/7$. Також ПФ2 за цим фактором має незначну важливість в порівнянні з ПФ3 через більше значення верхньої межі інтенсивності світла (ставимо число 3 в комірку $V1_{23}$ і число $1/3$ в комірку $V1_{32}$).

Так як швидкість процесу фотосинтезу в сильному ступені пов'язано з температурою (другий фактор впливу), але найбільш сприятливою для фотосинтезу вважають температуру 25 °С, то ПФ1 важливіше ПФ3 (ставимо число 5 в комірку $V2_{13}$ і число $1/5$ в комірку $V2_{31}$) і абсолютно важливіше ПФ2 (ставимо число 9 в комірку $V2_{12}$ і число $1/9$ в комірку $V2_{21}$). ПФ3 за цим фактором важливіше в порівнянні з ПФ2, через те, що процес фотосинтезу триває до температур 30-35 °С швидше, ніж при низьких температурах, тому в комірку $V2_{32}$ заносяться число 5, а в комірку $V2_{23}$ – число $1/5$.

Аналізуючи третій фактор впливу, можна сказати, що концентрація вуглекислого газу ПФ1 і ПФ2 в різному ступені, але вагомішим, ніж ПФ3, так як ефективність фотосинтезу у всіх видів рослин зростає з підвищенням концентрації вуглекислого газу до 0.5%, тому у відповідні комірки $V3_{13}\, i V3_{23}$ заносяться, відповідно, числа 9 і 7, а в комірки $V3_{31}\, i V3_{32}$ – числа $1/9 i 1/7$. При цьому ПФ1 за цим фактором важливіше в порівнянні з ПФ2 через великі значення концентрації вуглекислого газу (ставимо число 5 в комірку $V3_{12}$ і число $1/5$ в комірку $V3_{21}$). Також вологість повітря (четвертий фактор впливу) при ПФ1 і ПФ2 в різному ступені, але більш важливі, ніж ПФ3, і у відповідні комірки $V4_{13}\, i V4_{23}$, можна поставити числа 5 і 3, а в комірки $V4_{31}\, i V4_{32}$ – числа $1/5 i 1/3$. При порівнянні важливості ПФ1 і ПФ2 за цим фактором впливу, можна сказати, що ПФ1 незначно, але важливіше ПФ2 (число 3 в комірку $V4_{12}$ і число $1/3$ в комірку $V4_{21}$), через менше значення нижньої межі вологості ПФ2 в порівнянні з оптимально необхідною, яка становить 50%. У той же час, індекс NDVI (перший індикатор), на думку експертів, в однаковій мірі впливає на оцінку швидкості ПФ1 і ПФ3, тому у відповідних комірках $V5_{13}\, i V5_{31}$ ставиться 1. При цьому ПФ1 і ПФ3 за цим індексом однаково важливіші, ніж ПФ2 (ставимо число 5 в комірки $V5_{12}\, i V5_{32}$, а також число $1/5$ в комірки $V5_{21}\, i V5_{23}$). Фрактальна розмірність (другий індикатор) при оцінці швидкості ПФ1 в різному ступені, але вагомішим, ніж ПФ2 і ПФ3, так як ПФ1 характеризується найбільшими значеннями, тому у відповідні комірки $V6_{12}\, i V6_{13}$ заносяться, відповідно, числа 5 і 3, а в комірки $V6_{21}\, i V6_{31}$ – числа $1/5 i 1/3$. Також ПФ3 за цим фактором має незначну важливість в порівнянні з ПФ2 через більше значення верхньої межі величини фрактальної розмірності світла (ставимо число 3 в комірку $V6_{32}$ і число $1/3$ в комірку $V6_{23}$). Дані, наведені в табл. 3, можуть бути представлені у вигляді матриць $V_r = \|v_{ij}\|$, $r = 1,...,6; i, j = 1,...,3$

$$V1 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 7 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}, \quad V2 = \begin{pmatrix} 1 & 9 & 5 \\ 1/9 & 1 & 1/5 \\ 1/5 & 5 & 1 \end{pmatrix},$$

$$V3 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 9 \\ 1/5 & 1 & 7 \\ 1/9 & 1/7 & 1 \end{pmatrix}, \quad V4 = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{pmatrix},$$

$$V5 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1/5 \\ 1 & 5 & 1 \end{pmatrix}, \quad V6 = \begin{pmatrix} 1 & 5 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 3 & 1 \end{pmatrix}.$$

Нормовані власні вектори $\mu_i^{nv,\alpha}, i = 1,...,6$ відповідних матриць бінарного порівняння мають такий вигляд:

$$\mu_1^{nv,\alpha} = \{0.745;\quad 0.158;\quad 0.091\};$$
$$\mu_2^{nv,\alpha} = \{0.763;\quad 0.067;\quad 0.161\};$$
$$\mu_3^{nv,\alpha} = \{0.763;\quad 0.163;\quad 0.059\};$$
$$\mu_4^{nv,\alpha} = \{0.652;\quad 0.231;\quad 0.111\};$$
$$\mu_5^{nv,\alpha} = \{0.455;\quad 0.091;\quad 0.455\};$$
$$\mu_6^{nv,\alpha} = \{0.652;\quad 0.111;\quad 0.231\}.$$

Для підрахунку компоненти $\mu_k^{nv,\alpha}$ дані, отримані вище, зручно представити в такому вигляді:

$$\mu_i^{nv,\alpha} = \{0.103;\quad 0.103;\quad 0.045;\quad 0.048;\quad 0.381;\quad 0.320\};$$
$$\mu_{i,1}^{nv,\alpha} = \{0.745;\quad 0.763;\quad 0.763;\quad 0.652;\quad 0.455;\quad 0.652\};$$
$$\mu_{i,2}^{nv,\alpha} = \{0.158;\quad 0.067;\quad 0.163;\quad 0.231;\quad 0.091;\quad 0.111\};$$
$$\mu_{i,3}^{nv,\alpha} = \{0.091;\quad 0.161;\quad 0.059;\quad 0.111;\quad 0.455;\quad 0.231\}.$$

З метою отримання узагальнених показників про швидкість процесу фотосинтезу реалізується принцип синтезу, згідно якого компонента вектору пріоритетів процесу фотосинтезу визначається з використанням виразу:

$$\mu_k^{nv,\alpha} = \sum_{i=1}^{6} \mu_{i,k}^{nv,\alpha} \cdot \mu_i^{nv,\alpha}, k = 1,2,3, \qquad (10)$$

де $\mu_{i,k}^{nv,\alpha}$ – нормоване значення k-ої компоненти вектору пріоритету процесу фотосинтезу по і-му фактору впливу або індикатору, значення якого визначено α-рівневим чітким інтервалом функції приналежності; $\mu_i^{nv,\alpha}$ – нормоване значення і-ої компоненти вектору пріоритетів чинників впливу та індикаторів, за якими приймається рішення про швидкість процесу фотосинтезу, і значення яких визначено α-рівневим інтервалом. Вектор пріоритетів оцінки швидкості процесу фотосинтезу матиме вигляд:

$$\mu_{i,k}^{nv,\alpha} = \{0.603;\quad 0.112;\quad 0.281\}.$$

Висновки

Таким чином, слід прийняти рішення, що найвищу швидкість матиме процес фотосинтезу 1 з чисельними значеннями факторів впливу та індикаторів, наведеними в першому рядку табл. 1. Меншу швидкість матиме процес фотосинтезу 3, так як він має менше значення у векторі пріоритетів (чисельні значення факторів впливу і індикатори представлені, відповідно, в третьому рядку табл. 1). Найнижче значення швидкості отримано для процесу фотосинтезу 2 (другий рядок в табл. 1). Отримані результати можна поставити у відповідність до наведеної вище класифікації швидкості процесу фотосинтезу: процес 1 можна віднести до високої швидкості фотосинтезу, процес 3 може відповідати середній швидкості фотосинтезу, а процес 2 може характеризувати низьку швидкість фотосинтезу.

Список літератури

1. Мокроносов А.Т., Гавриленко В.Ф., Жигалова Т.В., Ермакова И.П. Фотосинтез. Физиолого-экологические и биохимические аспекты. Москва: Издательский центр «Академия», 2006. 448 с.
2. Елена Голец. Как влияют внешние факторы на процесс фотосинтеза. LibTime. URL: https://libtime.ru/agro/kak-vliyayut-vneshnie-faktory-na-process-fotosinteza.html.
3. Лебедев С.И. Физиология растений. Москва: Аропромиздат, 1988. 544 с.
4. Куценко Ю.Н., Речина О.Н. Анализ методов и устройств для измерений функций газообмена биологических объектов. *Вестник НГИЭИ*. Нижний Новгород: НГИЭИ, 2012. № 12(19). С. 116-122.
5. Якушев В.П., Дубенок Н.Н., Лупян Е.А. Опыт применения и перспективы развития технологий дистанционного зондирования Земли для сельского хозяйства. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. Москва: ИКИ РАН, 2019. Вип. 16(3). С. 11-23. DOI: https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
6. Капранова Н.Н. Комнатные растения в интерьере. Москва: МГУ, 1989. 190 с.
7. Черепанов С.А. Вегетационные индексы. *Геоматика*. Москва: Созвонд, 2011. Вип. 2. С. 98-102.
8. Сільське господарство. NDVI: Що потрібно знати фермеру для аналізу вегетації. Earth Observing System. URL: https://eos.com/ru/blog/ndvi-voprosy-i-otvety/.
9. Feder J. Fractals. New York: Springer US, 1988. 263 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6.
10. Марюшко М.В., Пащенко Р.Е. Фрактальний аналіз космічних знімків SENTINEL-2 для моніторингу сільськогосподарських культур. Радіоелектронні і комп'ютерні системи. 2020. № 4(96). С. 34-47. DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03.
11. Ягер Р.Р. Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения. Москва: Радио и связь, 1986. 405 с.
12. Бутенко О.С., Буряченко М.В., Весельская Л.С., Пащенко Р.Э. Определение характера (масштабов) паводковых наводнений при нечетком описании факторов влияния. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 8(115). С. 278-287.
13. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.

References

1. Mokronosov, A.T., Gavrilenko, V.F., Zhigalova, T.V. and Ermakova, I.P. (2006), *Fotosintez. Fiziologo-jekologicheskie i biohimicheskie aspekty* [Photosynthesis. Physiological, ecological and biochemical aspects], Akademija, Moskow, 448 p.
2. Golec, Elena (2021), *How external factors affect the process of photosynthesis*, LibTime, available at: https://libtime.ru/agro/kak-vliyayut-vneshnie-faktory-na-process-fotosinteza.html.
3. Lebedev, S.I. (1988), *Fiziologija rastenij*, Aropromizdat, Moskva, 544 p.
4. Kucenko, Ju.N. and Rechina, O.N. (2017), "Analiz metodov i ustrojstv dlja izmerenij funkcij gazoobmena biologicheskih obektov [Analysis methods and devices for measuring the gas exchange functions of biological objects]", *Vestnik NGIJeI*. NGIJeI, Nizhnij Novgorod, No. 12(19), pp. 116-122.
5. Jakushev, V.P., Dubenok, N.N. and Lupjan, E.A. (2019), "Opyt primenenija i perspektivy razvitija tehnologij distancionnogo zondirovanija Zemli dlja sel'skogo hozjajstva [Application experience and prospects for the development of Earth remote

sensing technologies for agriculture]", *Sovremennye problemy distancionnogo zondirovanija Zemli iz kosmosa*, Institut kosmicheskih issledovanij RAN, Moskva, No. 16(3), pp. 11-23, DOI: https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-11-23.
6. Kapranova, N.N. (1989), *Komnatnye rastenija v inter'ere* [Indoor plants in the interior], MGU, Moskow, 190 p.
7. Cherepanov, S.A. (2011), "Vegetation Indices", *Geomatics*, Sozvond, Moscow, No. 2, pp. 98-102.
8. (2021), Siljsjke ghospodarstvo, "NDVI: Shho potribno znaty fermeru dlja analizu veghetaciji [NDVI FAQ: All you need to know about index]". Earth Observing System, Available at: https://eos.com/ru/blog/ndvi-voprosy-i-otvety.
9. Feder, J. (1988), *Fractals*, Springer US, New York, 263 p., DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4899-2124-6.
10. Marjushko, M.V. and Pashhenko, R.E. (2020) "Fraktaljnyj analiz kosmichnykh znimkiv SENTINEL-2 dlja monitorynghu siljsjkoghospodarsjkykh kuljtur [Fractal analysis of Sentinel-2 satellite imagery for monitoring of agricultural crops]", / *Radioelektronni i komp'juterni systemy*, No. 4(96), pp. 34-47, DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2020.4.03.
11. Jager, R.R. (1986), *Nechetkie mnozhestva i teorija vozmozhnostej. Poslednie dostizhenija* [Fuzzy set and possibility theory. Recent developments], Radio i svjaz, Moskow, 405 p.
12. Butenko, O.S., Burjachenko, M.V., Vesel'skaja, L.S. and Pashhenko, R.Je. (2013), "Opredelenie haraktera (masshtabov) pavodkovyh navodnenij pri nechetkom opisanii faktorov vlijanija [Determination of the nature (scale) of flood floods with a fuzzy description of influencing factors]", *Systemy obrobky informaciji*, No. 8(115), pp. 278-287.
13. Saati, T. (1993) *Prinjatie reshenij. Metod analiza ierarhij* [Making decisions. Hierarchy analysis method], Radio i svjaz, Moskow, 278 p.

Received (Надійшла) 31.05.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Пащенко Руслан Едуардович – доктор технічних наук, професор, Інститут радіофізики та електроніки імені О.Я. Усикова НАН України, Харків, Україна;
Ruslan Pashchenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, O.Ya. Usikov Institute for Radiophysics and Electronics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkov, Ukraine;
e-mail: r.paschenko@i.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-6218-0324

Марюшко Максим В'ячеславович – асистент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна;
Maksym Mariushko – Teaching Assistant of Geoinformation Technologies and Space Monitoring of the Earth Department, National Aerospace University named after N.Ye. Zhukovskiy «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine;
e-mail: max.maryushko@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-3743-8535

Оценка скорости процесса фотосинтеза растений при нечетком описании факторов влияния и индикаторов

Р. Э. Пащенко, М. В. Марюшко

Аннотация. Предметом исследования является оценка скорости (интенсивности) процесса фотосинтеза сельскохозяйственных культур при нечетком описании внешних факторов влияния и специальных индикаторов. **Объектом исследования** является определение скорости (интенсивности) процесса фотосинтеза растений в заданный момент при известных факторах влияния и индикаторах процесса фотосинтеза, полученных с использованием дистанционных средств. **Цель работы** заключается в рассмотрении возможности применения теории нечетких множеств для решения задачи оценки скорости процесса фотосинтеза растений. **В результате исследования** было введено нечеткое описание факторов влияния и индикаторов процесса фотосинтеза растений. На основе такого описания разработан метод принятия решения о характере (скорости) процесса фотосинтеза с учетом индекса NDVI и фрактальной размерности. Приведены результаты определения скорости процесса фотосинтеза растений при трех различных наборах значений факторов влияния и индикаторов процесса фотосинтеза. **Выводы.** Показано, нечеткие значения факторов и индикаторов, которые влияют на оценку скорости процесса фотосинтеза растений.

Ключевые слова: фотосинтез; нечеткое описание; фактор влияния; индекс NDVI; фрактальная размерность.

Evaluation of the speed of the plant photosynthesis process with a fuzzy description of impact factors and indicators

Ruslan Pashchenko, Maksym Mariushko

Abstract. The subject of the study is evaluation of the speed (intensity) of the crop photosynthesis process with a fuzzy description of external impact factors and special indicators. **The object of the study** is to determine the speed (intensity) of the plant photosynthesis process at a given time with known impact factors and indicators of the photosynthesis process, obtained using remote sensing data. **The goal of this work** is to consider the possibility of applying fuzzy set theory to problem solving of evaluation the speed of the plant photosynthesis. **As a result of the study**, a fuzzy description of impact factors and indicators of the plant photosynthesis process was introduced. Based on this description, a method was developed to decide on the nature (speed) of the photosynthesis process taking into account NDVI and fractal dimension. The results of determining the speed of the plant photosynthesis process with three different values sets of impact factors and indicators of the photosynthesis process are presented. **Conclusions.** It is shown which fuzzy values of factors and indicators impact the evaluation of the speed of the plant photosynthesis process.

Keywords: photosynthesis; fuzzy description; influence factor; NDVI index; fractal dimension.

УДК 004.272.34 DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.06

О. Є. Федорович, Ю. Л. Прончаков, Ю. О. Лещенко, А. В. Єлізєва

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

ВИКОРИСТАННЯ КОМПОНЕНТНОГО МЕТОДУ В ЛОГІСТИЦІ ПОСТАЧАННЯ КОМПЛЕКТУЮЧИХ ВИСОКОТЕХНОЛОГІЧНОГО ВИРОБНИЦТВА

Анотація. У пропонованій публікації проводиться дослідження логістичних процесів у розподіленому виробництві високотехнологічної продукції машинобудування (авіабудування, суднобудування тощо). Для створення інноваційного виробу машинобудування системно представлена архітектура, яка у подальшому використовується в логістиці постачання, виробництва та збуту продукції. Використовується компонентний підхід при формуванні архітектури складного виробу, який дозволяє представити окремі складові виробу у вигляді відносно ізольованих елементів, що спрощує процес проектування та виробництва складної техніки. **Актуальність теми публікації** пов'язана з дослідженням логістичних процесів, при створенні складного виробу, на основі компонентної архітектури. **Метою дослідження є** підвищення ефективності логістичних процесів розподіленого виробництва на основі використання компонентної архітектури високотехнологічного виробу. Дослідження проводиться у два етапи. На першому етапі формується множина постачальників продукції з урахуванням логістичних витрат, пов'язаних з виробництвом та доставкою комплектуючих (компонент) у виробничу систему складального типу. На другому етапі, з урахуванням різнорідної транспортної системи (авіаційний, залізничний, автомобільний та інші види транспорту), здійснюється вибір транспортних магістралей з можливими перевалками вантажів. Проводиться оптимізація для раціонального вибору транспортних магістралей, з урахуванням логістичних витрат, часу доставки вантажів та ризиків. На останньому етапі дослідження створена модель динамічних процесів логістики постачання у складальне виробництво. Проводиться імітаційне моделювання руху заявок (вантажів) у різнорідній транспортній системі, засноване на хвилеобразному русі заявок, яке дозволяє мінімізувати час доставки комплектуючих, витрати та ризики. **Використані математичні методи:** системний аналіз, для представлення структури складного виробу; компонентний підхід, для формування багаторівневої архітектури виробу; цілочисельна оптимізація, логістичних витрат; імітаційне подійне моделювання, за допомогою агентів, для вибору раціональних маршрутів поставки комплектуючих. **Запропонований підхід дозволяє** системно дослідити та оптимізувати логістичні процеси постачання розподіленого виробництва на основі компонентної архітектури складного виробу машинобудування.

Ключові слова: компонентна архітектура; логістика постачання; розподілене виробництво; оптимізація логістичних витрат; агентне моделювання.

Вступ

Розподілена виробнича система, яка виникла в умовах глобалізації, є основою сучасного виробництва високотехнологічної продукції в авіабудуванні, суднобудуванні тощо [1]. Розподіленість виробництва призводить до збільшення логістичних операцій, пов'язаних з транспортуванням та складуванням [2]. Це приводить до економічних витрат, пов'язаних з виконанням допоміжних операцій, які обслуговують основні технологічні процеси [3].

Сучасні підходи до створення високотехнологічної продукції, засновані на архітектурному представленні складного виробу у вигляді множини відносно ізольованих та пов'язаних між собою компонент [4]. При цьому архітектура виробу представляє собою деревовидну структуру, яка складається з компонентів різних рівнів, які для свого виготовлення вимагають формування логістичних ланцюжків постачання комплектуючих. Тому актуальна тема цієї публікації, в якій представлено результати дослідження логістики постачання комплектуючих (компонент) у виробництво складного виробу.

Постановка задачі дослідження

У багаторівневій архітектурі високотехнологічного виробу можна відокремити такі види компонент:

- компоненти першого типу, які вироблені та вимагають доставку у виробничу систему;
- компоненти другого типу, які повинні бути вироблені та після цього доставлені у виробництво;
- компоненти третього типу, які повинні пройти повний цикл створення (проектування, виробництво, збут) і тільки після цього доставлені у виробничу систему.

Відокремлені типи компонент пов'язані з різними значеннями витрат на виготовлення (W), строком випуску (T) комплектуючих та ризиком (R) [5]. Мінімальні значення показників W, T, R, пов'язані з першим типом компонент, а максимальні значення – з третім типом компонент. Вироби, які вироблені здебільшого з першого типу компонент, пов'язані з тривалим строком виробництва, впродовж якого, відбувається падіння попиту та виникають складності з реалізацією продукції [6]. Виріб, який було створено за допомогою компонент третього типу, має підвищену конкурентоздатність, затребуваний на ринку високотехнологічної продукції, але потребує достатньо великих витрат та час на виготовлення, що пов'язано з інноваційністю та підвищеним ризиком створення. Компромісним рішенням є створення складного виробу, засноване на раціональному виборі складу компонент для формування архітектури виробу та його використання у логістиці створення складної техніки.

Представимо компонентну архітектуру складного виробу, який створюється, у багаторівневому вигляді (рис. 1). Верхній рівень пов'язаний зі збіркою

 © Федорович О. Є., Прончаков Ю. Л., Лещенко Ю. О., Єлізєва А. В., 2021

складного виробу із підзбірок сусіднього нижнього рівня архітектури. Середні рівні, пов'язані з підзбірками, які формуються з підзбірок нижніх рівнів. На рис. 1 (з права) наведена структура логістики виробництва компонент, з урахуванням багаторівневої архітектури виробу. Після закінчення виробництва комплектуючих (компонент), здійснюється їх транспортування у складальне виробництво. При цьому перший тип компонент, які постачаються, відповідає поставці виготовлених компонент (які є на складі), другий – виробництву та поставці, третій – проектуванню, виробництву та поставці компонент.

У зв'язку зі складністю задачі, що розглядається, її рішення вимагає виконання наступних етапів:

1. Визначення множини постачальників комплектуючих (компонент) складного виробу.

2. Маршрутизація постачання комплектуючих виробу за допомогою транспортної системи перевезень.

Рішення задачі дослідження

З урахуванням відокремлених типів компонент складного виробу, представимо логістичні показники, пов'язані з поставками комплектуючих у вигляді:

w_{ija} – витрати, пов'язані з поставкою j-ї компоненти першого типу для i-го рівня збірки складного виробу a-м можливим постачальником;

w_{ikb} – витрати, пов'язані з виробництвом та поставкою k-ї компоненти другого типу для i-го рівня збірки складного виробу b-м можливим постачальником;

w_{iec} – витрати, пов'язані з проектуванням, виробництвом та постачанням e-ї компоненти третього типу для i-го рівня збірки складного виробу c-м можливим постачальником;

t_{ija} – строки, пов'язані з поставкою j-ї компоненти першого типу для i-го рівня збірки складного виробу a-м постачальником;

t_{ikb} – строки, пов'язані з поставкою k-ї компоненти другого типу для i-го рівня збірки складного виробу b-м постачальником;

t_{iec} – строки, пов'язані з поставкою e-ї компоненти третього типу для i-го рівня збірки складного виробу c-м постачальником;

r_{ija} – ризик поставки j-ї компоненти першого типу для i-го рівня збірки складного виробу a-м постачальником;

r_{ikb} – ризик поставки k-ї компоненти другого типу для i-го рівня збірки складного виробу b-м постачальником;

r_{iec} – ризик поставки e-ї компоненти третього типу для i-го рівня збірки складного виробу c-м постачальником.

Показники витрат, строків та ризиків, пов'язаних з постачанням комплектуючих (компонент) для виробництва складного виробу будуть мати наступний вигляд:

$$W = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} w_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} w_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} w_{iec}x_{iec}; \quad (1)$$

$$T = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} t_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} t_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} t_{iec}x_{iec}; \quad (2)$$

$$R = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} r_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} r_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} r_{iec}x_{iec}, \quad (3)$$

тут N – кількість рівнів представлення компонентів для складального виробництва складного виробу;

n_i – кількість компонент першого типу на i-му рівні складання складного виробу;

m_i – кількість компонент другого типу на i-му рівні складання складного виробу;

l_i – кількість компонент третього типу на i-му рівні складання складного виробу;

n_j – кількість можливих постачальників j-ї компоненти першого типу для i-го рівня складання складного виробу;

m_k – кількість можливих постачальників k-ї компоненти другого типу для i-го рівня складання складного виробу;

l_e – кількість можливих постачальників e-ї компоненти третього типу для i-го рівня складання складного виробу;

x_{ija}, x_{ikb}, x_{iec} – булеві змінні,

$$x_{ija} = \begin{cases} 1 - \text{якщо для поставки компоненти } j \\ \quad \text{першого типу для рівня } i \text{ складання} \\ \quad \text{виробу використовувався постачальник } a, \\ 0 - \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

$$x_{ikb} = \begin{cases} 1 - \text{якщо для поставки компоненти } k \\ \quad \text{другого типу для рівня } i \text{ складання} \\ \quad \text{виробу використовувався постачальник } b, \\ 0 - \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

$$x_{iec} = \begin{cases} 1 - \text{якщо для поставки компоненти } e \\ \quad \text{третього типу для рівня } i \text{ складання} \\ \quad \text{виробу використовувався постачальник } c, \\ 0 - \text{в іншому випадку,} \end{cases}$$

при цьому $\sum_{a=1}^{n_j} x_{ija} = 1$, $\sum_{b=1}^{m_k} x_{ikb} = 1$, $\sum_{c=1}^{l_e} x_{iec} = 1$.

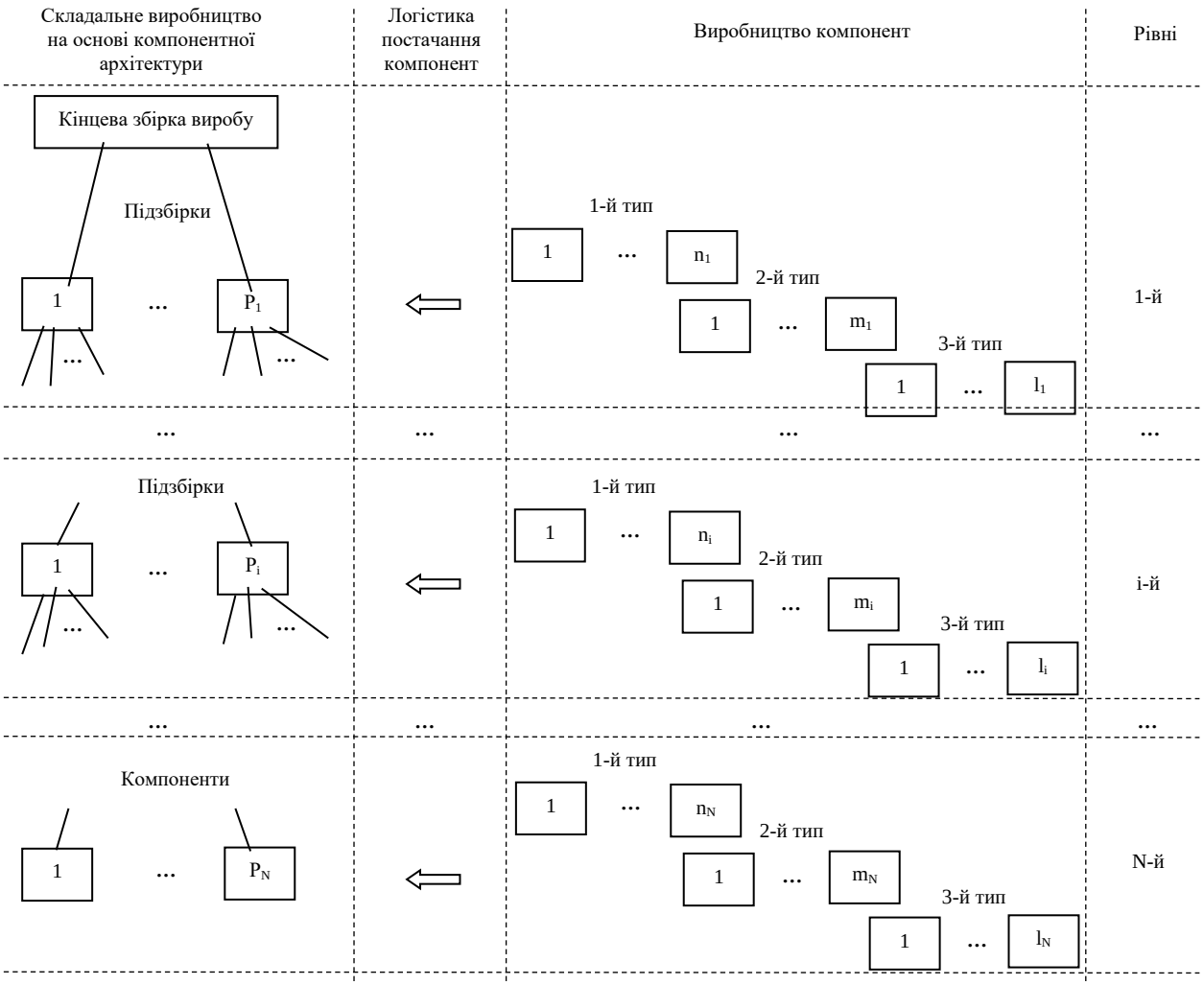


Рис. 1. Багаторівневе компонентне представлення логістики постачання та виробництва складної техніки (**Fig. 1.** Multilevel component representation of supply logistics and production of complex equipment)

Задачу вибору постачальників сформуємо у термінах цілочисельного (булевого) програмування.

Необхідно мінімізувати основні показники *W, T, R* з урахуванням обмежень у вигляді допустимих логістичних витрат – W', строків поставок – T', ризиків – R'. В якості прикладу, розглянемо мінімізацію показника витрат:

$$\min W, W = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} w_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} w_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} w_{iec}x_{iec}; \quad (4)$$

з урахуванням виконання обмежень:

$$T \le T', T = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} t_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} t_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} t_{iec}x_{iec}; \quad (5)$$

$$R \le R', R = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{n_i}\sum_{a=1}^{n_j} r_{ija}x_{ija} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{m_i}\sum_{b=1}^{m_k} r_{ikb}x_{ikb} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{e=1}^{l_i}\sum_{c=1}^{l_e} r_{iec}x_{iec}. \quad (6)$$

Пошук компромісного рішення для показників *W, T, R* зводиться до мінімізації комплексного критерія *Q*, який можна представити у вигляді простої адитивної згортки:

$$Q = \alpha_W \cdot W + \alpha_T \cdot T + \alpha_R \cdot R, \quad (7)$$

де $\alpha_W, \cdot\alpha_T, \alpha_R$ – «ваги» (значимість) показників, які отримуються за допомогою оцінок експертів:

$$\alpha_W + \alpha_T + \alpha_R = 1,$$

$$W = \frac{W - W^*}{W' - W^*}, \quad T = \frac{T - T^*}{T' - T^*}, \quad R = \frac{R - R^*}{R' - R^*}, \quad (8)$$

тут W^*, T^*, R^* – мінімальні значення показників, отримані у результаті їх незалежної оптимізації з урахуванням обмежень W', T', R'. Необхідно знайти мінімум значення показника *Q*:

$$\min Q, Q = \alpha_W \cdot W + \alpha_T \cdot T + \alpha_R \cdot R.$$

Рішення задачі, пов'язаної з маршрутизацією постачання комплектуючих у складальне виробництт-

во, складається з наступних підзадач: вибір транспортних магістралей для доставки комплектуючих; визначення оптимальних маршрутів постачання комплектуючих. Доставка промислових вантажів здійснюється різними типами транспортних магістралей (авіаційний, автомобільний, залізничний, морський тощо). Наявність розгалужених транспортних магістралей дозволяє використовувати змішані транспортні системи для доставки вантажів. Наприклад, транспортування комплектуючих здійснюється за логістичним ланцюгом: автомобільний → авіаційний → залізничний → автомобільний види транспорту. Вибір транспортної магістралі повинен здійснюватися з урахуванням логістичних витрат (*W*), строків доставки комплектуючих (*T*), ризиків доставки (*R*).

Рішення першої задачі дозволило визначити усіх постачальників комплектуючих (компонент) для кожного *i*-го рівня складання складного виробу у виробничій системі. Введемо представлення показників *W, T, R* для окремих *j*-х компонент (комплектуючих), які постачаються за допомогою транспортної мережі p-го типу у виробничу систему, для складання складного виробу, на *i*-му рівні у вигляді: $w_{ijp}, t_{ijp}, r_{ijp}$. Тоді:

$$W = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} w_{ijp} x_{ijp}, \quad (9)$$

$$T = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} t_{ijp} x_{ijp}, \quad R = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} r_{ijp} x_{ijp}, \quad (10)$$

де d_i – кількість *j*-х компонент *i*-го рівня складання виробу; s_j – кількість можливих типів транспортних систем, які використовуються для доставки *j*-ї компоненти (у тому числі транспортні системи змішаного типу), x_{ijp} – булева змінна, що дорівнює 1, якщо обрано *p*-й тип транспорту для доставки *j*-ої компоненти у виробничу систему для *i*-го рівня складання виробу. При цьому $\sum_{p=1}^{s_j} x_{ijp} = 1$.

В якості прикладу, розглянемо вибір транспортних магістралей з урахуванням мінімізації логістичних витрат (*W*). Необхідно:

$$\min W, W = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} w_{ijp} x_{ijp}. \quad (11)$$

З урахуванням обмежень:

$$T \le T', T = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} t_{ijp} x_{ijp}, \quad (12)$$

$$R \le R', R = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{d_i} \sum_{p=1}^{s_j} r_{ijp} x_{ijp}, \quad (13)$$

де T', R' – допустимі строки доставки комплектуючих та виникаючих при цьому ризиків.

Можлива багатокритеріальна постановка задачі, яка має аналогічний вигляд, як при рішенні першої задачі дослідження.

Для визначення оптимального маршруту поставки компонент (комплектуючих) у виробничу складальну систему, скористаємося розробленим авторами публікації оригінальним методом маршрутизації, заснованим на хвильовому розповсюдженні заявок від початкового джерела до кінцевого стоку. У алгоритмі, на початку, здійснюється розповсюдження заявок (вантажів) від початкового вузла (постачальника комплектуючих) до всіх найближчих транспортних вузлів різнорідної транспортної системи. При цьому виникають часові затримки, пов'язані з транспортуванням вантажів. Далі, з кожного наступного транспортного вузла, шляхом розмноження (клонування) заявок, що надійшли, розповсюджуються «хвилі» заявок до всіх найближчих транспортних вузлів. У випадку, якщо заявка приходить до вузла, через який вже пройшла заявка (або клон), то вона відкидається (знищується), як не перспективна з точки зору, наприклад, часу руху вантажу. Зрештою, у складальне виробництво складного виробу приходить заявка, маршрут якої відповідає мінімальному часу руху. У випадку переходу заявки (вантажу) з однієї транспортної системи на іншу, виникає додаткова затримка, пов'язана з перевалкою вантажу з одного виду транспорту на інший. Реалізація запропонованого методу здійснена за допомогою агентного представлення імітаційного подійного моделювання (платформа JADE) [7].

В імітаційній моделі використовується такі агенти: «Джерело», з якого починається рух заявки; «Стік», пов'язаний з і-м рівнем складання у виробничій системі, куди рухається j-а компонента виробу; «Транспортна система» (ТС) представлена у вигляді пов'язаного графу з транспортними вузлами та ділянками магістралі, які їх з'єднують; «Затримка на ділянці ТС», пов'язана з рухом вантажа по ділянці магістралі ТС; «Затримка на вузлі ТС», пов'язана з затримкою для проміжного зберігання вантажу; «Перевалка», використовується у випадку переходу з транспортної системи одного типу до іншого; «Монітор» служить для планування подій, пов'язаних з рухом вантажів. Запускає інші агенти системи; «Результати». Здійснюється видача результатів моделювання у вигляді маршрутів руху вантажів (комплектуючих) в ТС.

На рис. 2 представлена структурна схема агентної моделі.

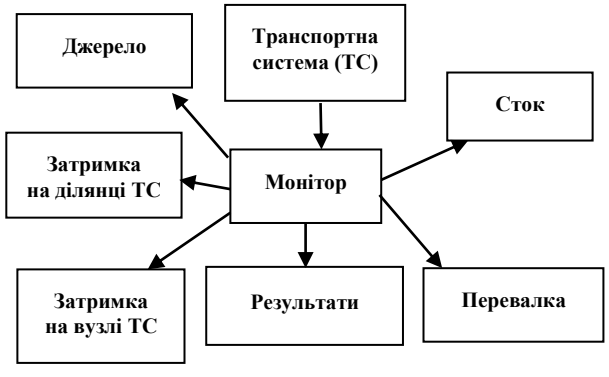


Рис. 2. Структурна схема агентної моделі
(**Fig. 2.** Block diagram of the model based on agents)

Висновки

Проведене дослідження логістики постачання у розподіленому виробництві високотехнологічної продукції. При створенні складного виробу використовується компонентна архітектура, яка представлена у складальних процесах виробництва складної техніки (збірки, підзбірки тощо). Відокремлені типи компонент, які впливають на витрати, час постачання та ризики, пов'язані з логістикою виробництва та доставкою комплектуючих (компонент) у складальне виробництво. Вирішено задачу вибору множини постачальників комплектуючих з використанням цілочисельного (булевого) програмування. Враховуючи розгалуженість транспортних систем та їх різнорідність для мультимодальних перевезень вантажів, вирішено задачу визначення множини магістралей для доставки комплектуючих. Для формування маршруту руху комплектуючих у виробничу систему, запропоновано оригінальний алгоритм, заснований на «хвильовому» русі заявок (вантажів) у різнорідній транспортній мережі.

Наукова новизна дослідження, пов'язана з розробкою нового методу у логістиці постачання розподіленого виробництва, заснованого на компонентній архітектурі високотехнологічної продукції машинобудування.

Запропонований підхід доцільно використовувати на початковому етапі створення нової інноваційної техніки, коли необхідно враховувати логістику розподіленого виробництва, витрати, час доставки комплектуючих та супутні при цьому ризики.

Список літератури

1. Lindgren, M. Scenario Planning The link between future and strategy / M. Lindgren, H. Bandhold. *Palgrave Macmillan UK*. 2002. – 180 p. DOI: http://dx.doi.org/ 10.1057/9780230511620.
2. Федорович, О.Є. Метод формування логістичних транспортних взаємодій для нового портфелю замовлень розподіленого віртуального виробництва / О.Є. Федорович, Ю.Л. Прончаков // *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*, 2020, №2(94), С. 102 – 108. DOI: http://dx.doi.org/10.32620/reks.2020.2.09
3. Uskenbayeva, R. K. Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process / R. K. Uskenbayeva, B. K. Kurmangaliyeva, D. Yedilkhan // 54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), 2015. – Hangzhou; China, – P. 292 – 297. DOI: http://dx.doi.org/10.1109/SICE.2015.7285573.
4. Fedorovich, O. Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise / O. Fedorovich, O. Uruskiy, Yu. Pronchakov, M. Lukhanin // Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 2021. – No. 1 (97). – P. 150 – 157. DOI: http://dx.doi.org/ 10.32620/reks.2021.1.13
5. Paulsen, S. Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management / S. Paulsen, J. Boens. – National Institute of Standarts and Technology, 2012, – 21 p.
6. Pawluczuk, Ju. К проблеме управления производственными ресурсами предприятия / Ju. Pawluczuk // Zarządzanie: Teoria i praktyka, 2011. – № 1(3). – С. 17 – 26.
7. Кравець, Р. О. Динамічна координація стратегій мультіагентних систем / Р. О. Кравець // Бюлетень Національного університету «Львівська політехніка», 2011. – No. 699. – P. 134 – 144.

References

1. Lindgren, M., Bandhold H. (2002) Scenario Planning The link between future and strategy. Palgrave Macmillan UK, 180 p. DOI: http://dx.doi.org/ 10.1057/9780230511620.
2. Fedorovich, O. E., Pronchakov, Yu. L. (2021) Metod formuvannya lohistychnykh transportnykh vza-yemodiy dlya novoho portfelyu zamovlen′ rozpodileno-ho virtual′noho vyrobnytstva [Method of formation of logistic transport interactions for a new portfolio of orders of distributed virtual production]. *Radioelektronni i komp'yuterni systemy - Radio electronic and computer systems*, 2020, no. 2(94), pp. 102-108. DOI: http://dx.doi.org/10.32620/reks.2020.2.09.
3. Uskenbayeva, R., Kurmangaliyeva, B., Yedilkhan, D. (2015) Situational Management for Process Implementation of Working Operations of the Business Process. *54th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Hangzhou, China, pp. 292-297. DOI: http://dx.doi.org/ 10.1109/SICE.2015.7285573.
4. Fedorovich O., Uruskiy O., Pronchakov Yu., Lukhanin M. (2021) "Method and information technology to research the component architecture of products to justify investments of high-tech enterprise", *Radio electronic and computer systems*, 2021, no. 1 (97), pp. 150-157. DOI: http://dx.doi.org/ 10.32620/reks.2021.1.13
5. Paulsen, S., Boens, J. (2012) "Summary of the Workshop on information and communication technologies supply chain risk management", *National Institute of Standarts and Technology*, 2012. – 21 p.
6. Pawluczuk, Ju. (2011) K probleme upravleniya proizvodstvennymi resursami predpriyatiya [Problemy zarządzania zasobami produkcyjnymi przedsiębiorstwa]. *Zarządzanie : Teoria i praktyka*, 2011, no. 1 (3), pp. 17-26.
7. Kravets, P. O. (2021) "Dynamic coordination of multi-agent systems strategies". *Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*, no. 699, pp. 134-144.

Received (Надійшла) 11.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

About the authors / Відомості про авторів

Федорович Олег Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Oleg Fedorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Science and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: o.fedorovych@khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-7883-1144.

Прончаков Юрій Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, декан факультету програмної інженерії та бізнесу, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;

Yurii Pronchakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Dean of the Software Engineering and Business Faculty, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: pronchakov@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0027-1452.

Лещенко Юлія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Yuliia Leshchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer Sciences and Information Technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"; Kharkiv, Ukraine,
e-mail: j.leshhenko@khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-9232-697X.

Єлізєва Аліна Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Alina Yelizieva – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Computer science and information technologies, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.elizeva@khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8228-9383.

Использование компонентного метода в логистике поставок комплектующих высокотехнологичного производства

О. Е. Федорович, Ю. Л. Прончаков, Ю. А. Лещенко, А. В. Елизева

Аннотация. В предлагаемой публикации проводится исследование логистических процессов в распределенном производстве высокотехнологичной продукции машиностроения (авиастроение, судостроение и т.д.). Для создания инновационного изделия машиностроения системно представлена архитектура, которая в дальнейшем используется в логистике снабжения, производства и сбыта продукции. Используется компонентный подход при формировании архитектуры сложного изделия, которой позволяет представить отдельные составляющие изделия в виде относительно изолированных элементов, что упрощает процесс проектирования и производства сложной техники. **Актуальность темы** публикации связана с исследованием логистических процессов, при создании сложного изделия, на основе компонентной архитектуры. **Целью** исследования является повышение эффективности логистических процессов распределенного производства на основе использования компонентной архитектуры высокотехнологичного изделия. Исследование проводится в два этапа. На первом этапе формируется множество поставщиков продукции с учетом логистических расходов, связанных с производством и доставкой комплектующих (компонент) в производственную систему сборочного типа. На втором этапе, с учетом разнородной транспортной системы (авиационный, железнодорожный, автомобильный и другие виды транспорта), осуществляется выбор транспортных магистралей с возможными перевалками грузов. Проводится оптимизация для рационального выбора транспортных магистралей, с учетом логистических затрат, времени доставки грузов и рисков. На последнем этапе исследования создана модель динамических процессов логистики поставок в сборочное производство. Проводится имитационное моделирование движения заявок (грузов) в разнородной транспортной системе, основанное на волнообразном движении заявок, которое позволяет минимизировать время доставки комплектующих, расходы и риски. **Использованы математические методы:** системный анализ для представления структуры сложного изделия; компонентный подход для формирования многоуровневой архитектуры изделия; целочисленная оптимизация логистических затрат; имитационное событийное моделирование, с помощью агентов, для выбора рациональных маршрутов поставки комплектующих. **Предложенный подход позволяет** системно исследовать и оптимизировать логистические процессы снабжения распределенного производства на основе компонентной архитектуры сложного изделия машиностроения.

Ключевые слова: компонентная архитектура; логистика снабжения; распределенное производство; оптимизация логистических затрат; агентное моделирование.

Using of the component method in logistics of supplies of high-tech production components

Oleg Fedorovich, Yurii Pronchakov, Yuliia Leshchenko, Alina Yelizieva

Abstract. In this paper the research of logistics processes in the distributed manufacture of high-tech engineering products (aircraft construction, shipbuilding, etc.) is carried out. The architecture is systematically presented for creation of innovative engineering product, which is further used in the logistics of supply, production and sales of products. For the formation of the architecture of a complex product the component approach is used, which makes it possible to represent individual components of a product in the form of relatively isolated elements, which simplifies the design and production of complex technique. **The topicality of this paper** is associated with the research of logistics processes in creating a complex product based on component architecture. **The purpose of the research** is improving of the logistics processes efficiency in distributed manufacture based on the using of the component architecture of a high-tech product. The research is carried out in two stages. At the first stage the set of suppliers of products are formed taking into account the logistics costs associated with the production and delivery of components to an assembly type production system. At the second stage the choice of transport routes with possible transshipment of goods is carried out taking into account the dissimilar transport system (aviation, rail, road and other types of transport). Optimization is carried out for the rational choice of transport routes taking into account logistics costs, delivery time and risks. At the last stage of the research the model of dynamic processes of logistics of supplies into assembly production was created. Simulation of the movement of requests (cargo) in a dissimilar transport system is carried out, which is based on the wave-like movement of applications and allows minimizing the delivery time of components, costs and risks. **Mathematical methods were used:** system analysis to represent the structure of a complex product; component approach for the formation of multilevel product architecture; integer optimization of logistics costs; event-based and agent-based simulation to select rational routes for the supply of components. **The proposed approach allows** you to research systematically and optimize the logistics processes of distributed manufacture supplying based on the component architecture of a complex engineering product.

Keywords: component architecture; logistics of supplies; distributed manufacture; optimization of logistics costs; agent-based modeling.

УДК 004.78;519.816 DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.07

І. В. Шостак[1], С. Г. Кривова[2], О. Є. Зубаньов[3]

[1] Національний аерокосмічний університет імені М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна
[2] Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
[3] АТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології», Київ, Україна

ІНФОРМАЦІЙНЕ ПІДТРИМУВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОВЕДЕННЯ ПЕРЕГОВОРІВ НА ЕТАПІ ІНІЦІАЦІЇ ПРОЄКТІВ КООПЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА В ЛІТАКОБУДУВАННІ

Анотація. Розглянуто особливості проведення першої стадії (ініціації) переговорів по організації кооперaційного виробництва повітряних суден. Показано, що цій стадії притаманний неприпустимо високий рівень ризиків, обумовлений, з одного боку, ймовірністю значних додаткових фінансових витрат в ході реалізації проєкту, а з іншого - втрати потенційних кооперантів, в разі недосягнення консенсусу між учасниками переговорів. Проведено критичний огляд існуючих комп'ютеризованих систем підтримування переговорів. Зроблено висновок про існування проблеми, що полягає у недостатній ефективності переговорного процесу на етапі ініціації проєктів кооперaційного виробництва повітряних суден внаслідок, в тому числі, й відсутності спеціалізованих комп'ютерних засобів інформаційного підтримування, які при формуванні відповідних рішень, надавали б змогу врахувати специфіку як самого етапу ініціації проєктів, так і предметної області «Кооперaційне виробництво в літакобудуванні». Виходячи із особливостей зазначеної проблеми, сформульовано мету статті, а саме розроблення ефективних засобів інформаційного підтримування переговорів про кооперaційне виробництво на початковому етапі (ініціації), що забезпечать економію фінансів по-перше, за рахунок скорочення термінів переговорів, а по-друге - зниження ймовірності прийняття нераціональних рішень, що призводять до додаткових витрат під час реалізації проєкту. Виходячи зі специфіки предметної області, зроблено висновок про необхідність розробки проблемно-орієнтованих методичних засобів, а на їх основі - спеціалізованої програмної системи підтримки прийняття рішень (СППР) переговірників при ініціації проєктів кооперaційного виробництва в літакобудуванні. Як формальну основу для побудови таких систем запропоновано використати агентний підхід з елементами теорії ситуаційного управління. Результати дослідження проілюстровані з використанням умовних сценаріїв.

Ключові слова: літакобудування; кооперaційне виробництво; ініціація проєкту; система підтримки прийняття рішень; програмні агенти; агентний підхід; ситуаційне управління; когнітивна карта.

Вступ

Виробнича кооперація на загальносвітовому, міждержавному, національному та корпоративному рівнях є сталим трендом у розвитку різних галузей промисловості. Зазначена тенденція має місце і в літакобудуванні, зокрема, й у вітчизняному, оскільки накопичений технологічний і виробничий потенціал українських літакобудівних підприємств, дає їм можливість виступати в проєктах кооперaційного виробництва у будь-якій ролі (власника сертифіката типу, головного виробника, субпідрядника). Однією з ключових особливостей переговорів про організацію кооперaційного виробництва в авіабудуванні є підвищені вимоги до якості реалізації групи процесів, пов'язаних з ініціацією проєкту [1], оскільки ці процеси багато в чому визначають успішність кооперaційного виробництва, а витрати на виправлення неправильних рішень, ухвалених на цьому етапі, будуть зростати в ході реалізації проєкту, та можуть в результаті досягти неприпустимо високих значень.

Дане дослідження присвячене питанням формування методичного інструментарію, який адекватно відображав би специфіку предметної області «Кооперaційне виробництво в літакобудуванні», давав би можливість зниження невизначеності в ході формування відповідних рішень, до прийнятного рівня.

Формулювання наукової проблеми і її значення. Проблема недостатньої ефективності переговорного процесу на етапі ініціації проєктів кооперaційного виробництва повітряних суден виникає внаслідок, в тому числі, й відсутності спеціалізованих комп'ютерних засобів інформаційного підтримування, які при формуванні відповідних рішень, надавали б змогу врахувати специфіку як самого етапу ініціації проєктів, так і предметної області «Кооперaційне виробництво в літакобудуванні».

Рішення зазначеної проблеми шляхом створення і застосування ефективних засобів інформаційного підтримування переговорів про кооперaційне виробництво на початковому етапі (ініціації) забезпечить економію фінансів по-перше, за рахунок скорочення термінів переговорів, а по-друге, внаслідок зниження ймовірності прийняття нераціональних рішень, що призводять до додаткових витрат під час реалізації проєкту.

Аналіз публікацій по заявленій проблемі. З позицій ситуаційного аналізу [2], переговори по організації кооперaційного виробництва (ПОКВ) представляють собою процес обміну думками з метою досягнення угоди щодо взаємовигідної співпраці. У ситуаційному аналізі прийнято відносити предмет переговорів, його учасників, їх позиції і дії до об'єктивних характеристик, а мотиви, цілі, переваги, думки, оцінки й аргументи сторін - до суб'єктивних.

Головною відмінною рисою ПОКВ від інших видів переговорів є наявність не менше двох сторін-учасниць з цілями, що частково не збігаються, особистими інтересами, думками і намірами. Це часткова розбіжність є, по суті, конфліктом. Інша особливість процесу ПОКВ полягає у тому, що вони завжди відбуваються, відповідно до класифікації

 © Шостак І. В., Кривова С. Г., Зубаньов О. Є., 2021

середовищ проведення переговорів по Д.О. Поспєлову [2], у найскладнішому, трансформованому середовищі, для якого проблематично не лише створення детермінованого опису всього процесу, а й локальних моделей переговорів. При цьому характеристики трансформованого середовища нестійкі і сильно залежать від дій агентів-учасників. Друга із зазначених особливостей визначає доцільність застосування в ході аналізу ПОКВ інструментарію конфліктного менеджменту.

У відповідності до схеми Томаса-Кіллменна [3], з п'яти відомих стилів ведення переговорів, для ПОКВ характерні три: співпраці; пристосування; гібридного компромісу. Зазначені стилі організації ПОКВ органічно поєднуються з підходом, при якому учасники переговорів розглядаються як соціальні агенти, які володіють відповідними поведінковими рисами [4]. Застосування такого підходу при створенні комп'ютерних засобів інформаційного підтримування ПОКВ дасть можливість безпосереднього використання в процесі конструювання систем підтримки прийняття рішень (СППР) учасників переговорного процесу, різноманітного інструментарію, накопиченого у програмній інженерії за період становлення і розвитку агентної парадигми [5, 6]. Процес комп'ютеризації переговорних процесів в різних сферах людської діяльності, за винятком організації виробництва, триває порівняно давно [7], і на сьогодні в ряді предметних областей успішно застосовуються СППР при проведенні переговорів [8]. Традиційно, до функцій таких систем відносять [9]:

1. Збір даних і комп'ютерний аналіз обстановки, що склалася перед початком переговорного процесу.

2. Допомога учасникам при формуванні ними своєї позиції на майбутніх переговорах, в постановці власних цілей і аналізі цілей партнера.

3. Організація мережного середовища для зв'язку всіх учасників переговорів, незалежно від того, де вони знаходяться.

4. Надання учасникам переговорів можливості легкого обміну пропозиціями і контрпропозиціями;

5. Відображення на моніторах всієї інформації, необхідної для ведення переговорів, в тому числі, використання когнітивного моделювання та мультимедійних засобів.

6. Допомога в оцінці пріоритетів окремих складових обговорюваного предмета переговорного процесу.

7. Надання засобів формалізації пропозицій, висунутих кожним учасником переговорів, їх оцінки та моделювання наслідків.

8. Надання засобів формального опису позицій і думок учасників в інтересах їх зближення і вироблення колективних рішень.

9. Формування варіантів компромісних рішень і моделювання їх наслідків, планування можливих варіантів угод.

Безпосередньому використанню наявних на ринку програмного забезпечення (ПЗ) середовищ розробки спеціалізованих СППР в ході переговорів перешкоджають наступні їх особливості: приналежність до категорії пропрієтарного програмного забезпечення; корпоративний статус; закритість програмного коду; орієнтованість на предметні області, які досить далеко відстоять від коопераційного виробництва в літакобудуванні.

Система Smart Settle предметно орієнтована на управління медичними ресурсами, і не має засобів ідентифікації поточних ситуацій та прогнозування їх розвитку, головне її призначення полягає в оцінюванні варіантів, вже згенерованих особою, яка приймає рішення (ОПР), а також узгодженні колективних рішень (знаходженні кон'юнктивного консенсусу) . Таким чином, СППР Smart Settle в базовому варіанті не може бути в принципі використана на етапі ініціації будь-якого проєкту.

СППР iRenaissance і INSPIRE мають доволі широку функціональність (аналіз обстановки, формування рішень, їх оцінювання та прогнозування наслідків прийняття рішень, а також узгодження рішень). Друга із зазначених систем розрахована на режим віддаленого проведення переговорів у гіпермедійному середовищі. Разом з тим, в цих системах не передбачений режим інформаційного підтримування учасників переговорів на етапі ініціації проєкту. Функціональність СППР Oracle Express OLAP, Data Vision, а також пакету фірми Cognos допускає лише аналіз рішень, підготовлених ОПР, що вимагає ще й ручного опису цих рішень у програмній системі.

Відмінною особливістю СППР КОСМОС (Когнітивна система моделювання стратегій) [8], є можливість аналізу і підтримки процесу переговорів з урахуванням невизначеності, що виникає внаслідок нечіткості вихідної інформації. Як і розглянуті вище системи, СППР КОСМОС дає можливість організації інформаційної підтримки значної частини процесів проведення переговорів і, крім того, також етапу ініціації проєкту. Разом з тим, доробка СППР КОСМОС, з метою її використання для ПОКВ в літакобудуванні, передбачає невиправдано великі витрати.

Система підтримки і управління переговорами NPMiAB [8] орієнтована на використання на початкових етапах переговорів, включаючи і етап ініціації проєкту. Система створена на основі середовища C++ Buider 6.0 і передбачає інформаційну підтримку переговорів шляхом візуалізації процесу. Формування варіантів рішень цієї СППР проводиться на основі нечітких когнітивних карт [9-11]. Когнітивний аналіз дає можливість формування раціональних рішень в складних ситуаціях, породжуваних слабкоструктурованими проблемами, які, в свою чергу, характеризуються багатоаспектністю, дефіцитом апріорної інформації, а також мінливістю процесів в часі. Спочатку, обговорювана система призначалася для інформаційної підтримки проєктів в галузі державного управління, тому і методичні засоби, покладені в її основу, зокрема, засоби візуалізації, орієнтовані на подання відповідних процесів. Наприклад, за допомогою NPMiAB, можлива ефективна підтримка переговорів по розробці стратегії регіональної політики. Очевидно, подібні теми досить далекі від виробничих проблем в рамках ПОКВ, і адаптація даної системи до предметної області «Коопераційне виробництво в літакобудуванні» пов'язана з невиправдано великими

витратами. У табл. 1 представлені результати порівняльного аналізу безпосереднього застосування існуючих програмних засобів підтримки переговорів для ПОКВ.

Таблиця 1. **Результати аналізу можливостей безпосереднього застосування існуючих програмних засобів підтримки переговорів для ПОКВ**

Назва СППР	Функціональні особливості системи	Ступінь придатності для інформатизації ПОКВ	Причини недостатньої придатності СППР для задач ПОКВ
Smart Settle	Предметна орієнтованість («Управління медичними ресурсами»)	Не придатна в принципі	Відсутність засобів ідентифікації і прогнозування поточних ситуацій, можливість оцінювання лише варіантів, що підготовлені ОПР
iRenaissance	Аналіз обстановки , формування рішень, їх оцінювання та прогнозування наслідків прийняття рішень, а також узгодження рішень	Не придатна	Не передбачено режим інформаційного підтримування учасників переговорів на етапі ініціації проєкту
INSPIRE	Можливість віддаленого проведення переговорів в гипермедийной середовищі	Не придатна	Не передбачено режим інформаційної підтримки учасників переговорів на етапі ініціації проєкту
Oracle Express OLAP	Функціональність обмежена, можливий лише аналіз готових варіантів рішень	Не придатна	Можливість оцінювання лише варіантів, підготовлених, що підготовлені ОПР
Data Vision	Функціональність обмежена, можливий лише аналіз готових варіантів рішень	Не придатна	Можливість оцінювання лише варіантів, підготовлених, що підготовлені ОПР
Cognos	Функціональність обмежена, можливий лише аналіз готових варіантів рішень	Не придатна	Можливість оцінювання лише варіантів, підготовлених, що підготовлені ОПР
КОСМОС	Можливість аналізу нечіткої інформації	Придатна частково	Необхідність адаптації до специфіки ПОКВ, що пов'язано із невиправдано великими витратами
NPMiAB	Предметна орієнтованість «Регіональна політика»)	Придатна частково	Необхідність адаптації до специфіки ПОКВ, що пов'язано із невиправдано великими витратами

Таким чином, особливості літакобудування і, відповідно, процеси управління проєктами кооперацийного виробництва повітряних суден [12], не дають можливості безпосередньо застосувати наявні на ринку програмного забезпечення засоби інформацийного підтримування переговорів на етапі ініціації ПОКВ.

Мета статті полягає у вирішенні завдання підвищення ефективності процесу ПОКВ на етапі його ініціації, за рахунок створення проблемно орієнтованого методичного базису, а на цій основі - програмних засобів розробки, розгортання і експлуатації відповідної СППР.

Матеріали і методи дослідження

Відповідно до ідеями, викладеними в роботах [13, 14], організація ППКП формально може бути представлена як задача знаходження Парето-оптимального рішення про розподіл замовлення між учасниками переговорів. Позначимо витрати кожного j-го учасника через l_j, а загальні витрати через

$$L = \sum_{j=1}^{m} l_j,$$

а пайова участь у витратах на виконання замовлення

$$R_j = f_j + \frac{1}{m}(1 - \sum_{j=1}^{m} f_j), j = \overline{1,m},$$

де R_j – частина замовлення, на яку претендує j-й учасник переговорів, функція f_j неперервна і визначена на множині l_j/L. Якщо має місце умова $\sum_{j=1}^{m} R_j = 1$, функція f_j визначає ту чи іншу схему розподілу замовлення L між кооперантами.

У відповідності зі схемою Томаса-Кіллменна [3], вид функції визначає стиль, а, відповідно, і тактику проведення переговорів. Так, якщо $f_j\left(\frac{l_j}{L}\right) = \left(\frac{l_j}{L}\right), \forall_j = \overline{1,m}$, тоді $R_j = \left(\frac{l_j}{L}\right)$, і мова може йти про співпрацю потенційних кооперантов, з пропорційним розподілом витрат на виконання замовлення між учасниками. У разі ж, коли функція має вигляд $f_j\left(\frac{l_j}{L}\right) = b > 0, \forall_j = \overline{1,m}$, стиль переговорів визначається пристосуванням до запитів протилежного боку. Найімовірнішою і, разом з тим, найскладнішою в організаційному відношенні, є завдання проведення переговорів про кооперацийному виробництві в стилі гібридного компромісу. При цьому функція $f_j\left(\frac{l_j}{L}\right)$ має вигляд

$$f_j(l_j/L) = (1-b)\cdot(l_j/L) 0 \le b \le 1,$$
$$R_j = (1-b)(l_j/L) + (b/m)$$

де b - коефіцієнт, що визначає «величину поступки», або допускається компромісу, m - кількість учасників переговорів.

Відповідно до виду функції f_j (в залежності від того, який стиль переговорів є доречним), визначається Парето-оптимальні значення R_j. Множина таких значень є основою для формування базової про-

позиції на етапі ініціалізації проєкту кооперaційного виробництва, тобто на практиці це означає узгодження значень l_j і R_j (передбачуваних витрат потенційних учасників і, відповідно, їх пайової участі у кооперaційному виробництві).

Наступною фазою переговорів по ініціалізації проєкту кооперaційного виробництва, після формування базової пропозиції, є реалізація ітераційного процесу узгодження цієї пропозиції. На цій фазі переговорів для інформаційного підтримування доцільно застосувати метод зближення значень параметрів при мінімізації максимального виграшу сторін [11].

Будемо вважати, що базову пропозицію по організації кооперaційного виробництва характеризується $i = \overline{1,I}$ параметрами оцінки $R_{j,}$ які повинні бути узгоджені m - учасниками переговорів. Кожен учасник пропонує свої значення параметрів $V_{ij.}$ Для узгодження запропонованих параметрів (значення яких найчастіше будуть відрізнятися), може бути використана спеціальна функція $P_{ij}(V_{ij})$, що відображає допустимість для j-го учасника переговорів, вибору відповідного значення параметра V_i.

В роботі [14] $P_{ij}(V_{ij})$, названа функцією ступеня задоволення, і область її значень лежить в межах шкали, діапазон якої може бути різним. На практиці, учасники переговорів формують набори множин однакової потужності, елементи яких відповідають конкретним значенням параметрів. Обчислення ступеня задоволеності значеннями параметрів сформованих наборів множин будь-яким j-м учасником переговорів може бути здійснено за формулою:

$$S_j = \sum_i^I W_{ij}\, P_{ij}(V_{ij}), j = \overline{1,m},$$

де W_{ij} – «вага» i-го значення параметра для j-го учасника переговорів.

Процес визначення значень ваг параметрів проводиться кожною стороною переговорів із залученням колективу експертів. Завдання узгодження позицій сторін в переговорах по організації кооперaційного виробництва формулюється таким чином.

Нехай $S_j^* = \sum_i^I W_{ij}\, P_{ij}(V_{ij}), j = \overline{1,m}$ – ступінь задоволеності переговорника j від визначених ним значень параметрів V_{ij}, а $\overline{S_j} = W_{ij}P_{ij}(V_i), j = \overline{1,m}$ – його задоволеність значеннями параметрів вже узгодженими з іншими учасниками $V_{i,}$. Необхідно знайти множину значень параметрів V_i, яке забезпечило б збереження ступеня задоволеності значеннями елементів цієї множини, всіма учасниками переговорів.

Узгоджене рішення V, що означає досягнення кон'юнктивного консенсусу на етапі ініціації проєкту, може бути отримано в результаті рішення оптимізаційної задачі:

$$V = \max(\widehat{M} + T/M),$$

при обмеженні $\widehat{M} \le \left(S_j - S_j^*\right)W_j, j = \overline{1,m}$, де $T = \sum_j^J\left(S_j - S_j^*\right)$, $\widehat{M}$ - мінімальний виграш при задоволенні учасника значеннями параметрів V_i; M - число, більше мінімального виграшу, який може отримати учасник переговорів при запропонованих їм значеннях V_i.

Значення змінних M та W_i, («ваги» виграшу j-го учасника переговорів), повинні бути визначені в середовищі СППР ПОКВ за допомогою спеціальних обчислювальних процедур. Зокрема, авторами публікації [12] запропоновано використовувати на цій фазі методи MAULT (Multi-Attribute Utility Theory) і AHP (Analytic Hierarchy Process).

Узагальненість представленої вище постановки завдання організації ПОКВ, обумовлює високий ступінь абстрактності формальної моделі, що була при цьому застосована; зазначена обставина обумовлює необхідність доповнення цієї моделі набором спеціальних процедур визначення конкретних значень змінних, яка проявляється у необхідності доповнення цієї моделі набором спеціальних процедур визначення конкретних значень змінних (наприклад, «ваги» виграшу, обмежень у вигляді порогових оцінок, множини параметрів V_i). Вказана обставина перешкоджає безпосередньому використанню моделі як формальної основи для створення математичного та програмного забезпечення СППР ПОКВ. Необхідний підхід, в якому, з одного боку, була б врахована специфіка предметної області «Ініціація проєктів кооперaційного виробництва повітряних суден», а з іншого - забезпечена автоматизація процесів збору, зберігання і обробки інформації про значення релевантних параметрів переговорів.

Обговорюваний підхід включає наступні етапи:

1. Складання когнітивної карти верхнього рівня КВ.

2. Конкретизація окремих аспектів організації КВ шляхом складання набору когнітивних карт нижнього рівня.

3. Отримання оцінок значень критеріїв і їх агрегація.

4. Формування альтернативних варіантів.

5. Підготовка рекомендацій для особи, яка приймає рішення.

У табл. 1 представлені шість базових варіантів організації КВ повітряних суден (ПС) і їх складових частин (СЧ) між двома кооперантами. Уявимо сукупність варіантів організації КВ, представлених в таблиці 1, в просторі станів кортежом виду

$$K = \langle A, D, P, S, C \rangle,$$

де K - кооперaційне виробництво, D - проєктування літака і його СЧ, P - виробництво СЧ, S - остаточне складання, C - критерії (цільові стани).

Мають місце умови $\forall d_i \in D$, $\forall p_j \in P$, $\forall s_k \in S$ відповідно до яких відбуваються перетворення, що забезпечують реалізацію того чи іншого варіанту КВ з множини А. Застосування будь-якого з операторів передбачає виконання підзадач нижніх рівнів, ефективність вирішення яких відбивається цільовими станами з множини C . Мовою булевої логіки [15], простір станів КВ представимо в такій формі:

$$K \Rightarrow A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee ... \vee A_6 .$$

При цьому окремі варіанти організації КВ описуються формулами, що представляють собою кон'юнкції диз'юнкцій відповідних літералів:

Таблиця 1 – **Варіанти організації кооперацiйного виробництва ПС**

Варіанти КВ	**1**			**2**			**3**			**4**			**5**			**6**		
Види діяльності кооперантов K_1 та K_2 в процесі кооперацiйного виробництва	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС	Проєктування ПС і СЧ	Виробництво СЧ	Остаточне складання ПС
K_1	+		+	+	+	+	+			+	+	+	+	+	+	+	+	
K_2	+	+		+	+		+	+	+	+	+	+				+	+	+

$$K \Rightarrow (((S_1 \wedge (D_1 \wedge P_1)) \wedge P_2) \vee (S_1 \wedge ((D_1 \wedge P_1) \wedge (D_2 \wedge P_2))) \vee$$
$$\vee ((S_1 \wedge (D_1 \wedge P_1)) \wedge (S_2 \wedge P_2)) \vee (((S_1 \wedge (D_1 \wedge P_1)) \wedge (S_2 \wedge (D_2 \wedge P_2))) \vee$$
$$\vee ((D_1 \wedge P_1) \wedge S_2) \vee (S_2 \wedge ((D_1 \wedge P_1) \wedge (D_2 \wedge P_2))).$$

Простір станів КВ представляє собою когнітивну карту верхнього рівня [3], для її візуалізації доречно використовувати структуру І / АБО графа [16].

На рис.1 представлена когнітивна карта верхнього рівня, що відображає процес організації КВ у формі І / АБО графа. Розглянемо фрагмент І/АБО графа, що відображає виробничу діяльність кооперантів K_1 в рамках реалізації альтернативного варіанту 2.1.1 організації КВ (Табл. 1).

Для аналізу виробничої діяльності кооперантів, відповідно до пропонованого підхода, необхідно скласти таблицю критеріїв (табл. 1), яка подається у вигляді когнітивної карти нижнього рівня (рис. 2).

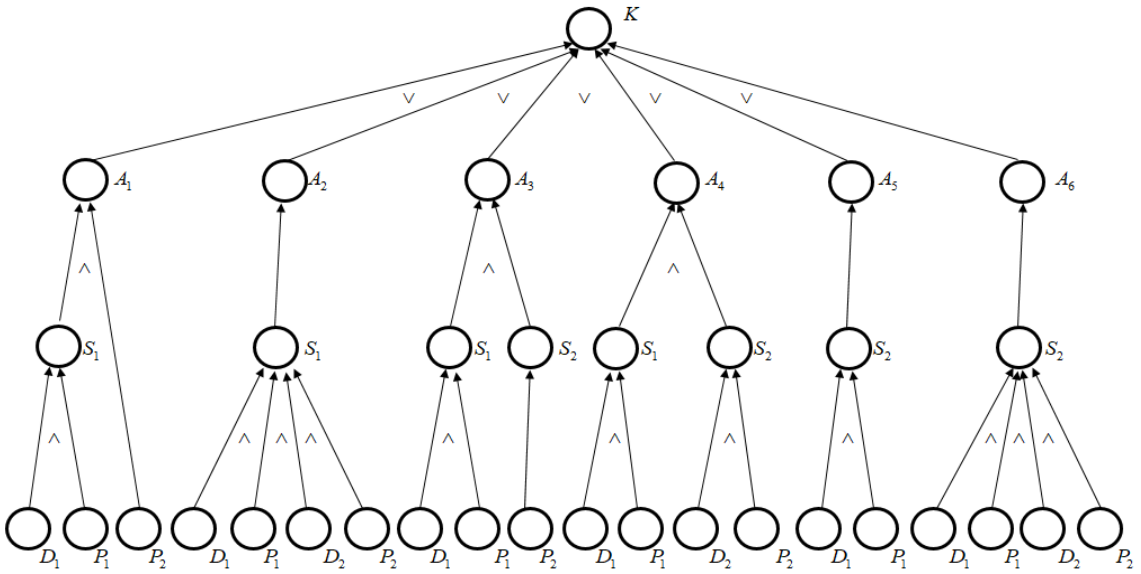


Рис. 1. Когнітивна карта організації КВ у формі І / АБО графа

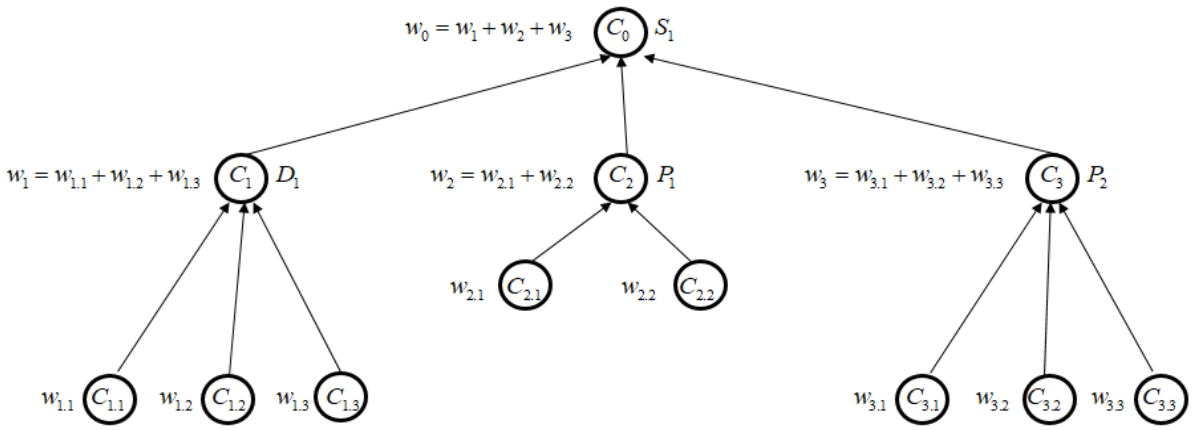


Рис. 2. Когнітивна карта нижнього рівня, що відображає виробничу діяльність кооперантів K_1 в рамках альтернативного варіанту 2.1.1 організації КВ

Таблиця 2 – **Критерії досягнення кінцевого цільового стану**

Критерій	Зміст критерію
C_0	Зниження собівартості будівництва літака
C_1	Зниження накладних витрат
C_2	Зниження трудовитрат
C_3	Зниження вартості матеріалів
$C_{1.1}$	Зниження витрат на утримання і експлуатацію виробничого обладнання
$C_{1.2}$	Зниження цехових накладних витрат
$C_{1.3}$	Зниження загальногосподарських накладних витрат
$C_{2.1}$	Модернізація обладнання або впровадження нових технологій агрегатно-складальних робіт
$C_{2.2}$	Скорочення тривалості стапельних робіт
$C_{3.1}$	Зниження транспортних витрат на доставку сировини і матеріалів
$C_{3.2}$	Зниження вартості оснащення та напівфабрикатів власного виробництва
$C_{3.3}$	Зниження витрат на контрагентні роботи і поставки

Тут C_0 є кінцевим цільовим станом і відображається кореневою вершиною розглянутого фрагмента І / АБО графа. Кінцевий цільовий стан може бути досягнутий при задоволенні критеріїв C_1, C_2, C_3 і т.д. Термінальні вершини когнітивної карти нижнього рівня відповідають простим критеріям (підцілям), які недоречно далі розкладати на складові [17].

В даному випадку, елементарними є підцілі $(C_{1.1}, C_{1.2}, C_{1.3}, C_{2.1}, C_{2.2}, C_{3.1}, C_{3.2}, C_{3.3})$.

На наступному етапі визначаються вагові коефіцієнти вершин І / АБО графа, що характеризують важливість (значущість) відповідних критеріїв (підцілей). При цьому, якщо вершина графа C_i має вагу w_i і їй підпорядковані вершини $C_{i.1}...C_{i.n}$ з вагами $w_{i.1}...w_{i.n}$ то має місце умова:

$$w_i = w_{i.1} + w_{i.2} + ... + w_{i.n}, \qquad (1)$$

де числа в правій частині визначають значимість критеріїв (підцілей) відносно один одного.

Найбільш ефективним методом визначення вагових коефіцієнтів вершин дерева цілей, є метод попарних порівнянь. Для його реалізації можуть бути виконані наступні кроки [17]. На графі виділяються дворівневі фрагменти, що складаються з «батьківської» вершини графа, представленого на рис. 2, нульовий ранг має фрагмент, (C_0, C_1, C_2, C_3), перший ранг - фрагменти

$$(C_1, C_{1.1}, C_{1.2}, C_{1.3}), (C_2, C_{2.1}, C_{2.2}), (C_3, C_{3.1}, C_{3.2}, C_{3.3}).$$

Для кожного фрагмента І/АБО графа, починаючи з нульового рангу, експерти будують матриці попарних порівнянь значущості критеріїв (табл. 2). У верхніх лівих клітинах крайнього лівого стовпця вказуються ваги батьківських вершин (наприклад, для кореня - кінцевого цільового стану вага $w(C_0) = 1$.

На перетині C_i-го рядка і C_j-го стовпця вказуються такі значення:

- 1, якщо $C_i = C_j$;
- значенням бала за шкалою порівняльної значимості критеріїв (табл. 3), якщо C_i більш важливий, ніж C_j;
- величині «1 / значення бала», якщо C_i менш важливий, ніж C_j.

Вага критерію C_i обчислюється за формулою:

$$w(C_i) = w(C_{под.}) \cdot \sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} r_{ij}} \Bigg/ \sum_{i=1}^{n} \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^{n} r_{ij}} \right), \qquad (2)$$

де $w(C_{под.})$ – вага батьківської вершини фрагмента; n – число критеріїв (цільових станів) нижнього рівня фрагмента дерева (І/АБО графа).

Таблиця 3 – **Шкала порівняльної значимості критеріїв**

Лінгвістичний значення	Бали
Однакова значимість критеріїв C_i та C_j	1
Деяке (слабке) переважання значимості C_i над значимістю C_j	3
Істотне (сильне) переважання C_i над C_j	5
Очевидне (дуже сильне) переважання C_i над C_j	7
Абсолютна перевага C_i над C_j	9
Проміжне значення між сусідніми значеннями шкали	2, 4, 6, 8

Виконані таким чином розрахунки, дозволяють отримати набір коефіцієнтів (ваг) значущості критеріїв (табл. 4). Упорядкувавши їх за зменшенням ваги і прийнявши деяке порогове значення, можна отримати набір найбільш значущих критеріїв.

Таблиця 4 – **Матриця попарних порівнянь для нульового та першого рангів ієрархії, представленої когнітивної картою нижнього рівня (рис. 2)**

$w(C_0) = 1$	C_1	C_2	C_3	w
C_1	1	3	5	0,57
C_2	1/3	1	3	0,23
C_3	1/5	1/3	1	0,2
$w(C_1) = 0,57$	$C_{1.1}$	$C_{1.2}$	$C_{1.3}$	w
$C_{1.1}$	1	2	3	0,3
$C_{1.2}$	1/2	1	1/2	0 , 11
$C_{1.3}$	1/3	2	1	0,16
$w(C_2) = 0,23$	$C_{2.1}$	$C_{2.2}$		w
$C_{2.1}$	1	3		0,15
$C_{2.2}$	1/3	1		0,18
$w(C_3) = 0,2$	$C_{3.1}$	$C_{3.2}$	$C_{3.3}$	w
$C_{3.1}$	1	3	2	0,12
$C_{3.2}$	1/3	1	1/2	0,06
$C_{3.3}$	1/2	2	1	0,02

Разом з цим, для більш обґрунтованого визначення значущих критеріїв, доцільним є ще й визначення взаємодій елементарних критеріїв, представ-

лених вершинами графа, з яких не виходить стрілок, тобто $C_{1.1}$, $C_{1.2}$ та їм аналогічних. Елементарний критерій C_i взаємодіє (корелює) з критерієм $C_{ji}, j=\overline{1,n}$, якщо задоволення критерію C_i, впливає на задоволення крітерію C_j. Цей вплив може бути двоїстим: прагнення до задоволення критерію C_i може сприяти або, навпаки, перешкоджати задоволенню C_j. В першому випадку на перетині рядка C_i і стовпця C_j матриці взаємодії (табл.5) проставляється знак «+», а в другому випадку – знак «-». Якщо критерії впливають один на одного, або характер їх взаємозв'язку невідомий, то відповідну клітку матриці необхідно залишити порожній [4]. Сила взаємозв'язку критеріїв оцінюється експертами з використанням шкали взаємозв'язку (табл. 5), вираженою лінгвістичними і числовими значеннями. На головній діагоналі матриці (табл. 6) проставляються значення + 1, що означає абсолютний взаємозв'язок (кореляцію) критерію C_j самого з собою.

Таблиця 5 – **Шкала оцінок взаємозв'язку елементарних критеріїв**

Лінгвістичний значення	Числове (бальне) значення
Відсутність взаємозв'язку	0
Дуже слабкий взаємозв'язок	0,1
Слабкий	0.3
Помірний	0,5
Сильний	0,7
Дуже сильний	0,9
Абсолютний взаємозв'язок	1

Ефективність реалізації обговорюваного підходу багато в чому залежить від якості експертного оцінювання, яке, в свою чергу , визначається складом групи експертів (експертної комісії). Для формування експертної комісії пропонується використовувати метод, описаний в роботі [18].

В основу даного методу покладено елементи теорії свідоцтв Демпстера- Шейфера [19] і теоріїю парадоксальних та правдоподібних міркувань Дезера-Смарандаке [20]. Безпосередня реалізація методу передбачає виконання таких кроків.

1. Формування експертної $\mathrm{E}=\{E_j \mid j=\overline{1,m}\}$ комісії.

2. Пред'явлення членам експертної комісії множини $\mathrm{A}=\{A_i \mid i=\overline{1,n}\}$ і отримання від них множини $X_j=\{x_1,x_2,...,x_j,...,x_m\}$ індивідуальних експертних оцінок.

3. Перевірка множини $\mathrm{X_j}$ індивідуальних оцінок на узгодженість. У разі, якщо в складі експертної комісії не більше двох експертів - ступінь узгодженості оцінюється на основі коефіцієнта рангової кореляції Спірмена, в іншому випадку - на основі коефіцієнта конкордації Кенделла-Сміта.

4. Якщо ступінь узгодженості індивідуальних оцінок допустимий, обчислення узагальненої оцінки шляхом усереднення значень елементів множини $X_j=\{x_1,x_2,...,x_j,...,x_m\}$ на основі медіани Кемені: $Arg \min\limits_a \sum_{i=1}^{l} d(a_i,a)$.

5. У разі недостатньої узгодженості індивідуальних оцінок - проведення ранжування альтернатив

$$R_{ni\partial c}:\{A_1 \succ A_2 \succ \ldots \succ A_j \succ \ldots \succ A_n\} \vee$$
$$\vee\{A_1 \succ A_2 \sim A_3 \succ \ldots \succ A_{j-1} \sim A_j \succ \ldots \succ A_n\}$$

і оцінки ступеня їх сумісності. Якщо експертні свідоцтва виявилися роздільними (непов'язаними) - переформування експертної комісії.

6. В залежності від ступеня сумісності експертних свідчень - застосування правила комбінування Демпстера, або досягнення кон'юнктивного консенсусу на основі правила комбінування Дезера-Смарандаке.

7. Обчислення узагальненої оцінки $\mathrm{X_{уз}}$ за підсумками роботи експертної комісії.

Припустимо, для визначення рівня компетенції членів майбутньої експертної комісії HR-менеджером створено список з 6 професійних і особистісних компетенцій: професійна K_1 компетентність; наукова інтуїція (K_2); зацікавленість в об'єктивних результатах експертизи (K_3); зібраність (K_4); комунікативність (K_5); незалежність суджень (K_6). Далі, за участю топ-менеджменту компанії-учасника переговорів щодо організації КВ, HR-менеджером формується вектор пріоритетів (вагових коефіцієнтів компетенцій) $P=\{p_i \mid i=1,6\}=\{0{,}42891;\ 0{,}2499;\ 0{,}13513;\ 0{,}0558;\ 0{,}04983;\ 0{,}08043\}$. Значення вектора пріоритетів P були отримані, використовуючи оцінку геометричного середнього.

Припустимо, була сформована група з 7 чоловік, $\mathrm{E}=\{E_i \mid i=\overline{1,7}\}$ за своїми якостями здатних провести оцінку альтернативних варіантів організації КП. Відповідно до затвердженого набору компетенцій, топ-менеджментом компанії-учасника переговорів щодо організації КВ були оцінені професійні і особистісні якості групи експертів і призначені ступені переваги за правилом [18]: 3 - слабка перевага, 5 - суттєва перевага, 7 - значна перевага, 9 - абсолютна перевага, значення 4, 6, 8 - відповідають проміжним судженням між кожними двома послідовними парами розглянутих значень. Результати наведені в табл. 5.а.

Таблиця 5.а – **Оцінки (ступені переваги) експертів**

№	Експерти		Компетенції					
			1	2	3	4	5	6
			K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
1	E_1	Експерт 1	9	8	7	5	9	5
2	E_2	Експерт 2	7	9	9	7	5	6
3	E_3	Експерт 3	6	7	55		8	5
4	E_4	Експерт 4	6	8 8		8	9	9
5	E_5	Експерт 5	9		6	8	5	8
6	E_6	Експерт 6	5	9	5	7 7 7		
7	E_7	Експерт 7	5	7	99	8		9

В ході проведення аналізу, наприклад для компетенції K_1 - «професійна компетентність», було сформоване ранжування виду:

$$\{E_1 \sim E_5\} \succ E_2 \succ \{E_3 \sim E_4\} \succ \{E_6 \sim E_7\}.$$

Для кожної виділеної підмножини була розрахована основна маса ймовірності. На рис. 3 зображено графік залежності значення основної маси ймовірності від величини ваги p_1 компетенції K_1 (професійна компетентність), при цьому величина p_1 змінюється в діапазоні від 0 до 1. З рис. 3 видно, що з ростом величини p_1 плавно зменшується значення $m_i(E)$ (величина повного незнання, невизначеності), при $p_1 = 1$ значення повного незнання досягає свого мінімуму і відповідає величині $m_i(E)$ = 0,059. Значення $m_i(E)$ досягає максимуму (тобто дорівнює 1), при $p_1 = 0$, тобто чим менше значимість компетенції (критерію), тим більше величина незнання (зростає невизначеність).

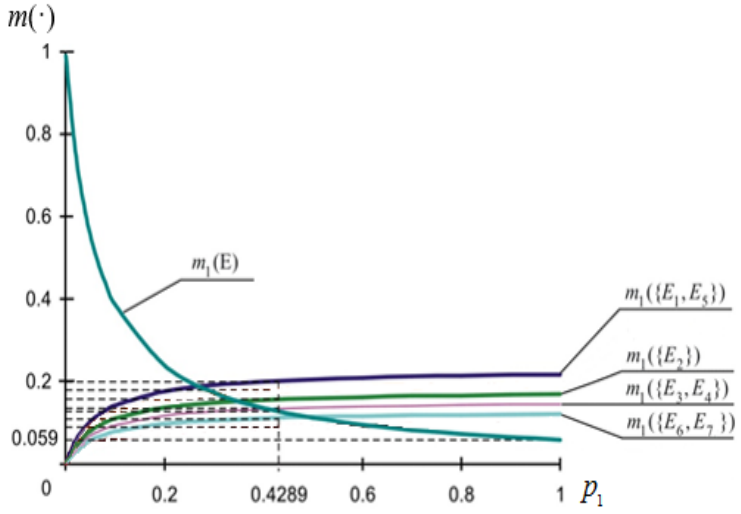


Рис. 3. Графічне представлення залежності $m(\cdot)$ від величини p_1 ваги компетенції $K1$ (професійна компетентність експертів)

Зі збільшенням p_1, значення $m_1(\{E_1, E_5\})$, $m_1(\{E_2\})$, $m_1(\{E_3, E_4\})$, плавно зростають. Маса ймовірності $m_1(\{E_1, E_5\})$ має максимальне значення, оскільки альтернативі $\{E_1, E_5\}$ був призначений максимальний ступінь переваги 9, який визначає його перевагу даної особи перед іншими претендентами на включення до складу експертної комісії.

При $p_1 = 0{,}42890$ значення $m_1(\cdot)$ відповідають розрахованим основним масам ймовірності:

$$m_1(\{E_1, E_5\}) = 0{,}201; \quad m_1(\{E_3, E_4\}) = 0{,}134;$$

$$m_1(\{E_2\}) = 0{,}157; \quad m_1(\{E_6, E_7\}) = 0{,}112.$$

Для отримання узагальненої оцінки необхідно скомбінувати основні значення ймовірності, отримані по кожній компетенції. Для визначення порядку комбінування свідоцтв були розраховані значення відмінності між окремими свідченнями, при цьому справедлива умова $d_J(m_i, m_j) = d_J(m_j, m_i)$.

Результати розрахунку значень відмінності $d_J(m_i, m_j)$ для підсумкових свідоцтв:

$$d_J(m_1, m_2) = 0{,}258; \quad d_J(m_1, m_3) = 0{,}239;$$
$$d_J(m_1, m_4) = 0{,}358; \quad d_J(m_1, m_5) = 0{,}358;$$
$$d_J(m_1, m_6) = 0{,}265; \quad d_J(m_2, m_3) = 0{,}225;$$
$$d_J(m_2, m_4) = 0{,}292; \quad d_J(m_2, m_5) = 0{,}287;$$
$$d_J(m_2, m_6) = 0{,}215; \quad d_J(m_3, m_4) = 0{,}246;$$
$$d_J(m_3, m_5) = 0{,}239; \quad d_J(m_3, m_6) = 0{,}184;$$
$$d_J(m_4, m_5) = 0{,}138; \quad d_J(m_4, m_6) = 0{,}165;$$
$$d_J(m_5, m_6) = 0{,}176.$$

Найменше значення відстані $d_J(m_i, m_j)$ між групами свідоцтв $m_i(\cdot)$ і $m_j(\cdot)$ було отримано для $d_J(m_4, m_5)$. Отже, першими повинні бути зкомбіновані групи свідчень $m_4(\cdot)$ та $m_5(\cdot)$. Після цього була знайдена міра відмінності між розрахованим $m_{45}(\cdot)$ і підсумковими, $m_1(\cdot)$, $m_2(\cdot)$, $m_3(\cdot)$ та $m_6(\cdot)$. Знайдене мінімальне значення відстані між групами свідоцтв визначає підсумкові (комбіновані) підмножини і відповідні їм $m_{ij}(\cdot)$.

На основі описаної процедури було отримано порядок комбінування свідоцтв:

1. $m_{45} = m_4 \oplus m_5$; $d_J(m_4, m_5) = 0{,}138$;
2. $m_{456} = m_{45} \oplus m_6$; $d_J(m_{45}, m_6) = 0{,}122$;
3. $m_{1456} = m_1 \oplus m_{456}$; $d_J(m_1, m_{456}) = 0{,}181$;
4. $m_{23} = m_2 \oplus m_3$; $d_J(m_2, m_3) = 0{,}225$;
5. $m_{123456} = m_{23} \oplus m_{1456}$; $d_J(m_{23}, m_{1456}) = 0{,}146$.

де $\oplus$ - правило комбінування свідоцтв на основі кон'юнктивного консенсусу.

У таблиці 5.6 наведені підсумкові підмножини, отримані шляхом комбінування виділених підмножин за компетенціями K_1 та K_2 з урахуванням того, що джерела вважаються незалежними і достовірними. Далі проводиться розрахунок результую-

чих мас ймовірності для виділених підмножин, з використанням правила комбінування Демпстера.

Розраховані відповідно до методики, викладеної в [20], значення функцій довіри $Bel(\{E_i\})$ та правдоподібності $Pl(\{E_i\})$ для кожного елемента множини, $E = \{E_i \mid i = \overline{1,7}\}$ наведені в таблиці 5.в.

Сформовані інтервали $[Bel(E_i); Pl(E_i)]$ характеризують інтервал невизначеності, пов'язаний з вибором E_i. Така невизначеність може бути відображенням невизначеності вихідних оцінок експертів.

Ситуація, при якій невизначеність результуючих оцінок більше невизначеності вихідних експертних оцінок, в значній мірі ускладнює інтерпретацію отриманих результатів і робить проблематичним отримання обґрунтованих висновків.

Наближення значення функції $Bel(E_i)$ до значення функції $Pl(E_i)$ характеризується зниженням рівня невизначеності.

На основі даних табл. 5.в однозначно визначити результуюче ранжування неможливо, оскільки отримані інтервали перекриваються і деякі з них є вкладеними. Для переведення інтервальних оцінок в точкові, приймемо значення коефіцієнта γ, рівним 0,6.

Агреговані оцінки об'єктів, які аналізуються (елементи множини E), отримані на основі застосування правила Демпстера, наведені в табл. 5.д.

Таблиця 5.б – **Перетин виділених підмножин за компетенціями K_1 та K_2**

Компетенція K_1					
Компетенція K_2	$\{E\}$	$\{E_1, E_5\}$	$\{E_2\}$	$\{E_3, E_4\}$	$\{E_6, E_7\}$
	$\{E_1, E_4, E_5\}$	$\{E_1, E_5\}$	$\varnothing$	$\{E_4\}$	$\varnothing$
	$\{E_2, E_6\}$	$\varnothing$	$\{E_2\}$	$\varnothing$	$\{E_6\}$
	$\{E_3, E_7\}$	$\varnothing$	$\varnothing$	$\{E_3\}$	$\{E_7\}$

Таблиця 5.в – **Інтервали, сформовані на основі функцій довіри та правдоподібності**

Правило	Експерти							
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
Комбінування свідчень по правилу Демпстера	[0,088; 0,1608]	[0,1153; 0,1587]	[0,0569; 0,1076]	[0,0959; 0,1594]	[0,0769; 0,1338]	[0,0677; 0,121]	[0,1136; 0,1821]	0,0135

Таблиця 5.д – **Агреговані оцінки членів експертної комісії**

Правило	Експерти						
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7
Комбінування свідчень Демпстера	0,11714	0,13268	0,07716	0,12133	0,09968	0,08903	0,14099

Розрахунки, виконані на основі правила комбінування свідоцтв Демпстера дозволяють зробити наступні висновки:

1. За результатами, представленими в таблицях 5.в і 5.д, найбільші значення функції довіри і правдоподібності належать вибору експертом $\{E_7\}$.

2. Ступінь довіри експерту $\{E_7\}$ знаходиться в межах від 0,011 до 0,326.

3. Рівень конфлікту варіюється в межах від 0,25 до 0,46, що свідчить про наявність деякого конфлікту між окремими групами свідоцтв.

4. Сумарне значення всіх мас ймовірності виділених фокальних елементів більша за масу ймовірності, що відноситься до основи аналізу $(\sum_{i=1}^{p} m_j(X_i) > m_j(\mathrm{E}),\ j = \overline{1,7})$.

5. Судження топ-менеджменту компанії-учасника переговорів щодо організації КВ про склад експертної комісії можна вважати сумісними, а значить кон'юнктивний консенсус досягнутий.

В результаті проведених розрахунків були отримані нормовані значення коефіцієнтів компетентності майбутніх експертів, вони, відповідно, дорівнюють:

$$\Omega = \{\omega_i \mid i = \overline{1,7}\} =$$
$$= \{0{,}118;\ 0{,}133;\ 0{,}075;\ 0{,}12;\ 0{,}097;\ 0{,}085;\ 0{,}142\}.$$

На підставі значень вектору Ω було отримано ранжування майбутніх членів експертної комісії з урахуванням їх компетентності:.

$$E_7 \succ E_2 \succ E_4 \succ E_1 \succ E_5 \succ E_6 \succ E_3.$$

Експерт E_7 визнаний найбільш компетентним в експертній групі (за рішенням даного завдання), експерт E_3 визнаний найменш компетентним в групі.

Наступними етапами обговорюваного підходу є агрегація експертних оцінок, вибір альтернатив і підготовка рекомендацій для ОПР.

Завдання агрегації експертних оцінок зводиться до визначення інтегральної оцінки Q_i, яка враховує вплив C_i на всі вершини, що відображають підцілі на I / АБО графі.

Така оцінка визначається за допомогою формування матриці (табл. 5), шляхом обрахування алгебраїчної суми виду [21]:

$$Q_i = \sum_{j=1}^{m} w_j \cdot \nu_{ij}, \qquad (3)$$

де w_j - вага критерію C_j; v_{ij} - експертна оцінка з урахуванням знака, який вписаний до клітки (C_i, C_j) матриці взаємодії (коефіцієнт кореляції $C_i \subset C_j$). Іншими словами - це алгебраїчна сума значень, вписаних в клітини цього рядка і значень ваги з верхнього рядка табл. 6.

Таблиця 6 – **Матриця взаємозв'язку елементарних критеріїв і формування інтегрованих оцінок**

Ваги (w)	0,3	0,11	0,16	0,15	0,08	0,12	0,06	0,02	Інтегральна оцінка критерію	Вибрані критерії
Елементарні критерії	$C_{1.1}$	$C_{1.2}$	$C_{1.3}$	$C_{2.1}$	$C_{2.2}$	$C_{3.1}$	$C_{3.2}$	$C_{3.3}$		
$C_{1.1}$	+1,0			+0,5	+0,1		+0,5	+0,3	0,49	$C_{1.1}$ =0,49
$C_{1.2}$		+0,1	+0,1			+0,1	+0,3		0,156	
$C_{1.3}$	+0,3	+0,5	+0,1	+0,3				+0,1	0,352	$C_{1.3}$ =0,352
$C_{2.1}$	+0,5			+0,1	+0,7		+0,3		0,455	$C_{2.1}$ =0,455
$C_{2.2}$	+0,1			+0,7	+0,1			+0,1	0,217	
$C_{3.1}$						+0,1			0,12	
$C_{3.2}$	+0,1			+0,3			+0,1		0,135	
$C_{3.3}$		+0,1	+0,1		+0,1	+0,1	+0,1	+ 0,1	0,073	

Інтегральні оцінки дозволяють ранжувати критерії за принципом: критерій C_i має тим більшу значущість, чим більше його оцінка D_i. Ця обставина визначає можливість вибору найбільш важливих критеріїв.

Наприклад, на підставі даних табл. 6, найбільш значущими є критерії: $C_{1.1}$=0,49 - зниження витрат на утримання та експлуатацію устаткування; $C_{2.1}$=0,455 - модернізація технології агрегатно-складальних робіт; $C_{1.3}$=0,352 - зниження загальнозаводських накладних витрат.

Наступним етапом реалізації розроблюваного підходу є проведення «м'якого аналізу» альтернативних варіантів організації КВ, для чого будуть використані елементи теорії нечітких множин.

Спроби вирішення завдання ефективної організації командної взаємодії при вирішенні прикладних задач в різних предметних областях робляться з кінця минулого століття, при цьому дослідники використовують такі методи і засоби: технології розподіленого рішення задач паралельного проєктування [22], загальні архітектури або платформи інженерних і промислових застосунків [23], мультиагентні та мультиекспертні системи [24] і т.д.

Системи підтримування колективної роботи прийнято розділяти на два класи: мультиекспертні системи (використовують концепцію «класної дошки») і мультиагентні системи. У мультиекспертних системах кожен фахівець (іноді званий «джерелом знань») має доступ до «класній дошці», на якій відображається та інформація, що фахівець хоче повідомити іншим. У мультиагентній системі кожен агент незалежний і має власне уявлення про поточну ситуацію в системі. Ця відмінність полягає не стільки в реалізації, скільки в концепції. У разі «класної дошки», ми маємо можливість бачити систему в цілому, що позитивно позначається на її цілісності, але має ряд недоліків. По-перше, «класна дошка» може виявитися вузьким місцем комунікацій в системі. По-друге, виникають проблеми забезпечення загального уявлення, оскільки різні інструменти використовують різні форми представлення своїх даних, і немає особливого резону доставляти дані в загальне місце, де далеко не кожен буде здатний їх зрозуміти. По-третє, протягом життєвого циклу продукту можуть з'являтися нові інструментальні засоби, впровадження яких буде породжувати зміну структури середовища проєктування. У мультиагентній системі кожен агент будує власну модель поточного рішення, при цьому грунтуючись на своїх даних, і даних, що отримані ним від інших агентів. У таких системах є комунікаційний протокол і формат повідомлень (мова комунікацій), відповідно до яких повинні оформлятися запити і відповіді. Узагальнено можна сказати, що агенти автономні і гетерогенні, тобто відсутня єдина система управління. Комунікації між агентами можуть бути синхронними і асинхронними, спрямованими (peer-to-peer), загальними (broadcast) або груповими (multicast). Важливо, що семантика повідомлень між агентами повинна бути високого рівня. Це означає не тривіальне пересилання команд на запуск / зупинку, а повну реалізацію інформаційних потоків між агентами в системі, шляхом обміну повідомленнями на мові, аналогічній мові високого рівня в програмуванні.

Структура досліджень в області багатоагентних систем в даний час дуже широка і її можна порівняти за своїм масштабом з широтою досліджень в області штучного інтелекту. Це не випадково, оскільки обумовлено интегрованістю самого поняття такої системи, складністю архітектури і різноманіттям компонент кожного окремого агента, різноманіттям математичних і програмних засобів, що використовуються при його описі і розробці, складністю структури і різноманітністю варіантів взаємодії агентів між собою, складністю і різноманітністю компонент зовнішнього середовища, в якій функціонують агенти, і т.д.

У нашому випадку, під агентом слід розуміти механізм інкапсуляції та обміну розподіленими знаннями і функціями. Кожен агент - це процес, що

володіє певною частиною знань про об'єкт проєктування і можливістю обмінюватися цими знаннями з іншими агентами.

Залежно від типу, агент може підтримувати й інтерфейс з користувачем. Під багатоагентною системою будемо розуміти багатокомпонентну систему, що складається з агентів зі специфікованим інтерфейсом.

Використання технології розподілених об'єктів на сьогоднішній день може розглядатися як необхідна, але, мабуть, не достатня умова для забезпечення єдиного інформаційного простору (в тому числі простору знань). З нашої точки зору, найбільш прийнятні рішення лежать у використанні агентно-орієнтованої архітектури в якості каркаса системи, у якій агенти забезпечують динамічне зв'язування і взаємодію, використовуючи стандартні інтерфейси і формати даних (або знань). При цьому вся бізнес-логіка роботи системи може забезпечуватися різними засобами - від найпростіших застосунків до інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень. Важливим є той факт, що використання агентного підходу в такому випадку зробить спочатку закриті системи відкритими і забезпечить можливість інтеграції їх в єдиний інформаційний простір. При цьому також не будуть втрачені цінні дані (знання), що зберігаються в цих системах.

Застосування агентного підходу до побудови інтелектуальних систем підтримки переговорів дасть в результаті можливість реалізації СППР як єдиної системи з розподіленим інтелектом, яка має безліч позитивних властивостей: це і обробка інформації, наближена до місць її отримання, підвищення надійності та відмовостійкості системи в цілому, ефективне розпаралелювання роботи різних структурних одиниць підприємства, забезпечення повної спостережливості системи (що абсолютно неможливо в разі використання монолітної системи).

Висновки і перспективи подальших досліджень

1. Проведено критичний огляд існуючих комп'ютерних систем підтримування процесу переговорів на етапі ініціації проєктів кооперaційного виробництва повітряних суден, який показав недоцільність, а в ряді випадків і неможливість безпосереднього застосування наявних на ринку програмного забезпечення засобів.

2. Показано, що для визначення значень змінних «ваг» виграшу кожного учасника переговорів, на відповідній фазі ПОКВ необхідно використання методів MAULT (Multi-Attribute Utility Theory) і AHP (Analytic Hierarchy Process).

3. Описана формальна постановка задачі інформаційного підтримування переговорів по організації кооперaційного виробництва повітряних суден, і показана необхідність її доповнення спеціальними методичними засобами для адекватного використання в якості математичного забезпечення відповідної комп'ютерної системи.

4. Запропоновано підхід до розробки СППР ПОКВ на основі методів конфліктного менеджменту, ситуаційного аналізу, нечіткої логіки і колективного експертного оцінювання.

5. Обґрунтовано, що для програмної реалізації системи інформаційного підтримування переговорів по організації кооперaційного виробництва доцільне використання технології програмних агентів.

Список літератури

1. Whitty, S.J. and Schulz, V.F. The PM BOK CODE. - 20-th IPMA World Congress on Project Management, 1, P. 466-472, 2006.
2. Поспєлов Д.А. Ситуаційне управління: теорія і практика. - М .: Наука. - Гл. ред. фіз.-мат літ., 1986. - 288 с.
3. Killmann, R.H. and Thomas, K.W. Developing a Forced-Choice Measure of Conflict-Handling Behavior: The MODE Instrument, Educational and Psychological Measurement, Vol. 37, №2 (1977), P. 309-325.
4. Лебедєва М.М. Вітчизняні дослідження процесу ведення переговорів: історія розвитку та перспективи // Вісник МГУ. Сер.18. Соціологія і політологія. - 2000. - №1. - С.154-165.
5. Тарасов В.Б. Від многоагентних систем до інтелектуальним організаціям. - М .: Едіторіал УРСС, 2002.
6. Рассел С., Норвіг П. Штучний інтелект: сучасний підхід, 2-е вид .: Пер. з англ. - М .: Видавничий дім «Вільямс», 2006. - 1408 с.
7. Eom S.B. Decision support systems research: reference disciplines and a cumulative tradition // The International Journal of Management Science. - 1995 / - Vol. 23. №5. - P. 511-523.
8. Кислякова Я.В., Тарасов Б.В. Комп'ютерні системи підтримки переговорів // Прикладна інформатика - 2005, №4, - Москва, С. 46-51.
9. Максимов В.І., Корноушенко Е.К., Качаев С.В. Когнітивні технології для підтримки прийняття управлінських рішень // Інформаційне суспільство. -1999. - №2. - С. 50-54.
10. Кулинич А.А. Комп'ютерні системи моделювання когнітивних карт: підходи і методи // Проблеми управління. - 2010. - №3. - С. 2-16.
11. Волков В.Ю., Волкова В.В. Інструментальні засоби когнітивного моделювання в системах підтримки прийняття рішень // Вісник Міжнародної академії системних досліджень. Інформатика, екологія, економіка. - 2016. -Т. 18., №1. - С. 104-108.
12. Кривова С.Г., Зубаньов О.Є. Підходи щодо корекції ранніх стадій проектів наукоємного машинобудування // Технологічні системи - 2019, №4 (89), - Київ, С. 45-49.
13. Трахтенгерц Е.А. Аналіз ведення ділових переговорів за допомогою комп'ютерних систем підтримки прийняття групових рішень // Проблеми управління. Інформаційні технології в управлінні - 2002. - №1. - С. 13-28.
14. Трахтенгерц Е.А. Комп'ютерні системи підтримки управлінських рішень // Изв. РАН. Теорія і системи управління. - 2003. - №6. - С. 98-123.
15. Сигорський В.П. Математичний апарат інженера. - К.: «Техніка», 1975, 768 с.

16. Тверетіна О.В., Шостак І.В. Аналіз баз знань продукційного типу на основі І / АБО графа // Вісник Харківського державного політехнічного університету. Вип 79: Нові рішення в сучасних технологіях - 2000. - С. 17-18.
17. Юдицький С.А. Цільове моделювання організаційних систем / С.А. Юдицький // Прилади і системи управління. - 2000. - №6. - С. 82-86.
18. Шостак О. І. Формування команд виконавців високотехнологічних проектів на інноваційних підприємствах з використанням експертного оцінювання сценаріїв // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Серія: механіко-технологічні системи та комплекси: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «ХПІ». Харків, 2015. Вип. 36 (1145). С. 57-63.
19. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. Princeton: Princeton University Press, 1976. 297 p.
20. Smarandache F., Dezert J. Advances and applications of DSmT [Electronic resource] // Rehoboth: American Research Press, 2004. Vol. 1. 438 p. URL: http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/DSmT-book1.pdf. (date of the application 27.11.2014).
21. Коваленко І.І., Швед А.В. Експертні технології підтримки прийняття рішень: монографія // І.І. Коваленко, А.В. Швед. - Миколаїв: Іліон, 2013. - 216 с.
22. McGuireJM,Kuokka DR, Weber JC, Gruber TR, Olsen GR SHADE: Technology for Knowledge-Based Collaborative Engineering, Journal of Concurrent Engineering: Applications and Research. - 1993. - v.1 (3) (http://citeseer.ist.psu.edu/mcguire93shade.html).
23. Шостак І.В., Топал А.С., Устинова А.Н., Кузнєцов Д.А. Синтез ІСППР з управління складними об'єктами з використанням нечіткої логіки та онтологічного підходу // Вісті Академії інженерних наук України. - 2004. - №4 (24). - С. 133 - 138.
24. Сіроджа І.Б., Шостак І.В., Топал А.С. Інтеграція знань у виробничих системах штучного інтелекту на основі мультиагентної технології // авіаційно-космічна техніка і технологія. - 2002. - Вип. 34. - С. 226 -232.

REFERENCES

1. Whitty, S.J. and Schulz, V.F. (2006), The PM BOK CODE. - *20th IPMA World Congress on Project Management*, No.1, pp. 466-472.
2. Pospelov, D.A Situational management: theory and practice. - M .: Science. - Ch. ed. Phys.-Math Lit., 1986. - 288 p.
3. Killmann, R.H. and Thomas, K.W. (1977), Developing a Forced-Choice Measure of Conflict-Handling Behavior: The MODE Instrument, Educational and Psychological Measurement, Vol. 37, No.2, pp. 309-325.
4. Lebedeva, M.M. (2000), Domestic research of the negotiation process: history of development and prospects // *Bulletin of the Moscow State University. Vol.18. Sociology and political science*, No.1, pp.154-165.
5. Tarasov, V.B. (2002), From multi-agent systems to intelligent organizations. - M .: Editorial URSS.
6. Russell, S., Norvig, P. (2006), Artificial intelligence: a modern approach, 2nd ed .: Per. from English - M .: Williams Publishing House, P. 1408.
7. Eom, S.B. (1995), Decision support systems research: reference disciplines and a cumulative tradition, *The International Journal of Management Science*, Vol. 23, No.5, pp. 511-523.
8. Kislyakova, Y.V., Tarasov, B.V. (2005), Computer systems for negotiation support, *Applied Informatics*, *Moscow*, No.4, pp. 46-51.
9. Maksimov, V.I., Kornushenko, E.K., Kachaev, S.V. (1999), Cognitive technologies to support management decisions, *Information Society*, No.2, pp. 50-54.
10. Kulinich, A.A. (2010), Computer systems for modeling cognitive maps: approaches and methods, *Problems of management*, No.3, pp. 2-16.
11. Volkov, V.Y., Volkova, V.V. (2016), Cognitive modeling tools in decision support systems, *Bulletin of the International Academy of Systems Research. Informatics, ecology, economics*, 18, No.1, pp. 104-108.
12. Krivova, S.G., Zubanov, O.E. (2019), Approaches to the correction of early stages of science-intensive engineering projects, *Technological systems*, *Kyiv*, No.4(89), pp. 45-49.
13. Trachtengertz, E.A. (2002), Analysis of business negotiations with the help of computer systems to support group decision making, Management Problems. Information technologies in management, No.1, pp. 13-28.
14. Trachtengertz, E.A. (2003), Computer systems for supporting management decisions, *Izv. RAS. Theory and control systems*, No.6, pp. 98-123.
15. Sigorsky, V.P. (1975), Mathematical apparatus of an engineer, K.: "Technology", P. 768.
16. Tveretina, O.V., Shostak, I.V. (2000), Analysis of knowledge bases of production type on the basis of I / OR graph, *Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University. Issue 79: New solutions in modern technologies*, pp. 17-18.
17. Yuditsky, S.A. (2000), Target modeling of organizational systems, *Devices and control systems*, No.6, pp. 82-86.
18. Shostak, O.I. (2015), Formation of teams of executors of high-tech projects at innovative enterprises with the use of expert evaluation of scenarios, *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: mechanical-technological systems and complexes: coll. Science. etc. / Nat. tech. KhPI University. Kharkiv*, Issue. 36 (1145), pp. 57-63.
19. Shafer, G.A. (1976), Mathematical Theory of Evidence. Princeton: Princeton University Press, P. 297.
20. Smarandache, F., Dezert, J. (2004), Advances and applications of DSmT, *Rehoboth: American Research Press*, Vol.1. P. 438. URL: http://www.gallup.unm.edu/~smarandache/DSmT-book1.pdf.
21. Kovalenko, I.I., Swede, A.V. (2013), Expert technologies of decision support: monograph, Mykolaiv: Ilion, P.216.
22. McGuire, J.M., Kuokka, D.R, Weber, J.C., Gruber, T.R., Olsen, G.R. (1993), SHADE: Technology for Knowledge-Based Collaborative Engineering, *Journal of Concurrent Engineering: Applications and Research*, 1(3). (http://citeseer.ist.psu.edu/mcguire93shade.html).
23. Shostak, I.V., Topal, A.S., Ustinova, A.N., Kuznetsov, D.A. (2004), Synthesis of ISPPR for control of complex objects using fuzzy logic and ontological approach, *Bulletin of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine*, No.4 (24), pp. 133 - 138.
24. Sirodzha, I.B., Shostak, I.V., Topal, A.S. (2002), Integration of knowledge in production systems of artificial intelligence on the basis of multiagent technology, *Aerospace engineering and technology. - Kharkiv: National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"*, 34, pp. 226 -232.

Received (Надійшла) 12.07.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.09.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Шостак Ігор Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна;
Igor Shostak – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Software Engineering, National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: iv.shostak@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-6428-2831.

Кривова Світлана Георгіївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри управління проектами, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;
Svetlana Kryvova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Project Management, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kyiv, Ukraine;
e-mail: sh.kryvova@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-2700-8469.

Зубаньов Олександр Євгенійович – магістр, провідний інженер, АТ «Український науково-дослідний інститут авіаційної технології», Київ, Україна;
Alexander Zubanyov –Leading Engineer, JSC "Ukrainian Research Institute of Aviation Technology", Kyiv, Ukraine;
e-mail: info@ukrniat.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-8649-1450.

Информационная поддержка процесса проведения переговоров на этапе инициации проектов кооперационного производства в самолетостроении

И. В. Шостак, С. Г. Кривова, А. Е. Зубанев

Аннотация. Рассмотрены особенности проведения первой стадии (инициации) переговоров по организации кооперационного производства воздушных судов. Показано, что этой стадии присущ недопустимо высокий уровень рисков, обусловленный, с одной стороны, вероятностью значительных дополнительных финансовых затрат в ходе реализации проекта, а с другой - потери потенциальных кооперантов, в случае недостижения консенсуса между участниками переговоров. Проведен критический обзор существующих компьютеризированных систем поддержки переговоров. Сделан вывод о существовании проблемы, которая заключается в недостаточной эффективности переговорного процесса на этапе инициации проектов кооперационного производства воздушных судов в результате, в том числе, и отсутствия специализированных компьютерных средств информационной поддержки, которые при формировании соответствующих решений, предоставляли бы возможность учесть специфику как самого этапа инициации проектов, так и предметной области «Кооперационное производство в самолетостроении». Исходя из особенностей данной проблемы, сформулированы цель статьи, а именно разработка эффективных средств информационного поддержания переговоров о кооперационном производстве на начальном этапе (инициации), которые обеспечат экономию финансов, во-первых, за счет сокращения сроков переговоров, а во-вторых - снижения вероятности принятия нерациональных решений, приводящих к дополнительным затратам при реализации проекта. Исходя из специфики предметной области, сделан вывод о необходимости разработки проблемно-ориентированных методических средств, а на их основе - специализированной программной системы поддержки принятия решений переговорщиков при инициации проектов кооперационного производства в самолетостроении. Как формальную основу для построения таких систем предложено использовать агентный подход с элементами теории ситуационного управления. Результаты исследования проиллюстрированы с использованием условных сценариев.

Ключевые слова: самолетостроение; кооперационное производство; инициация проекта; система поддержки принятия решений; программные агенты; агентный подход; ситуационное управление; когнитивная карта.

Information support of the negotiation process at the stage of initiation of the cooperative production project in aircraft

Igor Shostak, Svetlana Kryvova, Alexander Zubanyov

Abstract. The peculiarities of the first stage (initiation) of negotiations on the organization of cooperative production of aircraft are considered. It is shown that this stage is characterized by an unacceptably high level of risk, due, on the one hand, the likelihood of significant additional financial costs during the project, and on the other - the loss of potential subcontractors, if no consensus is reached between negotiators. A critical review of existing computerized negotiation support systems was conducted. It is concluded that there is a problem that is insufficient efficiency of the negotiation process at the stage of initiating projects of cooperative production of aircraft due to, including, the lack of specialized computer information support, which in making appropriate decisions would allow to take into account the specifics stage of project initiation, and the subject domain "Cooperative production in aircraft". Based on the specifics of this problem, the purpose of the article is formulated, namely the development of effective means of information support for negotiations on cooperative production at the initial stage (initiation), which will save money, firstly, by reducing the negotiation time, and secondly - reducing irrational decisions that lead to additional costs during project implementation. Based on the specifics of the subject domain, the conclusion is made about the need to develop problem-oriented methodological tools, and on their basis - a specialized software system for decision support (DSS) negotiators in initiating projects of cooperative production in aircraft. As a formal basis for the construction of such systems, it is proposed to use an agent approach with elements of situational management theory. The results of the study are illustrated using conditional scenarios.

Keywords: aircraft; cooperative production; project initiation; decision support system; software agents; agent approach; situational management; cognitive map.

Information systems research

UDC 629.3.017.5 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.08

Yevgen Aleksandrov[1], Tetiana Aleksandrova[2], Yaroslav Morhun[2]

[1] Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine
[2] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine

ABOUT STABILITY OF THE MOVEMENT OF THE REFUELING VEHICLE EQUIPED WITH DIGITAL SYSTEM OF BRAKE FORCES DISTRIBUTION DURING THE EMERGENCY BRAKING

Abstract: The impact of enforced oscillations of the free surface of fuel in the car tank on the stability area of a closed digital brake force distribution system is considered. **The object of the study** is the process of stabilized movement of the tanker during the emergency braking. **The subject of the study** is a large tanker with a gross weight (3-3.5) $*10^4$ kg, equipped with a tank with a volume of (17-20) m^3 and a system of direction stability. **The goal of the work** is investigation of the impact of transported fuel fluctuations on the stability of the refueling vehicle during the emergency braking and introducing of methods for selecting values of variable parameters of the electronic brake force distribution system to minimize it. **Conclusion.** Considering the oscillations of the free surface of the liquid in the mathematical model of disturbed movement of a closed system of stability significantly reduces the stability area of the system in the low frequency range due to the loop, the size and position of which depend on the filling level of the tank. Need to choose an envelope loop that according to different levels of tank filling.

Keywords: refueling vehicle; system of brake forces distribution; stability area; variable parameters of system.

Introduction

Problem statement. The world's best models of refueling vehicles (RV) are equipped with automatic brake control systems, which consist of at least two parallel operating systems: anti-lock braking system (ABS), which prevents the wheels from locking when the brake pedal is pressed abruptly, and anti-slip system (TRC) that prevents the wheels from slipping caused by excessive pressure on the accelerator pedal.

Both ABS and TRC systems always control stability of vehicle direction, but the accuracy of traction control can be limited if using only these two systems. The VSC system (vehicle stability control) has become activated. This system can control the necessary indicators of vehicle stability during the braking process. However, the experience of RV usage indicates about valuable impact the transported fuel on the RV direction stability during the emergency braking. Based on this, the goal of this article is research of impact of variable parameters of electronic system for brake distribution and introduce the methodology of choosing them to minimize its impact.

Analysis of publications. Since the beginning of the XXI century, there has been widespread use of vehicle stability control systems (VSC) by automotive corporations in the United States, Japan, South Korea and the European Union. In parallel with practical development, these corporations conduct in-depth research of these systems to improve them [1-3]. The international scientific and technical conferences, which discuss the results of research on the development of electronic brake force distribution systems (EBD) [4 -8], are held on regular basis.

The EBD system works in combination with the ABS system and allows to distribute brake forces on wheels more effectively and to increase controllability and stability of vehicle during braking process. The above publications discuss VSC and EBD systems used in luxury passenger cars. Problems of increasing the heavily loaded refueling vehicle stability are studied by scientists of Ukraine, Belarus and Russia for such RVs: KrAZ [11-15], KAMAZ, URAL and MAZ [9, 10], which are equipped with tanks with a volume of 20 m^3. Belarusian researchers are developing ways to reduce the impact of fuel fluctuations in the RV tank by introducing special fuel tank construction, on the contrary Ukrainian and Russian scientists are developing ways to improve the VSC and EBD systems. Thus, in the article [11] the application of a block of command devices and algorithms of a platformless inertial system is proposed, and in [12] the structural and functional scheme of the electromagnetic system VSC is proposed. In [13, 14] the problem of parametric synthesis of the digital EBD system for KrAZ-63221 is solved. In [15], a mathematical model of the perturbed motion of the RV considering the oscillations of the free surface of the fuel in the tank presented. This model can be used to solve the problem of parametric synthesis of VSC and EBD systems.

Main part

In [15] it was proved that the longitudinal oscillations of the liquid in the tank have almost no effect on the RV stability. The vehicle stability in the process of emergency braking is significantly affected only by the first tone of transverse oscillations of the liquid in the tank. The mathematical model of perturbed motion of the vehicle in the jerking channel has the form:

$$\ddot{\psi}(t) = -\frac{BK_r}{I}\Delta p(t) - \frac{2H_m M f_c}{I}\upsilon(t)\dot{\psi}(t) + \\ + \left(f_c m_1^y / I\right)\cdot(H_n + h_1)\ddot{y}_1(t) + \left(f_c m_1^y / I\right)\cdot g y_1(t); \quad (1)$$

© Aleksandrov Ye., Aleksandrova T., Morhun Ya., 2021

$$\ddot{y}_1(t)+\varepsilon_1\dot{y}_1(t)+\omega_1^2 y_1(t)=-\upsilon(t)\dot{\psi}(t)-\Delta L\ddot{\psi}(t); \quad (2)$$

$$\Delta\ddot{p}(t)+\frac{f_k}{I_k}\Delta\dot{p}(t)+\frac{C_k}{I_k}\Delta p(t)=\bar{K}_u U(t). \quad (3)$$

The equation (1) describes the change of the angular deviation $\psi(t)$ of the vehicle longitudinal own inertia axis from an original movement direction in the process of emergency braking. The equation (2) describes the first tone of transverse oscillations of the liquid in the tank, and the variable $y_1(t)$ is a generalized coordinate of the partial layer of liquid in the tank, which corresponds to the first tone of transverse oscillations of the liquid. The equation (3) describes the dynamics of the electromagnetic amplifier (EMA) in the stability system VSC, where the variable $\Delta p(t)$ is the difference in working pressure in the brake lines of the right and left sides of the RV, and the variable $U(t)$ is the control signal generated by EBD system.

The coefficients of the differential equations (1) - (3) system contain the following values of the design parameters of the RV with the VSC system: M - mass of the RV; I - moment of inertia of the RV relative to its own vertical axis of inertia; B - track width of the RV; H_m - distance from the driving surface of the RV to its center of mass; H_n - distance from the driving surface to the bottom of the tank; ΔL is the distance from the center of mass of the RV to the center of the tank; f_c - coefficient of resistance to movement, which depends on the properties of the soil; I_k - moment of inertia of the rocker; I_k is the coefficient of fluid friction in the EMA axis; C_k - coefficient of rigidity of the spring that fixes the EMA rocker in the neutral state; h_1 is the distance from the bottom of the tank to the center of mass of the partial layer of liquid in the absence of its oscillations; ε_1 - damping coefficient (?) of transverse oscillations of the partial layer of the liquid corresponding to the first tone; ω_1 - own frequency of the first tone of transverse oscillations of the liquid in the tank; $K_r, \bar{K}_u$ - proportion coefficients.

Calculation formulas for the values of $m_1^y, h_1, \varepsilon_1$ and ω_1 are given in [15]. The system of differential equations (1) - (3) is nonlinear because the right-hand side of equations (1) and (2) includes nonlinear members which are containing the product $\upsilon(t)\dot{\psi}(t)$, where $\upsilon(t)$ is the current speed of the RV during braking. To simplify the construction of the stability area of VSC in the plane of the variable parameters of EBD, which forms a control algorithm:

$$U[nT]=K_\psi\psi[nT]+K_{\dot{\psi}}\omega_\psi[nT], \quad (4)$$

Let us use the method of "frozen" coefficients [16]. According to this method, at any given time

$$t_i\in[0,T_r],(i=\overline{1,s}), \quad (5)$$

where T_r is the deceleration time.

There is the value of $\upsilon(t)$ that is considered as constant and equal to $\upsilon(t_i),(i=\overline{1,s})$ in the mathematical model (1) - (3). It is assumed that if the system (1) - (3) at any time (5) is stable, then the system (1) - (3) is stable over the entire interval $[0,T_r]$. The method of "frozen" coefficients does not have a clear mathematical justification, but this method solves many practical problems of dynamic design of non-stationary objects.

Therefore, in the system (1) - (3) the RV speed will be considered constant $\upsilon(t)=\upsilon$. In this case, the system (1) - (3) is considered linear. To simplify next transformations, we introduce the following notations:

$$\frac{BK_r}{I}=a_{\psi p};\frac{2H_m M f_c}{I}=a'_{\psi\psi};$$

$$\frac{f_c m_1^y}{I}(H_n+h_1)=a''_{\psi y};$$

$$\frac{f_c m_1^y}{I}g=a_{\psi y};\frac{f_k}{I_k}=a'_{pp};\frac{C_k}{I_k}=a_{pp}$$

Then the continuous part of the closed RV stability system takes the form:

$$\begin{aligned}&\ddot{\psi}(t)+a_{\psi p}\Delta p(t)+a'_{\psi\psi}\upsilon(????)\dot{\psi}(t)-\\&\quad-a''_{\psi y}\ddot{y}_1(t)-a_{\psi y}y_1(t)=0;\\&\ddot{y}_1(t)+\varepsilon_1\dot{y}_1(t)+\omega_1^2 y_1(t)+\upsilon\dot{\psi}(t)\\&\quad+\Delta L\ddot{\psi}(t)=0;\\&\Delta\ddot{p}(t)+a'_{pp}\Delta\dot{p}(t)+a_{pp}\Delta p(t)=\bar{K}_u U(t).\end{aligned} \quad (6)$$

Let us write the system of differential equations (6) in vector and matrix form

$$A_1 p^2 Y(t)+B_1 pY(t)+C_1 Y(t)=DU(t), \quad (7)$$

where $Y(t)$ – a vector of system's (7) state:

$$Y(t)=\begin{bmatrix}\psi(t)\\ y_1(t)\\ \Delta p(t)\end{bmatrix},$$

and corresponding matrixes have the following form:

$$A_1=\begin{bmatrix}1 & -a''_{\psi y} & 0\\ \Delta L & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix};\quad B_1=\begin{bmatrix}a'_{\psi\psi} & 0 & 0\\ \upsilon & \varepsilon_1 & 0\\ 0 & 0 & a'_{pp}\end{bmatrix};$$

$$C_1=\begin{bmatrix}0 & -a_{\psi y} & a_{\psi p}\\ 0 & \omega_1^2 & 0\\ 0 & 0 & a_{pp}\end{bmatrix};\quad D=\begin{bmatrix}0\\ 0\\ \bar{K}_u\end{bmatrix}.$$

The equation (7) can be written as:

$$\begin{aligned}&p^2 Y(t)=-A_1^{-1}B_1 pY(t)-\\&-A_1^{-1}C_1 Y(t)+A_1^{-1}DU(t),\end{aligned} \quad (8)$$

moreover:

$$A_1^{-1}B_1 = \begin{bmatrix} \frac{a'_{\psi\psi}}{1+a''_{\psi y}\Delta L} + \frac{a''_{\psi y}\upsilon}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & \frac{a''_{\psi y}\varepsilon_1}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & 0 \\ -\frac{a'_{\psi\psi}\Delta L}{1+a''_{\psi y}\Delta L} + \frac{\upsilon}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & \frac{\varepsilon_1}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & 0 \\ 0 & 0 & a'_{pp} \end{bmatrix};$$

$$A_1^{-1}C_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{a_{\psi y}}{1+a''_{\psi y}\Delta L} + \frac{\omega_1^2}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & \frac{a_{\psi p}}{1+a''_{\psi y}\Delta L} \\ 0 & \frac{a_{\psi y}\Delta L}{1+a''_{\psi y}\Delta L} + \frac{\omega_1^2}{1+a''_{\psi y}\Delta L} & -\frac{a_{\psi p}\Delta L}{1+a''_{\psi y}\Delta L} \\ 0 & 0 & a_{pp} \end{bmatrix};$$

$$A_1^{-1}D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{K}_u \end{bmatrix}$$

Differential equation (8) can be transformed to the system of differential equations of 6th order:

$$\begin{aligned} \ddot{\psi} &= -b'_{\psi\psi}\dot{\psi}(t) - b'_{\psi y}\dot{y}_1(t) - b_{\psi y}y_1(t) - b_{\psi p}\Delta p(t); \\ \ddot{y}_1(t) &= -b'_{y\psi}\dot{\psi}(t) - b'_{yy}\dot{y}_1(t) - b_{yy}y_1(t) + b_{yp}\Delta p(t); \\ \Delta\ddot{p}(t) &= -a'_{pp}\Delta\dot{p}(t) - a_{pp}\Delta p(t) + \bar{K}_u U(t), \end{aligned} \quad (9)$$

The coefficients from the equation (9) are described below:

$$b'_{\psi\psi} = \frac{a'_{\psi\psi} + a''_{\psi y}\upsilon}{1+a''_{\psi y}\Delta L};$$

$$b'_{\psi y} = \frac{a''_{\psi y}\varepsilon_1}{1+a''_{\psi y}\Delta L}; b_{\psi y} = \frac{-a_{\psi y} + \omega_1^2}{1+a''_{\psi y}\Delta L};$$

$$b_{\psi p} = \frac{a_{\psi p}}{1+a''_{\psi y}\Delta L};$$

$$b'_{y\psi} = \frac{-a'_{\psi\psi}\Delta L + \upsilon}{1+a''_{\psi y}\Delta L}; b'_{yy} = \frac{\varepsilon_1}{1+a''_{\psi y}\Delta L};$$

$$b_{yy} = \frac{a_{\psi y}\Delta L + \omega_1^2}{1+a''_{\psi y}\Delta L}; b_{yp} = (-)\frac{a_{\psi p}\Delta L}{1+a''_{\psi y}\Delta L}.$$

The vector of system's state is used to transform the equation (9) to the normal form:

$$X(t) = \begin{bmatrix} \psi(t) \\ \dot{\psi}(t) \\ y(t) \\ \dot{y}(t) \\ \Delta p(t) \\ \Delta\dot{p}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \end{bmatrix};$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t); \\ \dot{x}_2(t) &= -b'_{\psi\psi}x_2(t) - b_{\psi y}x_3(t) - b'_{\psi y}x_4(t) - \\ &\quad - b_{\psi p}x_5(t); \\ \dot{x}_3(t) &= x_4(t); \\ \dot{x}_4(t) &= -b'_{y\psi}x_2(t) - b_{yy}x_3(t) - b'_{yy}x_4(t) + b_{yp}x_5(t); \\ \dot{x}_5(t) &= x_6(t); \\ \dot{x}_6(t) &= -a'_{pp}x_5(t) - a_{pp}x_6(t) + \bar{K}_u U(t), \end{aligned} \quad (10)$$

or it can be presented as the equation in matrix form:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t), \quad (10)$$

matrixes A and B are described below:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -b'_{\psi\psi} & -b_{\psi y} & -b'_{\psi y} & -b_{\psi y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -b'_{y\psi} & -b_{yy} & -b'_{yy} & b_{yp} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -a'_{pp} & -a_{pp} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \bar{K}_u \end{bmatrix}; \quad (11)$$

Formula (4) can be written as follows:

$$U[nT] = KX[nT], \quad (12)$$

where the vector K is:

$$K = \begin{bmatrix} K_\psi & K_{\dot{\psi}} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

According to [16] the transition from a continuously discrete closed system (11), (13) to a discrete closed system can be made:

$$X[(n+1)T] = [\Phi + HK]X[nT]. \quad (14)$$

With a characteristic equation

$$\det = [\Phi + HK - EZ] = 0, \quad (15)$$

where matrixes Φ and H can be described using the following formulas:

$$\Phi = \sum_{i=0}^{\infty}\frac{1}{i!}A^iT^i; H = \sum_{i=0}^{\infty}\left[\frac{1}{(i+1)!}A^iT^{i+1}\right]B.$$

Of course, when using modern on-board digital computers with a small value of the quantization period the following is assumed:

$$\Phi = E + AT; H = BT,$$

then the characteristic equation (16) takes the form:

$$\det[AT + BKT + E(1-Z)] = 0 \quad (16)$$

Matrixes (12) and (14) can be inserted into characteristic equation (17). As the result:

$$\begin{aligned} &(1-Z)^6 - (1-Z)^5\left(a'_{pp} + b'_{yy} + b'_{\psi\psi}\right)T + \\ &+(1-Z)^4\begin{pmatrix} b'_{\psi\psi}b'_{yy} - b'_{y\psi}b'_{\psi y} + a'_{pp}b'_{yy} + \\ +a'_{pp}b'_{\psi\psi} + a_{pp} + b_{yy} \end{pmatrix}T^2 - \end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&-(1-Z)^3\begin{bmatrix} a'_{pp}\left(b'_{\psi\psi}b'_{yy}-b'_{y\psi}b'_{\psi y}\right)+\\ +a_{pp}\left(b'_{\psi\psi}+b'_{yy}\right)+b_{yy}a'_{pp}+\\ +b_{yy}b'_{\psi\psi}-b_{y\psi}b_{\psi y}\end{bmatrix}T^3-\\
&-(1-Z)^3 b_{\psi p}T^3\overline{K}_u K_{\dot\psi}+\\
&+(1-Z)^2\begin{bmatrix} a_{pp}\left(b'_{\psi\psi}b'_{yy}-b'_{y\psi}b'_{\psi y}\right)+b_{yy}+\\ +a'_{pp}\left(b_{yy}b'_{\psi\psi}-b'_{y\psi}b_{\psi y}\right)\end{bmatrix}T^4+\\
&+(1-Z)^2\left(b'_{\psi y}b_{yp}+b'_{yy}b_{\psi p}+b_{\psi p}\right)T^4\overline{K}_u K_{\dot\psi}-\\
&-(1-Z)\left(b_{yy}b'_{\psi\psi}-b'_{y\psi}b_{\psi y}\right)T^5-\\
&=(1-Z)\left(b_{\psi y}b_{\psi p}+b_{yy}b_{\psi p}\right)T^5\overline{K}_u K_{\dot\psi}-\\
&-(1-Z)\left(b'_{\psi y}b_{yp}+b'_{yy}b_{\psi p}\right)T^5\overline{K}_u K_{\dot\psi}+\\
&+\left(b_{\psi y}b_{\psi p}+b_{yy}b_{\psi p}\right)T^6\overline{K}_u K_{\dot\psi}=0
\end{aligned}
\tag{17}
$$

The following notations are introduced for simplifying of characteristic equation (18):

$$A_1(T)=\left(a'_{pp}+b'_{yy}+b'_{\psi\psi}\right)T;$$

$$A_2(T)=\begin{pmatrix} b'_{\psi\psi}b'_{yy}-b'_{y\psi}b'_{\psi y}+a'_{pp}b'_{yy}+\\ +a'_{pp}b'_{\psi\psi}+a_{pp}+b_{yy}\end{pmatrix}T^2;$$

$$A_3(T)=\begin{bmatrix} a'_{pp}\left(b'_{\psi\psi}b'_{yy}-b'_{y\psi}b'_{\psi y}\right)+a_{pp}\times\\ \times\left(b'_{\psi\psi}+b'_{yy}\right)+b_{yy}a'_{pp}+b_{yy}b'_{\psi\psi}-b_{y\psi}b_{\psi y}\end{bmatrix}T^3;$$

$$A_{31}(T)=b_{\psi p}T^3\overline{K}_u$$

$$A_4(T)=\begin{bmatrix} a_{pp}\left(b'_{\psi\psi}b'_{yy}-b'_{y\psi}b'_{\psi y}\right)+b_{yy}+\\ +a'_{pp}\left(b_{yy}b'_{\psi\psi}+b'_{y\psi}b_{\psi y}\right)\end{bmatrix}T^4;$$

$$A_{41}(T)=(b'_{\psi y}b_{yp}+b'_{yy}b_{\psi p})T^4\overline{K}_u;$$

$$A_{42}(T)=b_{\psi p}T^4\overline{K}_u;$$

$$A_5(T)=(b_{yy}b'_{\psi\psi}-b'_{y\psi}b_{\psi y})T^5;$$

$$A_{51}(T)=(b_{\psi y}b_{\psi p}+b_{yy}b_{\psi p})T^5\overline{K}_u;$$

$$A_{52}(T)=(b'_{\psi y}b_{yp}+b'_{yy}b_{\psi p})T^5\overline{K}_u;$$

$$A_6(T)=(b_{\psi y}b_{\psi p}+b_{yy}b_{\psi p})T^6\overline{K}_u.$$

Then the characteristic equation of closed digital VSC system takes the form:

$$
\begin{aligned}
&(1-Z)^6-(1-Z)^5A_1(T)+(1-Z)^4A_2(T)-\\
&-(1-Z)^3A_3(T)-(1-Z)^3A_{31}(T)K_{\dot\psi}+\\
&+(1-Z)^2A_4(T)+(1-Z)^2A_{41}(T)K_{\dot\psi}+\\
&+(1-Z)^2A_{42}(T)K_{\psi}-(1-Z)A_5(T)-(1-Z)\times\\
&\times A_{51}(T)K_{\dot\psi}-(1-Z)A_{52}(T)K_{\psi}+A_6(T)K_{\psi}=0.
\end{aligned}
\tag{18}
$$

The following replacement in characteristic (19) is possible using the W -transformation method:

$$Z=(1+W)/(1-W).$$

As a result, we obtain the new characteristic equation regarding complex variable W :

$$
\begin{aligned}
&\begin{bmatrix}-32A_1(T)+16A_2(T)-8A_3(T)+\\ +6A_4(T)-2A_5(T)\end{bmatrix}W^6+\\
&+\begin{bmatrix}32A_1(T)-32A_2(T)+24A_3(T)-\\ -16A_4(T)+10A_5(T)\end{bmatrix}W^5+\\
&+[16A_2(T)-24A_3(T)+24A_4(T)-20A_5(T)]W^4+\\
&=[8A_3(T)-16A_4(T)+20A_5(T)]W^3+\\
&[4A_4(T)-10A_5(T)]W^2+2A_5(T)W+64+\\
&+K_{\dot\psi}\{[-8A_{31}(T)+4A_{41}(T)-2A_{51}(T)]W^6+\\
&+[24A_{31}(T)-16A_{41}(T)+10A_{51}(T)]W^5+\\
&+[-24A_{31}(T)+24A_{41}(T)-20A_{51}(T)]W^4+\\
&+[8A_{31}(T)-16A_{41}(T)+20A_{51}(T)]W^3+\\
&+[4A_{41}(T)-10A_{51}(T)]W^2+2A_{51}(T)W\}+\\
&+K_{\psi}\{[4A_{42}(T)-2A_{52}(T)+A_6(T)]W^6+\\
&+[-16A_{42}(T)+10A_{52}(T)-6A_6(T)]W^5+\\
&+[24A_{42}(T)-20A_{52}(T)+15A_6(T)]W^4+\\
&+[-16A_{42}(T)+20A_{52}(T)-20A_6(T)]W^3+\\
&+[4A_{42}(T)-10A_{52}(T)+15A_6(T)]W^2+\\
&+[2A_{52}(T)-6A_6(T)]W+A_6(T)\}=0.
\end{aligned}
\tag{19}
$$

The replacement $w=j\omega$ can be done within the characteristic equation (20). If real and imaginary parts are equal to 0, then the following system of 2 algebraic equations with two unknown parameters K_{ψ} and $K_{\dot\psi}$ will be obtained.

$$
\begin{aligned}
A(\omega,T)K_{\psi}+B(\omega,T)K_{\dot\psi}&=C(\omega,T);\\
D(\omega,T)K_{\psi}+E(\omega,T)K_{\dot\psi}&=F(\omega,T),
\end{aligned}
\tag{20}
$$

Within the system the following notation are accepted:

$$
\begin{aligned}
&A(\omega,T)=-[4A_{42}(T)-2A_{52}(T)+A_6(T)]\omega^6+\\
&+[24A_{42}(T)-20A_{52}(T)+15A_6(T)]\omega^4-\\
&-[4A_{42}(T)-10A_{52}(T)+15A_6(T)]\omega^2+A_6(T);
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&B(\omega,T)=-[-8A_{31}(T)+4A_{41}(T)-2A_{51}(T)]\omega^6+\\
&+[-24A_{31}(T)+24A_{41}(T)-20A_{51}(T)]\omega^4-\\
&-[4A_{41}(T)-10A_{51}(T)]\omega^2;
\end{aligned}
$$

$$C(\omega,T)=\begin{bmatrix}-32A_1(T)+16A_2(T)-8A_3(T)+\\ +6A_4(T)-2A_5(T)\end{bmatrix}\omega^6-$$

$$-\begin{bmatrix} 16A_2(T)-24A_3(T)+24A_4(T)- \\ -20A_5(T)]\omega^4+[4A_4(T)-10A_5(T) \end{bmatrix}\omega^2-64;$$

$$D(\omega,T)=[-16A_{42}(T)+10A_{52}(T)-6A_6(T)]\omega^4-$$
$$-[-16A_{42}(T)+20A_{52}(T)-20A_6(T)]\omega^2+$$
$$+2A_{52}(T)-6A_6(T);$$

$$E(\omega,T)=[24A_{31}(T)-16A_{41}(T)+10A_{51}(T)]\omega^4-$$
$$-[8A_{31}(T)-16A_{41}(T)+20A_{51}(T)]\omega^2+2A_{51}(T);$$

$$F(\omega,T)=-\begin{bmatrix} 32A_1(T)-32A_2(T)+24A_3(T)- \\ -16A_4(T)+10A_5(T) \end{bmatrix}\omega^4+$$
$$+[8A_3(T)-16A_4(T)+20A_5(T)]\omega^2-2A_{51}(T).$$

The system (21) is solved using the Cramer rule, where the corresponding determinants are written in the following form:

$$\Delta=\begin{vmatrix} A(\omega,T) & B(\omega,T) \\ D(\omega,T) & E(\omega,T) \end{vmatrix}=$$
$$=A(\omega,T)E(\omega,T)-D(\omega,T)B(\omega,T);$$

$$\Delta_\psi=\begin{vmatrix} C(\omega,T) & B(\omega,T) \\ F(\omega,T) & E(\omega,T) \end{vmatrix}=$$
$$=C(\omega,T)E(\omega,T)-F(\omega,T)B(\omega,T);$$

$$\Delta_{\dot\psi}=\begin{vmatrix} A(\omega,T) & C(\omega,T) \\ D(\omega,T) & F(\omega,T) \end{vmatrix}=$$
$$=A(\omega,T)F(\omega,T)-D(\omega,T)C(\omega,T).$$

Then we get the following relationships for building the stability areas:

$$K_\psi=\frac{\Delta_\psi}{\Delta};K_{\dot\psi}=\frac{\Delta_{\dot\psi}}{\Delta}. \quad (21)$$

By changing the value of $.\omega.$ from zero to infinity, the boundary of the stability area in plane $\left(\mathrm{K}_\psi,\mathrm{K}_{\dot\psi}\right)$ is built. The determinant Δ is positive, so when the value of ω increases, the boundary of the stability area should be hatched on the left.

Calculation results

The boundaries of stability areas of closed digital single-circuit VSC were calculated for the RV KrAZ-63221 with the following parameters: tank volume 20 m^3, length 6 m, width 2,4 m and height 1,4 m. The values of mathematical model parameters are:

$$\mathrm{a}_{\psi p}=0,27\times10^{-6}\mathrm{m}^2\mathrm{N}^{-1}\mathrm{s}^{-2};\mathrm{a}'_{\psi\psi}=0,01\mathrm{m}^{-1};$$
$$\mathrm{a}_{pp}=1,03\times10^4\mathrm{s}^{-2};\mathrm{a}'_{pp}=0,56\times10^2\mathrm{s}^{-1};$$
$$\overline{\mathrm{K}}_\mathrm{u}=1,03\times10^8\mathrm{V}^{-1}\mathrm{Psc}\times\mathrm{s}^{-2};\Delta\mathrm{L}=1\mathrm{m};\upsilon=18\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1};$$

Stability areas are calculated for three cases with different values of fuel level in the tank.

The first case corresponds to the $\mathrm{h}=0,15\mathrm{m}$ $h=0,15\,m$fuel level, the second case - $\mathrm{h}=0,5\mathrm{m}$ $h=0,5\,m$fuel level, and the third case - $\mathrm{h}=0,75\mathrm{m}$.

The values of mathematical model (B) parameters that depend on fuel level for these three cases are listed in the table 1.

Table 1 – **Dependence of mathematical model (B) coefficients on the fuel level in tank**

Coefficient / Fuel level	$\mathrm{a}_{\psi y},\mathrm{m}^{-1}\mathrm{s}^{-2}$	$\mathrm{a}''_{\psi y},\mathrm{m}^{-1}$	ω_1,Hz	ε_1,s^{-1}
0,15 m	0,021	0,0024	0,2	0,00318
0,5 m	0,045	0,0069	0,42	0,0067
0,75 m	0,056	0,0100	0,5	0,0080

The stability areas of closed digital single-circuit VSC of vehicle for specified values of mathematical model (6) parameters for the 3 considered cases are shown in Fig. 1 with the following designations:

1 – the lower boundary of the stability area part for the case with "solidified" fuel;

2 – the lower boundary of the stability area part for the case with the height of the free surface of fuel $\mathrm{h}=0,15\mathrm{m}$ and speed $\upsilon=18\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1}$;

3 – the lower boundary of the stability area part for the case with $\mathrm{h}=0,15\mathrm{m}$ and $\upsilon=12\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1}$;

4 – the lower boundary of the stability area part for the case with $\mathrm{h}=0,15\mathrm{m}$ and $\upsilon=6\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1}$;

5 – the lower boundary of the stability area part for the case with $\mathrm{h}=0,5\mathrm{m}$ and $\upsilon=18\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1}$;

6 – the lower boundary of the stability area part for the case with $\mathrm{h}=0,75\mathrm{m}$ and $\upsilon=18\mathrm{m}\times\mathrm{s}^{-1}$;

7 – the line is enveloping the lower boundary of the stability area parts of the single-circuit VSC;

8 – the enveloping line of the lower boundary of the stability area parts of the double-circuit VSC;

A,B and C – specific points of the closed VSC stability area:

the closed system is not stable in A point;

the closed system is right on the border of the system stability area in B point;

both single- and double-circuit systems are stable in C point.

Conclusions

The VSC stability area in the low frequency range is significantly decreased by considering oscillations of the liquid free surface in the tank in the mathematical model of perturbed motion.

Decreasing the speed of RV during the breaking process causes increasing RV stability.

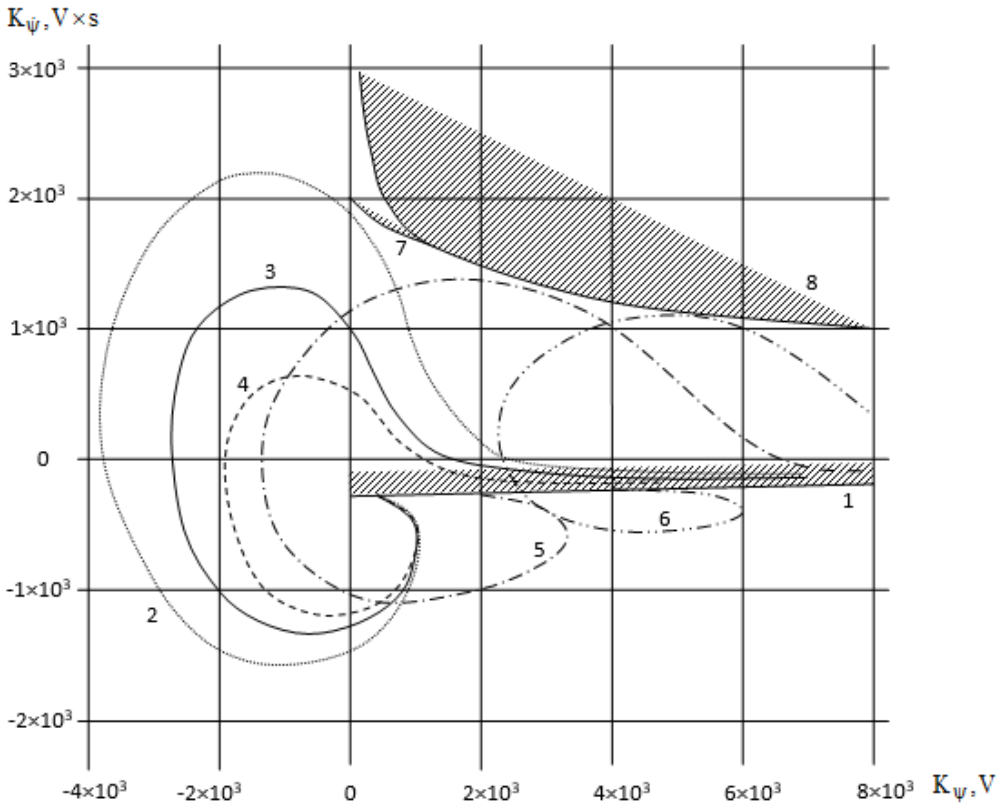


Fig.1. The VSC's stability area boundaries within low frequencies zone 0-1 Hz

Increasing level of loading the tank by fuel causes increasing of natural frequency of the fuel free surface oscillations and decreasing their amplitude.

The envelop loop, that corresponds to different height of fuel free surfaces, asymptotically approaches to the lowest part of the stability area when fuel is "hardened". The envelop loop, that corresponds to different tank loading levels, should be chosen as the lowest boundary of the varied parameters permissible values area of the RV digital VSC controller.

REFERENCES

1. Tavernini, D., Velenis, E. and Longo S. (2017), "Feedback brake distribution control for minimum pitch", *Vehicle System Dynamics*, Vol. 55, No. 6, pp. 902-923.
2. Fujimoto, H. and Narada, S. (2015), "Model-Based Range Extension Control System for Electric Vehicles Witch Front and Rear Driving – Braking Force Distribution", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 5, pp. 3245-3254.
3. Gong, X., Qian, L., Ge, W. and Yan, J. (2020), "Research on Electronic Brake Force Distribution and Anti-Lock Brake of Based on Direct Drive Electro Hydraulic Actuator", *Int. Journal of automotive Engineering*, Vol. 11, No. 2, pp. 22-29.
4. Tavernini, D., Velenis, E. and Longo, S. (2015), "Model-Based Active Brake Force Distribution for Pitch Angle Minimization", *IEEE 54-th Conference on Decision and Control*, December 15-18, Osaka, Japan, pp. 197-202.
5. Nakamura, E., Soga, M., Sacai, A., Otomo, A. and Kobayashi, T. (2002), "Development of Electronically Controlled Brake System for Hybrid Vehicle", *SAE 2002 World Congress*, Detroit, Michigan, March 4-7, printed in USA, 6 p.
6. Park, G. and Coi, S.B. (2016), "Optimal Brake Distribution for Electronic Stability Control Using Weighted Least Square Allocation Method", *16 International Conference on Control Automation and Systems (ICCAS 2016)*, Oct. 16-19, 2016 in HICO, Gyeongju, Korea, pp. 1420-1425.
7. Wu, Xinyu (2015), "Control Strategy and Algorithm Study on Light Vehicle Electronic Mechanical Braking System", *5-th International Conference on Education, Management, Information and Medicine (EMJM 2015)*, pp. 1453-1458.
8. Her, H., Cho, W. and Yi, K. (2011), "Vehicle Stability Control Using Individual Brake Force Based on Tire Force Information", *14-th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Washington, USA, October 5-7, pp. 22-29.
9. Vysotsky, M.S., Pleskachevsky, Yu.M., Shimanovsky, A.O. and Kuznetsova M.G. (2012), "Ensuring the traffic safety of tankers based on optimization of the body structure", *Mechanics of machines, mechanisms and materials*, No. 3 (20) - 4 (21), pp. 142-148.
10. Shimanovsky, A.O. (2009), "Constructive solutions to ensure the safety of the movement of tanks (review)", *Problems of mechanical engineering and automation*, no. 1, pp. 44-59.
11. Alexandrov, E.E., Volontsevich, D.O., Kononenko, V.A. and Podrigalo, M.A. (2007), *Improving the stability and controllability of wheeled vehicles in braking modes*, NTU "KhPI", Kharkiv, 320 p.
12. Alexandrov, E.E., Alexandrova, T.E. and Ovcharenko Yu.Ye. (2019), *Improving the technical and ergonomic characteristics of mobile military objects*, KhNADU, Kharkiv, 176 p.
13. Alexandrov, Ye., Alexandrova, T. and Morhun, Ya. (2019), "Parametric Synthesis of the Electronic Control Unit of the Course Stability System of the Car", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, No. 6/9(102), pp. 39-45.

14. Alexandrov, Ye., Alexandrova, T., Kostianyk, I. and Morhun, Ya. (2020), “Parametric Synthesis a Non-Stationary Automatic Control System of the Course Stability of the Car”, Advanced Information Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 51-59, DOI: http://dx.doi.org/10.20998/2522-9052.2020.2.10
15. Kozhushko, A.P. and Grigor'ev, O.L. (2018), “Mathematical modeling of low-frequency kolivan in a viscous line in a horizontal unit with a vertical surface”, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: mathematical modeling in technical and technology*, No. 3 (1271), pp. 41-51.
16. Igdalov, I.M., Kuchma, L.D., Polyakov, N.V. and Sheptunб Y.D. (2010), *Dynamic missile design*, DNU,. Dnepropetrovsk, 264 p.

Надійшла (received) 27.07.2021
Прийнята до друку (accepted for publication) 08.09.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Александров Євген Євгенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автомобілів, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна;
Yevgen Aleksandrov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of automobiles Department, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrov.ye.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-7525-6383.

Александрова Тетяна Євгеніївна – доктор технічних наук, професор кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Tetiana Aleksandrova – Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: aleksandrova.t.ye@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-9596-0669.

Моргун Ярослав Юрійович – аспірант кафедри «Системний аналіз та інформаційно-аналітичні технології», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Yaroslav Morgun – graduate student Department of Systems Analysis and Information-Analytical Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yarki95@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-7399-4937.

Про стійкість руху автомобіля – паливозаправника з цифровою системою розподілу гальмівних зусиль в режимі екстреного гальмування

Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, Я. Ю. Моргун

Анотація. Розглядається вплив вимушених коливань вільної поверхні палива в цистерні автомобіля-паливозаправника на область стійкості замкненої цифрової системи розподілу гальмівних зусиль. Об’єктом дослідження являється процес стабілізованого руху автомобіля-паливозаправника в режимі термінового (екстреного) гальмування. Предметом дослідження являється великогабаритний автомобіль-паливозаправник повною масою (3-3,5)*10^4 кг, оснащений цистерною об’ємом (17-20) м^3 та системою курсової стійкості. Метою роботи є дослідження впливу коливань транспортуємого палива на стійкість руху автомобіля-паливозаправника в режимі термінового(екстреного) гальмування і запровадження методики вибору значень варійованих параметрів електронної системи розподілу гальмівних зусиль для його мінімізації. Висновки. Урахування коливань вільної поверхні рідини в математичній моделі збуреного руху замкненої системи курсової стійкості значно зменшує область стійкості системи в діапазоні низьких частот за рахунок петлі, розмір і положення якої залежать від рівня заповнення цистерни у якості нижньої межі області стійкості замкненої системи курсової стійкості автомобіля-паливозаправника слід обирати огинаючу петлю, що відповідає різним рівням заповнення цистерн.

Ключові слова: автомобіль-паливозаправник; система розподілу гальмівних зусиль; область стійкості; варійовані параметри системи.

Об устойчивости движения автомобиля – топливозаправщика с цифровой системой распределения тормозных усилий в режиме экстренного торможения

Е. Е. Александров, Т. Е. Александрова, Я. Ю. Моргун

Аннотация. Рассматривается влияние вынужденных колебаний свободной поверхности топлива в цистерне автомобиля-топливозаправщика на область устойчивости замкнутой цифровой системы распределения тормозных усилий. **Объектом исследования** является процесс стабилизированного движения автомобиля-топливозаправщика в режиме срочного (экстренного) торможение. **Предметом исследования** является крупногабаритный автомобиль-топливозаправщик массой (3-3,5) * 10^4 кг, оснащен цистерной объемом (17-20) м^3 и системой курсовой устойчивости. **Целью работы** является исследование влияния колебаний транспортируемой топлива на устойчивость движения автомобиля-топливозаправщика в режиме срочного (экстренного) торможение и внедрение методики выбора значений варьируемых параметров электронной системы распределения тормозных усилий для его минимизации. **Выводы.** Учет колебаний свободной поверхности жидкости в математической модели возмущенного движения замкнутой системы курсовой устойчивости значительно уменьшает область устойчивости системы в диапазоне низких частот за счет петли, размер и положение которой зависит от уровня заполнения цистерны в качестве нижней границы области устойчивости замкнутой системы курсовой устойчивости автомобиля-топливозаправщика следует выбирать огибающую петлю, соответствующую различным уровням заполнения цистерн.

Ключевые слова: автомобиль-топливозаправщик; система распределения тормозных усилий; область устойчивости; варьируемые параметры системы.

УДК 004.65 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.09

А. С. Карпенко[1], О. М. Тарасюк[2], А. В. Горбенко[1, 3]

[1] Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна
[2] Одеський технологічний університет «ШАГ», Одеса, Україна
[3] Leeds Beckett University, Лідс, Великобританія

ДОСЛІДЖЕННЯ УЗГОДЖЕНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ У НЕРЕЛЯЦІЙНИХ РЕПЛІКОВАНИХ БАЗАХ ДАНИХ

Анотація. Метою даної статі є дослідження продуктивності розподілених відмовостійких інформаційних систем та нереляційних сховищ даних, а також аналізу впливу параметрів узгодженості даних на швидкодію та пропускну здатність на прикладі трьох-реплікованого кластеру Cassandra. **Результати.** У статті наведено результати навантажувального тестування (бенчмаркінгу) продуктивності операцій читання та запису кластера Cassandra, репліки якого було розгорнуто на ресурсах хмарного провайдера Amazon Web Services. Представлені кількісні результати показують, як різні налаштування узгодженості впливають на продуктивність Cassandra під час різних робочих навантаженнях в умовах, коли всі репліки розташовані в одному центрі обробки даних (ЦОД), або ж географічно розподілені по різним ЦОД. **Висновок.** Запропоновано метод мінімізації часових затримок Cassandra при гарантуванні строгої узгодженості даних на основі оптимізації налаштувань узгодженості в залежності від поточного робочого навантаження та пропорції між операціями читання та запису.

Ключові слова: NoSQL; база даних Cassandra; теорема CAP; компроміс; узгодженість; затримки; продуктивність; порівняльний аналіз.

Вступ

На сьогоднішній день, бази даних NoSQL (Non SQL або Not only SQL) [1] широко застосовуються при побудові розподілених комп'ютерних систем, включаючи соціальні мережі та різноманітні Інтернет-додатки. Сховища даних NoSQL, призначені для забезпечення горизонтального масштабування, також пропонуються хмарними провайдерами у якості послуги. Концепція нереляційних баз даних NoSQL була запропонована для ефективного зберігання та забезпечення швидкого доступу до великих обсягів інформації, т.зв. Big Data, що неможливо досягти використовуючи традиційні системи управління реляційними базами даних. Більшість NoSQL сховищ жертвують гарантіями ACID (Atomicity, Consistency, Isolation, Durability) на користь властивостей BASE (Basically Available, Soft state, Eventually consistent) [2], що є вимушеною платою за можливість розподіленої обробки даних та горизонтального масштабування.

У цій статті досліджується можливість досягнення компромісу між узгодженістю даних, доступністю системи та часовими затримками. Хоча наявність якісного взаємозв'язку між цими характеристиками була зазначена у теоремі CAP (Consistency-Availability-Partition tolerance) [3], встановлення кількісних відношень між ними є ключовим для ефективного використання NoSQL рішень. Незважаючи на бурхливий розвиток ринку нереляційних сховищ даних, галузеві тенденції свідчать про те, що Apache Cassandra входить до трійки лідерів цього ринку разом із MongoDB та HBase [4]. Оцінка та порівняння продуктивності різних баз даних NoSQL є актуальним напрямом наукових та практичних досліджень. З цією метою більшість з наявних робіт за цим напрямком, зокрема [5-8], використовують засоби навантажувального випробування (наприклад, Yahoo! Cloud Serving Benchmark, YCSB [5]). Опубліковані результати показують, що залежно від сценарію використання, умов розгортання, використовуваного навантаження та налаштувань бази даних, будь-яка база даних NoSQL може перевершити інші за певними показниками. Однак треба відмітити [9-11], що існуючі наукові доробки як правило не враховують взаємозалежність між узгодженістю інформації та продуктивністю реплікованих нереляційних баз даних, а також не досліджують, як параметри узгодженості впливають на затримку виконання операцій читання та запису.

Метою даної роботи є дослідження продуктивності, а також встановлення кількісного взаємозв'язку між узгодженістю інформації та швидкодією бази даних NoSQL, використовуючи Cassandra, в якості типового прикладу розподілених нереляційних сховищ даних з реплікацією. Apache Cassandra пропонує набір унікальних функцій (наприклад, можливість налаштування рівня узгодженості, надзвичайно швидкий запис інформації, можливість роботи в географічно розподілених центрах обробки даних, тощо) та забезпечує високу доступність без єдиної точки відмови, що робить її однією з найбільш гнучких і популярних NoSQL рішень. У статті ми також пропонуємо підхід до оптимального вибору параметрів узгодженості операцій читання та запису для забезпечення максимальної швидкодії гарантуючи строгу узгодженість даних при змішаних робочих навантаженнях.

1. Модель компромісів між узгодженістю, доступністю та швидкодією розподілених баз даних

Реплікація даних на декількох обчислювальних вузлах є традиційним методом підвищення продуктивності та надійності в розподілених інформаційних системах та активно використовуються в нереляційних базах даних. Проте, наявність багатьох реплік ускладнює процес забезпечення узгодженості даних, а також підвищує ймовірність розподілення системи (тобто втрати зв'язку з однією або кількома репліками) особливо за умов глобального розподілу реплік.

 © Карпенко А. С., Тарасюк О. М., Горбенко А. В., 2021

Теорема CAP, яка вперше з'явилася в 1998-1999 рр., визначає взаємозв'язок між узгодженістю даних (Consistency), доступністю системи (Availability) та стійкістю до розподілення (Partition tolerance), стверджуючи, що в розподілених реплікованих інформаційних системах одночасно можуть виконуватися лише дві з цих трьох властивостей [3]. В роботі [4] розглядають теорема CAP розглядається, як окремий випадок більш загальної системи компромісів між узгодженістю, доступністю та часовими затримками (швидкодією) в розподілених інформаційних системах.

Дійсно, ступінь реплікації (кількість наявних реплік даних), доступність системи, узгодженість даних та затримка обслуговування (час відгуку) тісно пов'язані. Більше того, ми вважаємо, що ці властивості потрібно розглядати як безперервні, а не бінарні величини. Доступність системи можна інтерпретувати, як ймовірність того, що кожен запит клієнта врешті отримує відповідь. Відсутність відповіді від деяких реплік протягом зазначеного тайм-ауту спричиняє розділення реплікованої системи. Повільний канал передачі інформації, перевантаження будь якого компоненту системи (тобто репліки) або неоптимальні налаштування часу очікування можуть призвести до помилкового рішення про те, що система стала розділеною. Коли система виявляє факт розділення, вона повинна вирішити, чи повертати клієнту потенційно неузгоджену інформацію, або ж надіслати у відповідь повідомлення про помилку або ж виняткову ситуацію, яке порушує доступність системи. Узгодженість – це також континуум, який варіюється від слабкої узгодженості (weak consistency) в одній крайності до сильної узгодженості (strong consistency) в іншій, з різними точками умовної узгодженості, або узгодженості в кінцевому підсумку (eventual consistency) між ними.

Повністю запобігти розділенню системи, яке трапляється внаслідок перевантаження середовища передачі, втрати повідомлень, хакерські атаки або збої та відмови компонентів неможливо, а отже, необхідно обирати між доступністю системи та узгодженістю інформації.

Розробники сучасних розподілених інформаційних систем та веб-додатків, таких як Facebook, Twitter тощо, часто вирішують послабити вимоги щодо узгодженості, запроваджуючи асинхронні оновлення даних, щоб досягти більшої доступності системи та забезпечити більш швидку реакцію. Проте найбільш раціональним підходом є динамічне балансування цих властивостей.

База даних Cassandra NoSQL пропонує гнучкий механізм налаштування рівня узгодженості для досягнення компромісу між доступністю, швидкодією та достовірністю.

Рівень узгодженості між даними, що зберігаються на різних вузлах-репліках можна контролювати для кожної окремої операції читання або оновлення інформації. Рівень узгодженості при виконанні операції читання даних визначає скільки вузлів-реплік має відповісти на запит перед поверненням даних клієнту. Найбільш актуальна версія даних обирається на основі порівняння часовою мітки відповіді, отриманої від кожної репліки.

У свою чергу, рівень узгодженості при виконанні операцій запису або оновлення визначає кількість реплік, які повинні підтвердити успішність виконання операції запису/оновлення (треба відзначити, що технічно немає ніякої різниці між операціями запису та оновлення). Усі операції читання та запису/оновлення Cassandra підтримують наступні основні параметри узгодженості:

- ONE: дані повинні бути записані в журнал транзакцій принаймні одного вузла-репліки, перш ніж успішність операції запису буде підтверджена клієнту; під час читання даних Cassandra запитує та повертає відповідь з однієї репліки (найближчої репліки з найменшою затримкою мережі); рівень узгодженості ONE забезпечує найбільшу швидкодію бази даних, але ж не гарантує, що клієнт отримає найбільш актуальну копію інформації;
- TWO: дані повинні бути записані щонайменше на два вузли-репліки перед підтвердженням; операція читання запрошує відповідь з двох найближчих реплік (найсвіжіші дані визначаються порівнянням міток часу записів, повернутих цими двома репліками);
- THREE: схожа на TWO, але для трьох реплік;
- QUORUM: кворум вузлів повинен підтвердити запис інформації або повернути відповідь на запит на читання; кворум обчислюється округленням до цілого числа наступної оцінки: *загальна_кількість_реплік*/2 + 1;
- ALL: дані повинні бути записані на всі вузли реплік у кластері перед підтвердженням; операція читання гарантує строгу узгодженість даних тобто гарантує повернення найбільш актуальної версії даних за рахунок очікування та порівнянні відповідей від усіх реплік; операція читання не вдасться, навіть якщо одна репліка не відповідає; вочевидь рівень узгодженості ALL буде мати найгіршу швидкодію.

Якщо репліки Cassandra розподілені по декількох центрах обробки даних (ЦОД), клієнту також будуть доступні кілька додаткових рівнів узгодженості, що визначають узгодженість даних для кожного ЦОД:

- EACH_QUORUM;
- LOCAL_QUORUM;
- LOCAL_ONE.

Якщо узгодженість даних є головним пріоритетом та необхідно забезпечити, щоб всі операції читання завжди повертали найновіші оновлення, необхідно, щоб сума вузлів які використовуються в операціях читання та запису перевищувала коефіцієнт реплікації, тобто загальну кількість реплік. Це завжди забезпечує строгу узгодженість даних. В іншому випадку можлива тільки імовірнісна узгодженість. Наприклад, строга узгодженість забезпечується, якщо:

- рівень узгодженості QUORUM встановлюється як для запитів запису, так і для читання;
- рівень узгодженості ONE встановлюється для запису та ALL для читання;
- рівень узгодженості ALL встановлюється для запису та ONE для читання.

Чим слабший рівень узгодженості, тим швидше Cassandra виконує обробку операцій читання та запису. За рахунок перерозподілу кількості вузлів, що використовуються для виконання читання та запису інформації користувачі Cassandra можуть надавати пріоритет продуктивності для одного або іншого типу операцій, все ще гарантуючи строгу узгодженість даних.

2. Навантажувальне тестування продуктивності Cassandra

У цьому та наступному розділах наведено методологія оцінки продуктивності NoSQL бази даних Cassandra та надано отримані експериментальні результати, які показують, як налаштування узгодженості впливають на час обслуговування запитів читання та запису. В якості тестового середовища ми розгорнули 3-реплікований кластер Cassandra у публічному хмарному провайдері Amazon Web Services. Коефіцієнт реплікації рівний 3 є найбільш типовою установкою для багатьох сучасних розподілених обчислювальних систем та Інтернет-додатків, включаючи Amazon S3, Amazon EMR, Facebook Haystack, DynamoDB тощо. Було досліджено два найбільш поширених варіанту розгортання кластеру Cassandra: *централізований* (рис. 1) та *розподілений* (рис. 2).

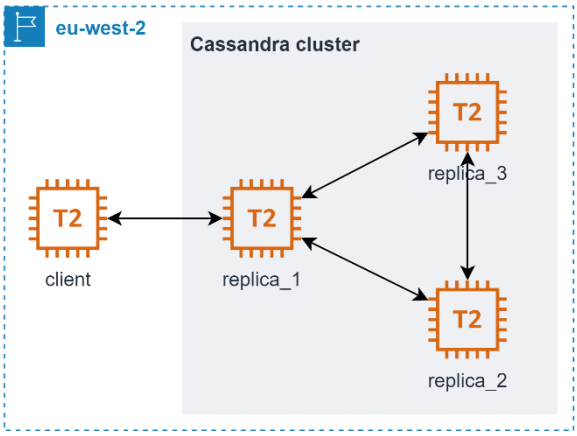


Рис. 1. Централізований кластер Cassandra
(**Fig. 1.** Cassandra centralized cluster)

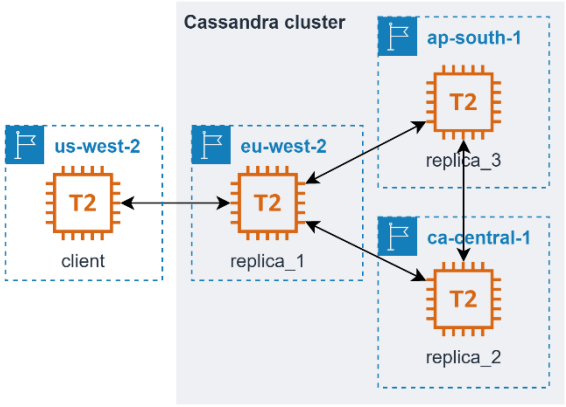


Рис. 2. Розподілений кластер Cassandra
(**Fig. 2.** Cassandra distributed cluster)

У першому випадку всі три репліки, а також клієнтська станція яка використовувалась для генерації клієнтських запитів були розташовані в одному ЦОД, а саме eu-west2. Такий варіант організації кластеру Cassandra характерний для побудови корпоративних систем збору та обробки великих даних. У випадку розподіленого кластеру клієнтська станція, а також всі три репліки кластера було розгорнуто у різних географічних регіонах Amazon: us-west-2, eu-west2, ca-central, ap-south-1. Такий варіант моделює роботу глобально-розподіленої інформаційної системи, клієнти якої також знаходяться у різних куточках мережі Інтернет, що характерно, наприклад, для соціальних мереж, або ж систем з високими вимогами до катастрофостійкості.

В усіх випадках використовувалися екземпляри віртуальних машин t2.xlarge (vCPU – 4, оперативна пам'ять – 16 ГБ, SSD – 2x50 ГБ, ОС – Ubuntu Server 16.04 LTS). Для навантажувального тестування продуктивності кластеру Cassandra було застосовано фреймворк YCSB (Yahoo! Cloud Serving Benchmark), який вважається еталоном для оцінки продуктивності хмарних інформаційних систем та баз даних NoSQL, таких як Cassandra, MongoDB, Redis, HBase та інші. YCSB - це проект Java з відкритим кодом. Структура YCSB включає шість готових робочих навантажень, кожен з яких тестує різні загальноприйняті сценарії використання з певної суміщу операцій читання та запису наприклад, 50/50, 95/5, тощо.

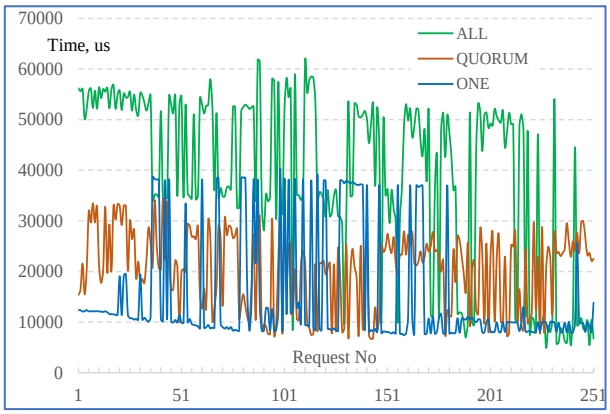
Перед початком тестування було створено та заповнено тестову базу даних YCSB, яка є таблицею записів. Кожен запис ідентифікується первинним ключем і включає F-рядкові поля. Значення, записані в ці поля, є випадковими рядками ASCII довжиною L байт. За замовчуванням F дорівнює 10, а L дорівнює 100, що створює 1000 байтові записи.

Клієнт YCSB – це програма Java, яка генерує дані для завантаження в базу даних, а потім виконує тестування її продуктивності шляхом генерації багатьох клієнтських запитів. Деякі приклади загальних методологій тестування Cassandra та інших баз даних NoSQL з YCSB можна знайти в [12]. Однак, на відміну від цих та інших робіт (наприклад, [5, 6, 7, 8]), основну увагу було зосереджено на аналізі динамічних аспектів продуктивності Cassandra при використанні різних параметрів узгодженості. Тобто, було досліджено яким чином встановлений рівень узгодженості інформації впливає на час обслуговування запитів читання та запису та пропускної здатності бази даних в залежності від рівня навантаження (тобто кількості одночасних клієнтських запитів/потоків).

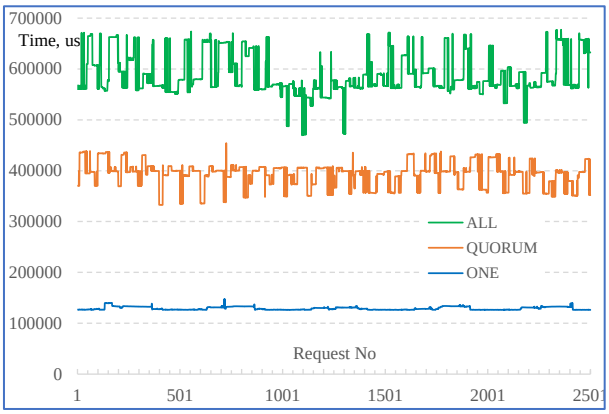
Для цього було виконано серію тестів продуктивності з кількістю потоків від 100 до 1000. Кількість операцій у кожному потоці дорівнювала 10000. Такий сценарій тестування був використаний для виконання окремо операцій читання та запису з трьома різними параметрами узгодженості: ONE, QUORUM та ALL.

Результати кожного тесту було збережено в окремому файлі формату csv, включає наступну інформацію для кожної виконаної операції читання та запису: тип операції (READ | WRITE), час початку операції (мс), затримку обслуговування операції (нс). Це дозволило побудувати графіки затримки обслуговування (див. приклад на рис. 3 та 4 (кожен графік

накладає три криві, що відповідають різним параметрам узгодженості: ONE, ALL, QUORUM), а також усереднити час обслуговування операцій читання та запису (рис. 4, 5).

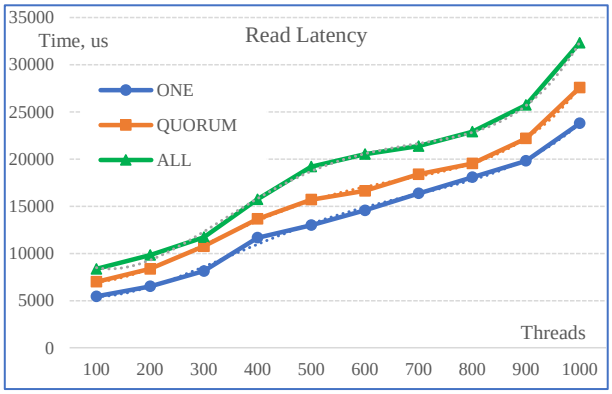


а – централізований кластер

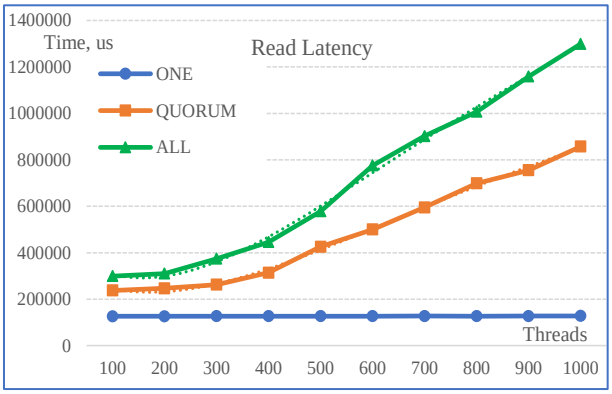


б – розподілений кластер

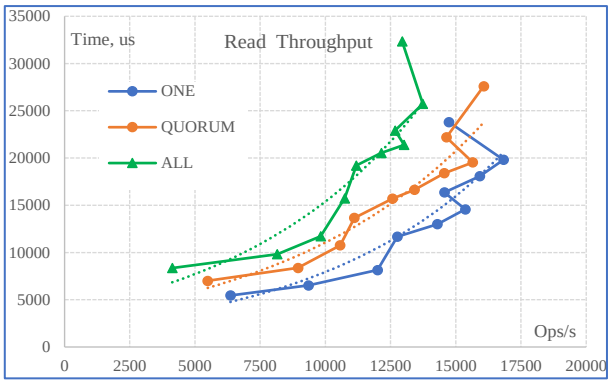
Рис. 3. Фрагмент графіку зміни часових затримок для операцій читання, кількість потоків = 500
(**Fig. 3.** Fragment of the graph of changes in time delays for reading operations, the number of threads = 500)



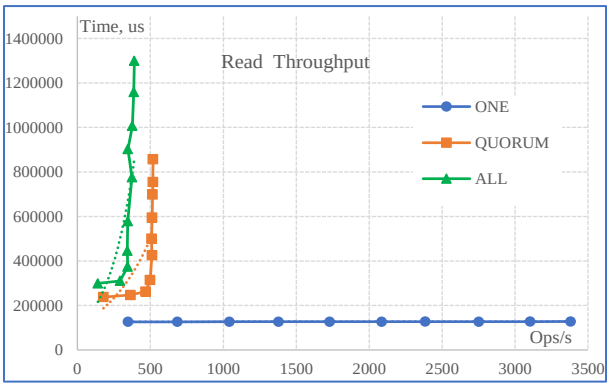
а – час обслуговування централізованого кластеру



б – часова обслуговування розподіленого кластеру



в – пропускна здатність централізованого кластеру



г – пропускна здатність розподіленого кластеру

Рис. 4. Продуктивність операцій читання Cassandra для різних рівнів узгодженності
(**Fig. 4**. Performance of reading operations Cassandra for different levels of consistency)

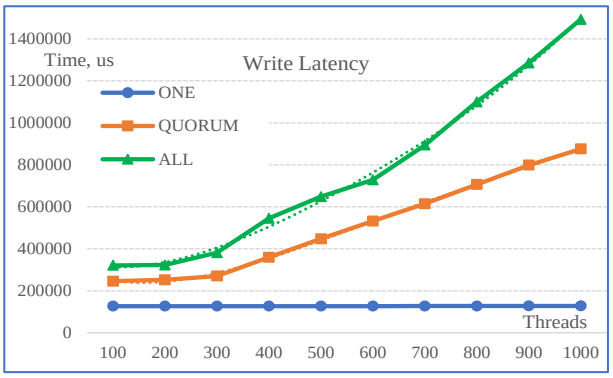
3. Аналіз залежності продуктивності від рівня узгодженості

Результати порівняльного аналізу продуктивності Cassandra при виконання операцій читання та запису зображені на рис. 4, 5.

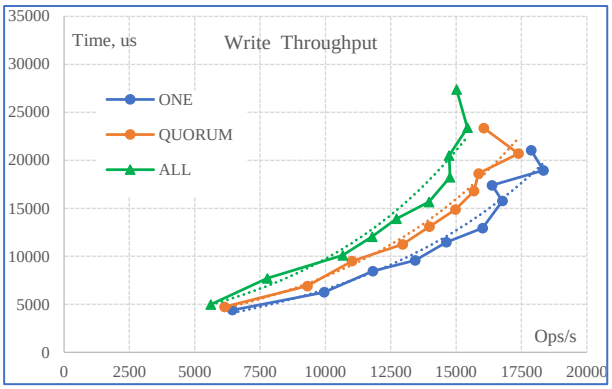
Коли Cassandra налаштована на забезпечення рівня узгодженості ONE, затримка як операцій читання, так і запису менша у середньому на 39% та 21% для централізованого кластеру (рис. 4, а, 5, а) та на 462 та 506% для розподіленого кластеру (рис. 4, б, 5, б) відповідно, ніж середній час відгуку налаштування ALL.

Це свідчить про значний вплив рівня узгодженості на швидкодію бази даних, особливо у випадку глобального розподілення її реплік, а також підтверджує тезу про те, що вибір оптимального рівня узгодженості є одним з найефективніших методів підвищення продуктивності розподілених інформаційних систем.

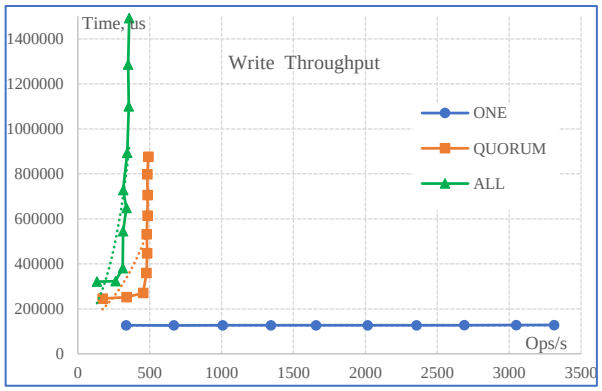
а – часова затримка централізованого кластеру



б – часова затримка розподіленого кластеру



в – пропускна здатність централізованого кластеру



г – пропускна здатність розподіленого кластеру

Рис. 5. Продуктивність операцій запису Cassandra для різних рівнів узгодженності
(**Fig. 5**. Performance of writing operations Cassandra for different levels of consistency)

Налаштування QUORUM демонструє раціональний баланс між затримками та узгодженості даних, однак навіть цей компромісний рівень узгодженості дуже суттєво збільшує час обслуговування запитів читання та запису у випадку глобального розподілення реплік по різних географічних локаціях (на 285% та 300%) у порівнянні з централізованим кластером (19% та 11%). Це обумовлено тим, що для розподіленого кластера мережеві затримки вносять найбільш вагомий вклад (більш ніж 98% замість близько 50% для централізованого кластеру) до загального часу обслуговування запитів читання/запису у порівнянні з часом обробки запитів саме базою даних, що нівелює перевагу швидкого запису. Крім того, важно відмітити той факт, що при розгортанні усіх реплік у межах одного ЦОД операції запису виконуються в середньому на 18% швидше, ніж операції читання, що є відмінною особливістю Cassandra. Навпаки для розподіленого кластера операції запису виконуються в середньому на 2% довше, ніж операції запису, що може бути спричинено традиційно декілька більшою пропускною спроможністю каналу прийому інформації.

Рис. 4, в, г та 5, в, г дозволяють оцінити максимальну пропускну здатність централізованого та розподіленого кластеру. Для централізованого кластура вона сягає 14000 операцій в секунду в найгіршому випадку (читання інформації з найбільш строгим рівнем узгодженості ALL), а для розподіленого кластера фактично зупиняється на рівні 400 операцій в секунду за таких же самих умов. Отримані результати чітко демонструють перевагу у продуктивності що обумовлена використанням найслабшого налаштуваннями узгодженості (ONE) особливо у випадку граничного робочого навантаження.

Результати навантажувального тестування дають певну уяву про продуктивність системи, але не дозволяють розробникам систем точно оцінювати затримку бази даних для всього спектру можливих робочих навантажень. Функція регресії, оцінена за експериментальними даними з використанням методу найменших квадратів може ефективно вирішити цю проблему. У табл. 1 та 2 наведені значення показника R-квадрат, який оцінює точність апроксимації різних функцій регресії.

Таблиця 1 – **Точність регресії експериментальних даних для *централізованого* кластеру Cassandra**

Операція	Рівень узгодженості	Поліноміальна регресія			Лінійна регресія	Експоненціальна регресія
		order=2	order=3	order=4		
Read	ONE	0.9879	0.9898	0.9971	0.9866	0.9597
	QUORUM	0.9732	0.9868	0.9992	0.9697	0.9586
	ALL	0.9642	0.9736	0.9981	0.9626	0.9512
Write	ONE	0.9971	0.9971	0.9977	0.9968	0.9569
	QUORUM	0.9976	0.9996	0.9997	0.9976	0.9407
	ALL	0.9943	0.9996	0.9997	0.9897	0.9542

Таблиця 2 – **Точність регресії експериментальних даних для розподіленого кластеру Cassandra**

Операція	Рівень узгодженості	Поліноміальна регресія			Лінійна регресія	Експоненціальна регресія
		order=2	order=3	order=4		
Read	ONE	0.8652	0.9179	0.9389	0.8301	0.8312
	QUORUM	0.9883	0.9972	0.9976	0.9659	0.9769
	ALL	0.9899	0.9970	0.9975	0.9720	0.9814
Write	ONE	0.9076	0.9076	0.9305	0.8810	0.8813
	QUORUM	0.9915	0.9983	0.9991	0.9754	0.9794
	ALL	0/9963	0.9964	0.9967	0.9577	0.9870

Як слідує з аналізу табл. 1, 2, поліноміальні функції регресії четвертого порядку, наведені нижче (1-12) з найбільш високою точністю описують експериментальні дані.

$$yD_{ALL}^{Read}(x) = 200.82x^4 - 6079.9x^3 + 66136x^2 - 165848x + 411562; \quad (1)$$

$$yD_{QUORUM}^{Read}(x) = 106.71x^4 - 3507x^3 + 40777x^2 - 110191x + 316066; \quad (2)$$

$$yD_{ONE}^{Read}(x) = 1.6149x^4 - 29.622x^3 + 174.2x^2 - 245.82x + 126515; \quad (3)$$

$$yD_{ALL}^{Write}(x) = 172.28x^4 - 4022.4x^3 + 42148x^2 - 76501x + 350165; \quad (4)$$

$$yD_{QUORUM}^{Write}(x) = 148.92x^4 - 4316.7x^3 + 44987x^2 - 111081x + 317546; \quad (5)$$

$$yD_{QUORUM}^{Write}(x) = -1.4094x^4 + 31.096x^3 - 219.89x^2 + 657.15x + 126118; \quad (6)$$

$$yC_{ALL}^{Read}(x) = 27.425x^4 - 564.14x^3 + 3807.9x^2 - 7084.5x + 12314; \quad (7)$$

$$yC_{QUORUM}^{Read}(x) = 16.528x^4 - 323.57x^3 + 2048.9x^2 - 2692.5x + 7922.5; \quad (8)$$

$$yC_{ONE}^{Read}(x) = 11.94x^4 - 248.65x^3 + 1719.6x^2 - 2541.7x + 6483.5; \quad (9)$$

$$yC_{ALL}^{Write}(x) = 0.1047x^4 + 25.676x^3 - 381.66x^2 + 3714.8x + 1623.3; \quad (10)$$

$$yC_{QUORUM}^{Write}(x) = 1.1473x^4 - 10.468x^3 - 60.659x^2 + 2627.1x + 2132.3; \quad (11)$$

$$yC_{QUORUM}^{Write}(x) = -3.0313x^4 + 66.617x^3 - 473.1x^2 + 3016.3x + 1779.1, \quad (12)$$

де yD_{ALL}^{Read}, yD_{QUORUM}^{Read}, yD_{ONE}^{Read}, yD_{ALL}^{Write}, yD_{QUORUM}^{Write}, yD_{ONE}^{Write}– час відгуку Cassandra на читання/запису [мікросекунди] для різних налаштувань узгодженості *розподіленого* кластеру; yC_{ALL}^{Read}, yC_{QUORUM}^{Read}, yC_{ONE}^{Read}, yC_{ALL}^{Write}, yC_{QUORUM}^{Write}, yD_{ONE}^{Write}– час відгуку Cassandra на читання/запису для різних налаштувань узгодженості *централізованого* кластеру; *x* - кількість потоків (наприклад, паралельні запити). Вочевидь, представлені функції регресії (1-12) та їх коефіцієнти є унікальними для нашого експериментального дослідження, а не є універсальними. Інженерам, які проводять моделювання та прогнозування продуктивності розроблювальної системи потрібно буде знайти рівняння, які б відповідали власним результатам навантажувального тестування.

4. Моделювання продуктивності Cassandra при змішаному навантажені та гарантованої узгодженості

Як було зазначено в розділі 2, Cassandra може гарантувати повну узгодженості даних, якщо сума реплік які використовуються для виконання операцій читання та запису перевищує коефіцієнт реплікації. Це означає, що для систем з трьома репліками, що є стандартною архітектурою для багатьох розподілених інформаційних систем, включаючи Facebook, Twitter, тощо, існує 6 можливих налаштувань узгодженості операцій читання/запису, що завжди гарантують повну узгодженість даних:

1) *'Читання ONE – Запис ALL' (1R-3W)*;
2) *'Читання QUORUM–Запис QUORUM' (2R-2W)*;
3) *'Читання ALL – Запис ONE' (3R-1W)*;
4) *'Читання QUORUM – Запис ALL' (2R-3W)*;
5) *'Читання ALL – Запис QUORUM' (3R-2W)*;
6) *'Читання ALL – Запис ALL' (3R-3W)*.

Оскільки всі з наведених варіантів гарантують строгу узгодженість даних, розробники системи можуть бути зацікавлені у виборі такої конфігурації, що забезпечує мінімальний, в середньому, час обслуговування. Результати експериментальних досліджень показують, що чим менше реплік викликається, тим вище швидкодія усього кластеру. Отже, останні три конфігурації є надлишковими та можуть бути виключені з подальшого аналізу.

У свою чергу, затримка відповіді та пропускна здатність Cassandra залежать від поточного навантаження та процентного співвідношення між кількістю операцій читання та запису.

Використовуючи функції регресії (1-12), можливо спрогнозувати середню затримку Cassandra при змішаному навантаженні:

$$y_{1R-3W}(x) = P_{Read} \cdot y_{ONE}^{Read}(x) + P_{Write} \cdot y_{ALL}^{Write}(x); \quad (13)$$

$$y_{2R-2W}(x) = P_{Read} \cdot y_{QUORUM}^{Read}(x) + P_{Write} \cdot y_{QUORUM}^{Write}(x); \quad (14)$$

$$y_{3R-1W}(x) = P_{Read} \cdot y_{ALL}^{Read}(x) + P_{Write} \cdot y_{ONE}^{Write}(x), \quad (15)$$

де P_{Read}, P_{Write} – ймовірності надходження запиту на читання або оновлення (запис) інформації, що залежать від поточної суміші цих операцій $P_{Read} + P_{Read} = 1$.

У табл. 2, 3 наведено вибіркові оцінки затримки обслуговування централізованого та розподіленого кластеру Cassandra для різних конфігурацій, що гарантують строгу узгодженість при змішаному навантаженні. Вони були отримані з використанням (1-15).

Таблиця 2 – **Оцінка часу обслуговування централізованого кластеру Cassandra для різних рівнів узгодженності в залежності від завантаження та пропорції операції читання (R) та запису (W)**

Threads	R/W=10/90%			R/W=30/70%			R/W=50/50%			R/W=90/10%		
	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W
200	7608	7212	**6694**	7357	7478	**7273**	**7107**	7744	7853	**6606**	8276	9012
400	11939	11510	**10368**	11724	11943	**11579**	**8194**	8894	8972	**11081**	13241	15213
600	15759	15149	**14033**	15569	15573	**15488**	**9311**	10083	10222	**15000**	16845	19853
800	20222	18700	**17874**	19684	**18888**	18977	10425	**11256**	11517	**18071**	19449	22285
1000	26973	23768	**22079**	26263	24619	**24366**	11510	**12376**	12790	**24132**	27172	31226

Таблиця 3 – **Оцінка часу обслуговування розподіленого кластеру Cassandra для різних рівнів узгодженності в залежності від завантаження та пропорції операції читання (R) та запису (W)**

Threads	R/W=10/90%			R/W=30/70%			R/W=50/50%			R/W=90/10%		
	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W	1R-3W	2R-3W	3R-1W
200	323543	249747	**144993**	279777	247154	**181569**	236010	244561	**218146**	**148478**	239374	291299
400	466238	351398	**160901**	390813	346606	**228966**	251205	259158	**230485**	**164538**	332231	433162
600	692610	522177	**187956**	566905	517041	**309675**	269555	280783	**248161**	**189789**	501635	674832
800	992658	711575	**218185**	800337	706809	**399767**	290978	308610	**270551**	**223373**	692511	944516
1000	1356378	869083	**243614**	1083391	864258	**475316**	315388	341814	**297031**	**264429**	849784	1170419

У таблицях підкреслено значення мінімальної затримки обслуговування серед трьох можливих варіантів: *1R-3W, 2R-2W* та *3R-1W*.

На перший погляд здається, що в якості компромісного варіанту, що гарантує строгу узгодженість при змішаному навантаженні доречно використовувати конфігурацію 2R-2W, при якої викликається кворум реплік як для виконання читання, так і запису даних.

Однак, як випливає з аналізу табл. 2, 3, конфігурація 2R-2W є оптимальною лише у досить обмеженій області робочого навантаження та процентного співвідношення операцій читання/запису. Так, якщо кількість операцій запису значно превалює над кількістю операцій читання налаштування узгодженості 3R-1W забезпечує найменшу затримку для більшості з можливих робочих навантажень.

Однак із збільшенням відсотка запитів на читання налаштування 1R-3W стає більш оптимальним. Для розподіленого кластера ця межа проходить майже посередині (рис. 6, б).

Для централізованого кластеру границя оптимальності між 3R-1W та 1R-3W знаходиться на межі 30/70 (тобто коли відсоток операцій читання дорівнює 30%, а запису – 70%).

Однак, при збільшенні загальної кількості активних потоків більш ніж 700 в діапазоні пропорції читання/запису від 30/70 до 55/45, оптимальним виявляється і варіант 2R-2W.

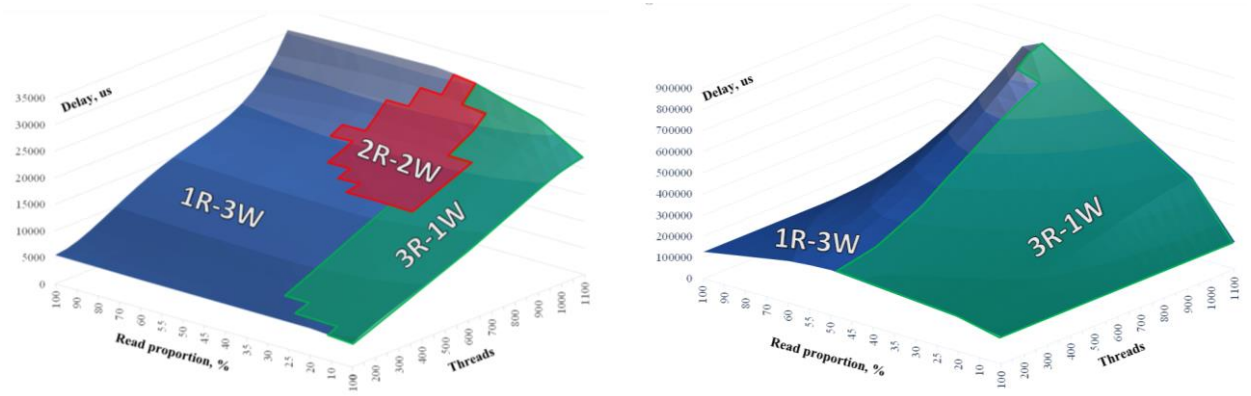
Графіки тривимірної поверхні, представлені на рис. 6, зазначають домени у змішаному робочому навантаженні з оптимальними налаштуваннями узгодженості, що забезпечують найбільшу швидкодію кластера. Оптимальний вибір налаштувань узгодженості для кожного окремого запиту дозволяє зменшити час виконання операцій читання/запису в середньому на 8% для централізованого кластера та на 44% для розподіленого кластера при збереженні гарантії забезпечення строгої узгодженості даних в цілому (рис. 7).

Отримані результати аналітичного моделювання були перевірені за допомогою практичного вимірювання часу обслуговування кластера Cassandra для тих же самих варіантів змішаного робочого навантаження, що наведені на рис. 6 згідно з методикою, що описана у розділі 3.

Результати такої перевірки свідчать про те, що максимальна різниця між теоретичними та експериментальними значеннями часової затримки не перевищують 17% (ця різниця суттєво зменшується при зростанні робочого навантаження), а запропонований підхід дозволяє обрати налаштування узгодженості, що є оптимальними у 92% випадків.

5. Метод оптимального вибору рівня узгодженості даних

Треба зауважити, що отримані у попередньому розділі кількісні результати та обрані функції регресії є унікальними для нашого експериментального дослідження та, вочевидь, не можуть бути оптимальними для всіх можливих варіантів побудови кластеру Cassandra.



а – централізований кластер б – розподілений кластер

Рис. 6. Області навантаження з оптимальними налаштуваннями узгодженості кластеру Cassandra
(Fig. 6. Load areas with optimal Cassandra cluster consistency settings)

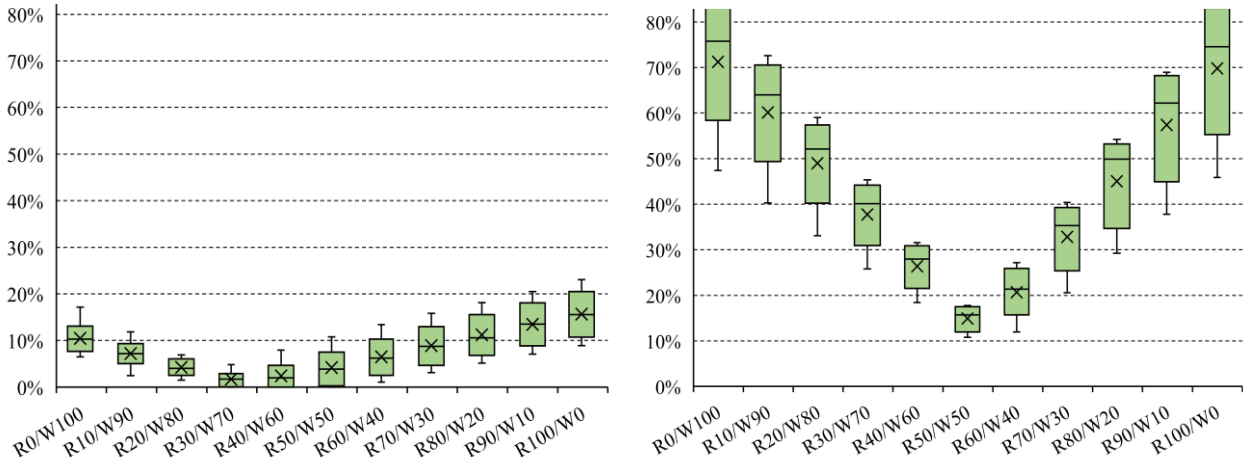


Рис. 7. Зниження часу обслуговування запитів за рахунок оптимального вибору рівня узгодженності в залежності від пропорції операцій читання/запису у порівнянні з конфігурацією 2R-2W
(**Fig. 7.** Reduction of query service time due to the optimal choice of the level of consistency)

Дійсно, продуктивність розподіленої інформаційної системи залежить від багатьох факторів, включаючи розмір і структуру бази даних, використовуване обладнання, кількість реплік та їх географічне розташування, тощо.

У цьому розділі ми узагальнюємо експериментальні дані, які представлені в статті, та пропонуємо метод оптимального динамічного вибору налаштувань узгодженості за рахунок використання результатів навантажувального тестування, проведення якого є обов'язковим етапом розробки розподілених інформаційних систем.

Запропонований метод включає наступні етапи (кроки 1-5 можуть бути виконані одноразово під час навантажувального тестування системи; крок 6 повинен виконуватися безпосередньо під час роботи системи):

1. Розгортання кластеру Cassandra в реальному виробничому середовищі.
2. Модифікація тестових навантажень YCSB для виконання операцій читання та запису, що є специфічними для розробленої інформаційної системи, що є необхідним для оцінки продуктивності системи в реалістичних сценаріях застосування.
3. Виконання навантажувального тестування (бенчмаркингу) кластеру Cassandra при різних робочих навантаженнях (потоків в секунду) з різними налаштуваннями узгодженості згідно сценарію тестування, описаного в розділі 3 та передбачуваним умовам експлуатації.
4. Пошук функцій регресії, які найбільш точно будуть описувати середню затримку виконання операцій читання та запису в залежності від робочого навантаження для різних параметрів узгодженості за результатами практичного вимірювання.
5. Визначення оптимальних налаштувань узгодженості, використовуючи функції (13) - (15) для забезпечення мінімальної затримки Cassandra в залежності від робочого навантаження та співвідношення запитів читання/запису, як описано у розділі 4. В якості результату, розробники системи зможуть визначити домени змішаного робочого навантаження з оптимальними налаштуваннями узгодженості (наприклад, див. рис. 6).
6. Постійний моніторинг поточного навантаження та співвідношення операцій читання/запис під час роботи системи та вибір оптимальних налаштувань узгодженості використовуючи домени робочого навантаження, визначені на попередньому кроці.

Запропонована методологія дозволяє оптимізувати параметри узгодженості динамічно під час роботи кластеру Cassandra для досягнення його

максимальної продуктивності та швидкодії гарантуючи при цьому строгу узгодженість даних.

Висновки

В статті експериментально досліджено взаємодію між різними налаштуваннями узгодженості та продуктивністю розподіленої бази даних Cassandra NoSQL.

Це є важливим елементом досягнення компромісу між доступністю, узгодженістю даних та стійкістю до розділення, що є актуальною проблемою побудови розподілених інформаційних систем та баз даних, особливо за умов глобального розподілення реплік у мережі Інтернет.

Наведені результати показують, що обрані налаштування узгодженості суттєво впливають на час обслуговування та пропускну здатність таких систем на прикладі нереляційної бази даних Cassandra, що необхідно враховуватися під час проектування та експлуатації розподілених інформаційних систем. Дотримання строгої узгодженості даних може значно збільшити час обслуговування клієнтських запитів (приблизно в 1.4 раз для централізованого кластеру та в 6 разів для розподіленого кластеру) та настільки ж погіршити її пропускну здатність.

База даних Cassandra пропонує розробникам унікальну можливість налаштування рівня узгодженості для кожного окремого запиту читання або запису інформації.

Крім того, можна завжди гарантувати строгу узгодженість даних обираючи параметри узгодженості таким чином, щоб загальна сума вузлів, які використовуються під час для читання та запису інформації перевищувала коефіцієнт реплікації. Розробникам розподілених інформаційних систем, де Cassandra використовується в якості сховище NoSQL, рекомендується порівняти ефективність різних параметрів узгодженості при різних робочих навантаженнях та для різних пропорціях між операціями читання та записи.

Це дозволить визначити домени в просторі робочого навантаження, де певні налаштування узгодженості забезпечують максимальну швидкодію.

Одним з головних практичних висновків є той факт, що оптимальні налаштування узгодженості, що максимізують продуктивність Cassandra, суттєво залежать від поточного навантаження та співвідношення запитів на читання та запис. Вони підтверджують ствердження про те, що жодне з налаштувань узгодженості не може завжди гарантувати мінімальну затримку обслуговування.

За результатами проведених досліджень був запропонований метод вибору оптимального налаштування узгодженості для кожній операції читання або запису динамічно під час роботи кластеру Cassandra шляхом моніторингу поточного навантаження та використання результатів бенчмаркінгу, зібраних на етапі навантажувального тестування системи.

References

1. Meier, A. and Kaufmann, M. (2019), *SQL and NoSQL Databases: Models, Languages, Consistency Options and Architectures for Big Data Management*, Springer Verlag, Berlin, 229 p.
2. Pritchett, D. (2008), “Base: An Acid Alternative”, *ACM Queue*, Vol. 6, No. 3, pp. 48-55.
3. Brewer, E. (2000), “Towards Robust Distributed Systems”, *Proceedings of the 19th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, Portland, USA, pp. 7-8.
4. Gilbert, S. and Lynch, N. (2002), “Brewer’s Conjecture and the Feasibility of Consistent, Available, Partition-Tolerant Web Services”, *ACM SIGACT News*, Vol. 33, No. 2, pp. 51-59.
5. Cooper, B., Silberstein, A., Tam, E. and Ramakrishnan, R. (2010), “Sears Benchmarking Cloud Serving Systems with YCSB”, *Proceedings of the 1st ACM Symposium on Cloud Computing*, Indianapolis, USA, pp. 143-154.
7. Abramova, V., Bernardino, J. and Furtado P. (2014), “Testing Cloud Benchmark Scalability with Cassandra”, *Proceedings of the IEEE 10th World Congress on Services*, Anchorage, USA, pp. 434-441.
8. Klein, J., Gorton, I., Ernst, N., Donohoe, P., Pham, K. and Matser C. (2015), “Performance Evaluation of NoSQL Databases: A Case Study”, *Proceedings of the 1st ACM/SPEC Int. Workshop on Performance Analysis of Big Data Systems*, Austin, USA, pp. 5-10.
9. Haughian, G., Osman, R. and Knottenbelt W. (2016), “Benchmarking Replication in Cassandra and MongoDB NoSQL Datastores”, *Proceedings of the 27th Int. Conf. on Database and Expert Systems Applications*, Porto, Portugal, pp. 152-166.
10. Farias, V. A., Sousa, F. R., Maia, J. G. R., Gomes, J. P. P. and Machado J. C. (2018), “Regression based performance modeling and provisioning for NoSQL cloud databases”, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 79, pp. 72–81.
11. Karniavoura, F. and Magoutis, K. (2017), “A measurement-based approach to performance prediction in NoSQL systems”, *Proceedings of the 25th IEEE Int. Symposium on the Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecom. Systems*, Banff, Canada, pp. 255-262.
12. Cruz, F., Maia, F., Matos, M., Oliveira, R., Paulo, J. and Pereira, J. R. (2017), “Vilaca Resource usage prediction in distributed key-value datastores”, *Proceedings of the IFIP Distributed Applications and Interoperable Systems Conf.* (DAIS'2017), Heraklion, Crete, pp. 144-159.
13. Abdelmoniem, A. M. and Bensaou, B. (2018), “Curbing Timeouts for TCP-Incast in Data Centers via A Cross-Layer Faster Recovery Mechanism”, *Proceedings of the IEEE Conf. on Computer Communications*, Honolulu, HI, pp. 675-683.
14. Libman, L. and Orda, A. (2002), “Optimal retrial and timeout strategies for accessing network resources”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 10, No. 4, pp. 551-564.
15. Avizienis, A., Laprie, J.-C., Randell, B. and Landwehr, C. (2004), “Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing”, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, Vol. 1, No. 1, pp. 11-33.
16. Brewer, E. (2012), “CAP twelve years later: How the "rules" have changed”, Computer, Vol. 45, No. 2, pp. 23-29.
17. Gorbenko, A., Romanovsky, A. and Tarasyuk, O. (2019), “Fault tolerant internet computing: Benchmarking and modelling trade-offs between availability, latency and consistency”, *Journal of Network and Computer Applications*, Vol. 146, pp. 1-14.

18. Gorbenko, A. and Romanovsky, A. (2013), “Time-outing Internet Services”, *IEEE Security & Privacy*, Vol. 11, No. 2, pp. 68-71.
19. Chandani, M (2016), *Benchmarking Cassandra and other NoSQL databases with YCSB*, URL: https://github.com/cloudius-systems/osv/wiki/Benchmarking-Cassandra-and-other-NoSQL-databases-with-YCSB
20. Gorbenko, A., Romanovsky, A. and Tarasyuk, O. (2020), “Interplaying Cassandra NoSQL consistency and performance: A benchmarking approach”, *Communications in Computer and Information Science*, Vol. 1279 / Editors: S. Bernardi, et al. Springer Nature. Berlin, pp. 168-184.
21. Gorbenko, A., Kharchenko, V., Tarasyuk, O., Chen, Y. and Romanovsky A. (2008), “The threat of uncertainty in Service-Oriented Architecture”, *Proceedings of the RISE/EFTS Joint International Workshop on Software Engineering for Resilient Systems*, Newcastle, UK, pp. 49-54.

Надійшла (received) 16.06.2021
Прийнята до друку (accepted for publication) 25.08.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Карпенко Андрій Сергійович – аспірант кафедри комп’ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет» Харків, Україна;
Andrii Karpenko – PhD student with the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine,
e-mail: a.karpenko@csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-2789-1168.

Тарасюк Ольга Михайлівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент Одеського технологічного університету «ШАГ», Одеса, Україна;
Olga Tarasyuk– Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor with the Odessa Technological University STEP, Odessa, Ukraine,
e-mail: O.M.Tarasyuk@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-5991-8631.

Горбенко Анатолій Вікторович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп’ютерних систем, мереж та кібербезпеки Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний університет» Харків, Україна; Leeds Beckett University, Leeds, Великобританія,
Anatoliy Gorbenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Computer Systems, Networks and Cybersecurity, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; Reader in Computer Science with the School of Built Environment, Engineering and Computing, Leeds Beckett University, Leeds, United Kingdom;
e-mail: a.gorbenko@csn.khai.edu; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-6757-1797.

Исследование согласованности и производительности в нереляционных реплицированных базах данных

А. С. Карпенко, О. М. Тарасюк, А. В. Горбенко

Аннотация. Целью данной статьи является исследование производительности распределенных отказоустойчивых информационных систем и нереляционных хранилищ данных, а также анализ влияния параметров согласованности данных на быстродействие и пропускную способность на примере трех-реплицированного кластера Cassandra. **Результаты.** В статье приведены результаты нагрузочного тестирования (бенчмаркинга) производительности операций чтения и записи кластера Cassandra, реплики которого были развернуты на ресурсах облачного провайдера Amazon Web Services. Представленные количественные результаты показывают, как различные настройки согласованности влияют на производительность Cassandra при различных рабочих нагрузках в условиях, когда все реплики расположены в одном центре обработки данных (ЦОД), или же географически распределены по разным ЦОД. **Вывод.** Предложен метод минимизации временных задержек Cassandra при обеспечении строгой согласованности данных на основе оптимизации настроек согласованности в зависимости от текущей рабочей нагрузки и пропорции между операциями чтения и записи.

Ключові слова: NoSQL; база данных Cassandra; теорема CAP; компромисс; согласованность; задержки; производительность; сравнительный анализ.

Research consistency and perfomance of nosql replicated databases

Andrii Karpenko, Olga Tarasyuk, Anatoliy Gorbenko

Abstract. This paper evaluates performance of distributed fault-tolerant computer systems and replicated NoSQL databases and studies the impact of data consistency on performance and throughput on the example of a three-replicated Cassandra cluster. The paper presents results of heavy-load testing (benchmarking) of Cassandra cluster’s read and write performance which replicas were deployed on Amazon EC2 cloud. The presented quantitative results show how different consistency settings affect the performance of a Cassandra cluster under different workloads considering two deployment scenarios: when all cluster replicas are located in the sane data center, and when they are geographically distributed across different data centers (i.e. Amazon availability zones). We propose a new method of minimizing Cassandra response time while ensuring strong data consistency which is based on optimization of consistency settings depending on the current workload and the proportion between read and write operations.

Keywords: NoSQL; Cassandra database; CAP theorem; compromise; consistency; latency; performance; benchmarking.

UDC 681.142 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.10

Serhii Koshman[1], Victor Krasnobayev[1], Serhii Nikolsky[2]

[1] V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine
[2] Kharkiv Humanitarian-Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine

METHOD FOR DIAGNOSING DATA ERRORS OF A COMPUTER SYSTEM FUNCTIONING IN THE SYSTEM OF RESIDUAL CLASSES

Abstract. The **subject** of the article is the development of a method for diagnosing data errors of a computer system functioning in the residue number system (RNS). This method is based on the tabular principle of data diagnostics operation implementation. The **purpose** of the article is to reduce the time of performing the operation of diagnosing the data of a computer system that functions in the RNS in the dynamics of the computational process. **Tasks**: to analyze the possible application of RNS as a number system in computer data processing systems; to investigate existing methods of data diagnostics and identify possible shortcomings in data diagnostics in the dynamics of the computational process with the introduction of minimal information redundancy; to develop a method for diagnosing the data presented in the RNS, which is based on the tabular principle of the implementation of the diagnostic operation. **Research methods**: methods of analysis and synthesis of computer systems, number theory, coding theory in RNS. The following **results** were obtained. The work shows that the data diagnostics is carried out after the control operation has been performed. To carry out the operation of diagnosing data in the RNS, when one-time errors occur, methods for determining an alternative set (AS) of numbers are used. In this case, the main disadvantage of the considered methods is the considerable time required to determine the AS. To reduce the time for determining the AC numbers in the work, the method for diagnosing data in the RNS has been improved. Improvement of the method involves the compilation of a table (the first stage) of correspondence to each correct number of a possible set of incorrect numbers when one-time errors occur in the data. Based on the analysis of the contents of the table of the first stage, a table (of the second stage) is drawn up of the correspondence of each incorrect number to the possible values of the correct numbers. **Conclusions**. The use of the improved method increases the efficiency of diagnostics of the data presented in the RNS by reducing the time for determining the AC numbers. This is achieved by quickly fetching pre-calculated AC table values.

Keywords: number system; residue number system; computer system; data diagnostics; table implementation.

Introduction

The modern life stage of science and technology development involves perplexing tasks, which require prompt resolving. However, the complexity of these tasks outstrips the pace of computational power ascension of the universal computers. In this, the principal directions of computational system enhancement of real-time data processing are its performance maximization. It's known that one of the possible directions of high-performance computational systems development is to parallelize tasks and algorithms on the level of arithmetical microoperations. One of the ways of parallel task solving is to make a transition to the nonconventional machine arithmetic with alternative operands representation. If to choose out of numerous nonconventional arithmetic the most practical use in computational systems belongs to the non-positional numeral system in residue classes – residue number system (RNS) [1-3].

The set of RNS beneficial properties defines the following classes of tasks, where it's significantly more efficient than a positional arithmetic: cryptographic and modular transformations (implementation of cryptographic transformations in a group of elliptic curve dots, as well as algorithm realization for hashing and random numbers generations [4-7]), signal processing, image processing (compression), real-time large number of bits (hundreds of bits) integer data processing, vector and matrix informational array processing in bulk, neural computer information processing, FFT and DFT algorithm realization and optoelectronic table information processing [8-11].

In fact, its required to determine the alternative set (AS) in RNS $W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}$ of the incorrect $\tilde{A} = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n)$ numbers. By the AS $W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}$ of the incorrect (corrupted) number $\tilde{A} = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n)$ meant the set $\left\{ m_{l_\kappa} \right\}$ $(\kappa = \overline{1, \rho})$ of ρ RNS bases, upon which the correct (not corrupted) number (codeword) $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n)$ may differ from the given set $\{\tilde{A}\}$ of possible derived incorrect numbers. This also suggests, that only a single (by one of the residues m_i $(i = \overline{1, n+1})$ of the number $A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n)$) error (corruption of one of $(n+1)$ residues) may occur in the correct number A.

Noting that AS is considered when a minimal information redundancy is introduced to RNS, by applying a single $(k = 1)$ additional (check) RNS base m_{n+1} to n informational basis, given that $m_i < m_{n+1}$, $i = \overline{1, n}$. In this case the total amount N_{TA} of RNS codewords is $N_{TA} = \prod_{i=1}^{n+1} m_i$. The amount of N_{CC} correct codewords is $N_{CC} = \prod_{i=1}^{n} m_i$, as the amount of N_{IC} incorrect (corrupted) codewords is equal to $N_{IC} = N_{TC} - N_{CC} = N_{CC} \cdot (m_{n+1} - 1)$.

Importance of the AS determining can occur in the following principal cases. Firstly, if the error verification, diagnosing and correction of data in RNS is required.

 © Koshman S., Krasnobayev V., Nikolsky S., 2021

Secondly, when performing error verification, diagnose and correction of data in RNS in a process of task solving in computational process dynamics (CPD) (in real-time, i.e. without pausing computations) given the minimum information redundancy [2]. One of the main requirements of the AS determining procedure in RNS is the requirement to decrease a time for a given bases set determination. This requirement is especially crucial for the second case – in a process of task solving in CPD [12-15].

As can be seen, pending and important task is to develop new and improve existing methods of prompt AS numbers $W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}$ determining in RNS.

The purpose of the article is to reduce the time of performing the operation of diagnosing the data of a computer system that functions in the RNS in the dynamics of the computational process.

Method for diagnosing data in a in residue number system

All existing methods of AS numbers determining are based on the sequential determining procedure of the sought bases of AS numbers in RNS [1].

As an example (first method), the AS $W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}$ of the incorrect number

$$\tilde{A} = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n) \qquad (1)$$

can be determined by a sequential checking of each of the RNS bases m_i, $i = \overline{1, n}$) as following. The number set having the same value of the residues over each of RNS bases, as well as the number $\tilde{A}$, is being determined, except of a one certain base, and being different only via the values of possible residues over given base. Amongst this set of number there may be no correct number, or a single correct number can be present only. In this latter case the determined number is included into the AS of the incorrect number being checked $\tilde{A}$. The considered method suggests the sequential alike verifications for each of the informational RNS bases (check bases are always contained in the AS bases). The result of such sequential verifications fully determines the AS

$$W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}. \qquad (2)$$

The downsides of this method of the AS determining are high computational complexity and significant time consumption.

The second method for the AS determining is based on the subtraction of each of the possible projections

$$\tilde{A}_i = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_{i+1}, ..., a_n) \qquad (3)$$

of the incorrect number $\tilde{A}$, and their following comparison to the value of the RNS defined informational range. As it proved [2], the necessary and sufficient condition for RNS base appearance in the AS $W(\tilde{A})$ of the number $\tilde{A}$ is its projections $\tilde{A}_i$ are being correct. The second method application slightly improves the AS determining process $W(\tilde{A})$ of the number

$$A = (a_1, a_2, ..., a_{i-1}, a_i, a_{i+1}, ..., a_n), \qquad (4)$$

because of the ability of simultaneous determining of the possible projections $\tilde{A}_j$ of the incorrect number. Given circumstance decreases the time factor difficultness of the AS determining. However, the AS number determining procedure contains following basic operations: number A conversion from RNS to PNS; projections $\tilde{A}_i$ conversion of the incorrect number A from RNS to PNS and the comparison procedure of numbers. Listed operations in RNS are referring to as non-positional operations, which require significant time and hardware investments for implementation. The downsides of the mentioned method of the AS determining are the same as in the first method: significant computational complexity and significant time consumption. Therefor there remains the task to improve the second viewed method in terms of reducing time of the AS determining.

The improvement of the acquainted second method is to reduce the time needed to determine the AS. The mission of the introduced method in this article of the AS number determining in RNS is to perform the preliminary corresponding M tables compiling (first stage tables) $A = \Phi_1(\tilde{A})$ for each correct A number (contained in the numerical range $0 \div M-1$), of the possible set $\left\{\tilde{A}\right\}$ of the incorrect numbers (contained in the numerical range $M \div M_0 - 1$) with single error (in one of the residue) occurring in the number A. Based on the analysis of the first stage tables the second stage table is being compiled, which contains the correspondence $\tilde{A} = \Phi_2(A)$ of each incorrect $\tilde{A}$ number out of the numerical range $M \div M_0 - 1$ to the possible values of the corrected (non-corrupted) A numbers.

The amount of the correct A numbers corresponds to the amount of the RNS basis, that are contained in the AS $W(\tilde{A})$ of the A number. The stages of implementation of the improved method for determining the AS in the RNS are shown in Fig. 1.

It's appropriate to consider the application of the introduced method of the AS determining for a particular RNS, that is defined by the informational $m_1 = 2$, $m_2 = 3$ and check $m_k = m_3 = m_{n+1} = 5$ basis ($M = 2 \cdot 3 = 6$; $M_0 = 30$).

By each of the correct codewords 0-5 following fist stage $A = \Phi_1(\tilde{A})$ corresponding tables are compiled (Tables 1).

Table 2 shows the algorithm for the AS $W(\tilde{A}) = \left\{ m_{l_1}, m_{l_2}, ..., m_{l_\rho} \right\}$ numbers determining in RNS.

According to these tables the second stage $\tilde{A} = \Phi_2(A)$ Table 7 is being compiled. Table 7 shows the correspondence $\tilde{A} = \Phi_2(A)$ of each incorrect $\tilde{A}$ number out of numerical range 6-29 to a possible values of the corrected (non-corrupted) A numbers.

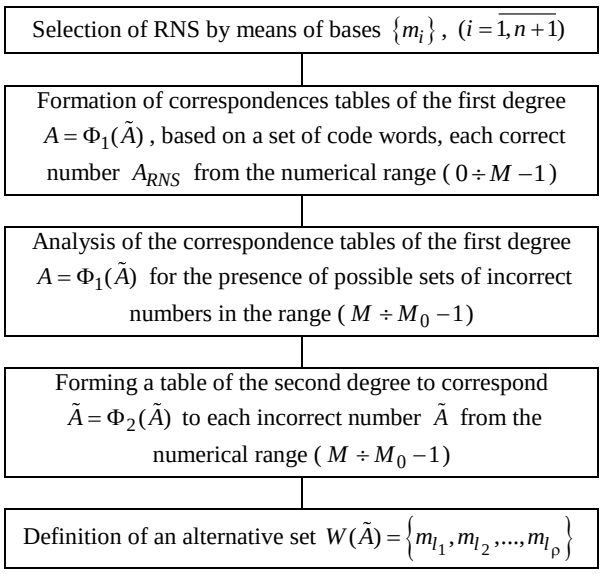


Fig. 1. An improved method
for determining the alternative set in the RNS

Table 1 – **First stage correspondence table**

0	0	0	0	1	1	1	1
15	1	0	0	16	0	1	1
10	0	1	0	21	1	0	1
20	0	2	0	11	1	2	1
6	0	0	1	25	1	1	0
12	0	0	2	7	1	1	2
18	0	0	3	13	1	1	3
24	0	0	4	19	1	1	4
2	0	2	2	3	1	0	3
17	1	2	2	18	0	0	3
12	0	0	2	13	1	1	3
22	0	1	2	23	1	2	3
20	0	2	0	15	1	0	0
26	0	2	1	21	1	0	1
8	0	2	3	27	1	0	2
14	0	2	4	9	1	0	4
4	0	1	4	5	1	2	0
19	1	1	4	20	0	2	0
24	0	0	4	15	1	0	0
14	0	2	4	25	1	1	0
10	0	1	0	11	1	2	1
16	0	1	1	17	1	2	2
22	0	1	2	23	1	2	3
28	0	1	3	29	1	2	4

Table 7 – **Second stage correspondence table**

Incorrect $\tilde{A}$ number	Correct A number	AS value $W(\tilde{A})$
$\tilde{A}_6=(0\|\|0\|\|1)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_6)=\{m_3\}$
$\tilde{A}_7=(1\|\|1\|\|2)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_7)=\{m_3\}$
$\tilde{A}_8=(0\|\|2\|\|3)$	$A_2=(0\|\|2\|\|3)$	$W(\tilde{A}_8)=\{m_3\}$
$\tilde{A}_9=(1\|\|0\|\|4)$	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	$W(\tilde{A}_9)=\{m_3\}$
$\tilde{A}_{10}=(0\|\|1\|\|0)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{10})=\{m_2,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{11}=(1\|\|2\|\|1)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{11})=\{m_2,m_3\}$
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	

Закінчення табл. 1

Incorrect $\tilde{A}$ number	Correct A number	AS value $W(\tilde{A})$
$\tilde{A}_{12}=(0\|\|0\|\|2)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{12})=\{m_2,m_3\}$
	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	
$\tilde{A}_{13}=(1\|\|1\|\|3)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{13})=\{m_2,m_3\}$
	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	
$\tilde{A}_{14}=(0\|\|2\|\|4)$	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	$W(\tilde{A}_{14})=\{m_2,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{15}=(1\|\|0\|\|0)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{15})=\{m_1,m_2,m_3\}$
	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	
$\tilde{A}_{16}=(0\|\|1\|\|1)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{16})=\{m_1,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{17}=(1\|\|2\|\|2)$	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	$W(\tilde{A}_{17})=\{m_1,m_3\}$
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	
$\tilde{A}_{18}=(0\|\|0\|\|3)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{18})=\{m_1,m_3\}$
	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	
$\tilde{A}_{19}=(1\|\|1\|\|4)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{19})=\{m_1,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{20}=(0\|\|2\|\|0)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{20})=\{m_1,m_2,m_3\}$
	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	
$\tilde{A}_{21}=(1\|\|0\|\|1)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{21})=\{m_2,m_3\}$
	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	
$\tilde{A}_{22}=(0\|\|1\|\|2)$	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	$W(\tilde{A}_{22})=\{m_2,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{23}=(1\|\|2\|\|3)$	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	$W(\tilde{A}_{23})=\{m_2,m_3\}$
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	
$\tilde{A}_{24}=(0\|\|0\|\|4)$	$A_0=(0\|\|0\|\|0)$	$W(\tilde{A}_{24})=\{m_2,m_3\}$
	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	
$\tilde{A}_{25}=(1\|\|1\|\|0)$	$A_1=(1\|\|1\|\|1)$	$W(\tilde{A}_{25})=\{m_2,m_3\}$
	$A_5=(1\|\|2\|\|0)$	
$\tilde{A}_{26}=(0\|\|2\|\|1)$	$A_2=(0\|\|2\|\|2)$	$W(\tilde{A}_{26})=\{m_3\}$
$\tilde{A}_{27}=(1\|\|0\|\|2)$	$A_3=(1\|\|0\|\|3)$	$W(\tilde{A}_{27})=\{m_3\}$
$\tilde{A}_{28}=(0\|\|1\|\|3)$	$A_4=(0\|\|1\|\|4)$	$W(\tilde{A}_{28})=\{m_3\}$

Let's review the example of the AS number determining in RNS using the introduced in this article table method. Given the incorrect number $\tilde{A}_{15}=(1\|\|0\|\|0)$ (Table 4).

Number's AS should be determined. Initially six correspondence tables are being compiled (Tables 1-6) of the first stage for each correct

$$A=(a_1,a_2,...,a_{i-1},a_i,a_{i+1},...,a_n)$$

number (out of numeral range 0-5) for the possible set of incorrect numbers (out of numeral range 6-29) when single errors (in one of the residues) occur in the number A. Based on the analysis of the first stage table content the second stage table is compiled, that contains the

correspondence for each incorrect number out of numeral range 6-29 to the possible corrected (non-corrupted) values $A=(a_1,a_2,...,a_{i-1},a_i,a_{i+1},...,a_n)$ of numbers. The amount of correct A numbers corresponds to the amount of RNS bases, that are contained in the AS

$$W(\tilde{A})=\left\{m_{l_1},m_{l_2},...,m_{l_\rho}\right\}$$

of the A number. Influenced by single errors occurrence the incorrect number $\tilde{A}_{15}=(1\|0\|0)$ can be formed by the following correct *A* numbers.

Firstly, the correct number $A_0=(0\|0\|0)$ (Table 5) might be corrupted in its first residue $a_1=0$ $(\tilde{a}_1=1)$.

Secondly, the correct number $A_3=(1\|0\|3)$ (Table 8) might be corrupted in ins third residue $a_3=3$ $(\tilde{a}_3=0)$. And, lastly, the incorrect number $A_5=(1\|2\|0)$ (Table 6) might be corrupted in its second residue $a_2=2$ $(\tilde{a}_2=0)$. In this case the AS

$$W(\tilde{A})=\left\{m_{l_1},m_{l_2},...,m_{l_\rho}\right\}$$

of the incorrect number $\tilde{A}_{15}=(1\|0\|0)$ is equal to the value $W(\tilde{A}_{15})=\{m_1,m_2,m_3\}$ (Table 7).

Conclusions

The method of determining the alternative set of numbers, which is based on the implementation of correspondence functions of possible errors values, by forming correspondence tables of the correct number of possible set of incorrect numbers, which allows to increase the efficiency of error diagnosis in RNS.

This method usage as opposed to other existing methods, allows to significantly reduce time needed for the AS number determining. Firstly, this is achieved by decreasing the amount of RNS bases being checked, that indicate the possibility of the correct number's $A=(a_1,a_2,...,a_{i-1},a_i,a_{i+1},...,a_n)$ residues to be corrupted. And, secondly, due to introduction of the fast (table-based) selection of preliminary calculated AS $W(\tilde{A})=\left\{m_{l_1},m_{l_2},...,m_{l_\rho}\right\}$ values.

Time reduction for AS number's $W(\tilde{A})=\left\{m_{l_1},m_{l_2},...,m_{l_\rho}\right\}$ determining may subsequently increase the performance of the error verification, diagnosing and correction of data in RNS. Also, this feature will increase the efficiency of using non-positional code structures when creating computer systems and components [16-18].

References

1. Mohan, Ananda (2016), *Residue Number Systems*. Birkhäuser, Basel, 351 p.
2. Akushskii, I. Ya. and Yuditskii, D. I. (1968), *Machine Arithmetic in Residual Classes* [in Russian], Sov. Radio, Moscow.
3. Krasnobayev, V., Kuznetsov, A., Koshman, S. and Moroz, S. (2018), "Improved method of deter-mining the alternative set of numbers in residue number system", *Recent Developments in Data Science and Intelligent Analysis of Information. Proc. of the XVIII Int. Conf. on Data Science and Intelligent Analysis of Information*, Kyiv, Ukraine, pp. 319-328.
4. Chervyakov, N. I. (2017), "Residue-to-binary conversion for general moduli sets based on approximate Chinese remainder theorem", *International Journal of Computer Mathematics*, Vol. 94, No. 9, pp. 1833-1849.
5. Kasianchuk, M., Yakymenko, I., Pazdriy, I. and Zastavnyy, O. (2015), "Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system", *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, pp. 316-318. DOI: https://doi.org/10.1109/CADSM.2015.7230866.
6. 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*, Volume 55, Issue 4, pp. 692-698. https://doi.org/10.1007/s10559-019-00179-8.
7. Yadin, A. (2016), *Computer Systems Architecture*, CRC Press, 526 p.
8. Valvano, J. (2017), "Embedded Systems: Real-Time Operating Systems for Arm Cortex M Microcontrollers [2nd ed. edition]", *CreateSpace Independent Publishing Platform*, 486 p.
9. Tariq Jamil (2013), *Complex Binary Number System. Algorithms and Circuits*, Springer, India, 83 p.
10. 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, https://doi.org/10.1007/s10559-020-00323-9.
11. Amir Sabbagh, Molahosseini, Leonel, Seabra de Sousa and Chip-Hong, Chang (2017), *Embedded Systems Design with Special Arithmetic and Number Systems*, Springer International Publishing, 389 p.
12. Patterson, D. A., Hennessy, J. L. (2016), *Computer Organization and Design: The Hardware Software Interface: ARM Edition*. [The Morgan Kaufmann Series in Computer Architecture and Design], Morgan Kaufmann, 720 p.
13. Valvano, J. (2017), *Embedded Systems: Real-Time Operating Systems for Arm Cortex M Microcontrollers* [2nd ed. edition], CreateSpace Independent Publishing Platform, 486 p.
14. Hsu, J. Y. (2017), *Computer Architecture: Software Aspects, Coding, and Hardware*, CRC Press, 456 p.
15. Zirnbauer, M. R. (2018), *Symmetry classes*, *Oxford H-B. O*. DOI: https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780198744191.013.3.
16. 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.
17. Moroz, S. A. and Krasnobayev, V. A. (2011), "A data verification method in a non-positional residue number system", *Control, Navigation, and Communication Systems*, No. 2(18), pp. 134–138.
18. Kuznetsov, A. A., Smirnov, A. A., Danilenko, D. A. and Berezovsky, A.V. (2015), "The statistical analysis of a network traffic for the intrusion detection and prevention systems", *Telecommunications and Radio Engineering*, Vol. 74, pp. 61–78.

Received (Надійшла) 21.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 08.09.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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

Краснобаєв Віктор Анатолійович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електроніки і управляючих систем, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна;
Victor Krasnobayev – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Electronics and Control Systems Department, V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: v.a.krasnobaev@karazin.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-5192-9918.

Нікольський Сергій Борисович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики Комунального закладу "Харківська гуманітарно-педагогічна академія" Харківської обласної ради, Харків, Україна;
Serhii Nikolsky – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Informatics Department, Municipal establishment «Kharkiv humanitarian-pedagogical academy» of Kharkiv regional council, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: s.nikoloss@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/000-0002-3279-6459

Метод діагностики помилок даних комп'ютерної системи, що функціонує у системі залишкових класів

С. О. Кошман, В. А. Краснобаєв, С. Б. Нікольський

Анотація. Предметом статті є розробка методу діагностики помилок даних комп'ютерної системи функціонує у системі залишкових класів (СЗК). Даний метод ґрунтується на табличному принципі реалізації операції діагностики даних. **Метою** статті є зменшення часу виконання операції діагностики даних комп'ютерної системи, яка функціонує у СЗК в динаміці обчислювального процесу. **Задачі**: провести аналіз можливого застосування СЗК як системи числення у комп'ютерних системах обробки даних; дослідити існуючі методи діагностики даних і виявити можливі недоліки при діагностиці даних у динаміці обчислювального процесу при введенні мінімальної інформаційної надмірності; розробити метод діагностики даних представлених у СЗК, який заснований на табличному принципі реалізації операції діагностики даних. **Методи** дослідження: методи аналізу і синтезу комп'ютерних систем, теорія чисел, теорія кодування у СЗК. Отримані наступні **результати**. В роботі показано, що діагностика даних проводиться після виконання операції контролю. Для проведення операції діагностики даних у СЗК, при виникненні однократних помилок, використовуються методи визначення альтернативної сукупності (АС) чисел. При цьому основним недоліком розглянутих методів є значний час, необхідний для визначення АС. Для зменшення часу визначення АС чисел в роботі удосконалено метод діагностики даних у СЗК. Удосконалення методу передбачає складання таблиці (першого ступеня) відповідності кожному правильну числу можливій сукупності неправильних чисел при виникненні у даних однократних помилок. На підставі аналізу вмісту таблиці першого ступеня, складається таблиця (другого ступеня) відповідності кожного неправильного числа можливим значенням правильних чисел. **Висновки**. Використання вдосконаленого методу підвищує ефективність діагностики даних, які представлені у СЗК, за рахунок зменшення часу визначення АС чисел. Це досягається за рахунок швидкої вибірки попередньо розрахованих табличних значень АС чисел.

Ключові слова: система числення; система залишкових класів; комп'ютерна система; діагностика даних; таблична реалізація.

Метод диагностики ошибок данных компьютерной системы, функционирующей в системе остаточных классов

С. А. Кошман, В. А. Краснобаев, С. Б. Никольский

Аннотация. Предметом статьи является разработка метода диагностики ошибок данных компьютерной системы функционирующей в системе остаточных классов (СОК). Данный метод основывается на табличном принципе реализации операции диагностики данных. **Целью** статьи является уменьшение времени выполнения операции диагностики данных компьютерной системы, которая функционирует в СОК в динамике вычислительного процесса. **Задачи**: провести анализ возможного применения СОК как системы счисления в компьютерных системах обработки данных; исследовать существующие методы диагностики данных и выявить возможные недостатки при диагностике данных в динамике вычислительного процесса при введении минимальной информационной избыточности; разработать метод диагностики данных представленных в СОК, который основан на табличном принципе реализации операции диагностики. **Методы исследования**: методы анализа и синтеза компьютерных систем, теория чисел, теория кодирования в СОК. Получены следующие **результаты**. В работе показано, что диагностика данных проводится после выполнения операции контроля. Для проведения операции диагностики данных в СОК, при возникновении однократных ошибок, используются методы определения альтернативной совокупности (АС) чисел. При этом основным недостатком рассмотренных методов является значительное время, необходимое для определения АС. Для уменьшения времени определения АС чисел в работе усовершенствован метод диагностики данных в СОК. Усовершенствование метода предполагает составление таблицы (первой ступени) соответствия каждому правильному числу возможной совокупности неправильных чисел при возникновении в данных однократных ошибок. На основании анализа содержимого таблицы первой ступени, составляется таблица (второй ступени) соответствия каждого неправильного числа возможным значениям правильных чисел. **Выводы**. Использование усовершенствованного метода повышает эффективность диагностики данных, которые представлены в СОК за счет уменьшения времени определения АС чисел. Это достигается за счет быстрой выборки предварительно рассчитанных табличных значений АС чисел.

Ключевые слова: система счисления; система остаточных классов; компьютерная система; диагностика данных; табличная реализация.

UDC 004.6 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.11

Adil Ramazan Nastakalov

The Military Academy of the Armed Forces of Azerbaijan Republic, Baku, Azerbaijan

THE ASSESS THE FAULT-TOLERANCE, EFFİCİENCY AND PERFORMANCE OF MİLİTARY FİELD LOCAL NETWORK TOPOLOGY

Abstract. Depending on the location of communication nodes of the control points and points of relay in the field, especially in mountainous areas, finding line of sight (LOS) and establishing a good radio relay connection can be challenging. In addition, depending on the requirements for bandwidth and communication stability, in the field, a situation often arises where it is possible to build a network only based on certain types of topologies. To assess the security of military field telecommunication networks, it is important to determine such important parameters as network stability or fault-tolerance, efficiency**,** transmission capacity and delay time. It is known that the greatest values of these parameters are achieved in the type of "fully connected" network topology. However, low efficiency, high power consumption, difficulties in safely and hidden placement of a large number of vehicles in the battle area and the complexity of maintenance, as well as the fact that radio relay hardware vehicles consist mainly of 2 sets of radio relay devices make this type of topology unsuitable for field networks. Therefore, it is important to define a network topology with high stability, using the minimum amount of radio relay vehicles. For the above reason, the article proposes mathematical methods for calculating the fault tolerance and efficiency of the selected network topology, as well as fault tolerance, bandwidth and latency for each network node.

Keywords: control points; throughput; channel stability and delay time of communication channels; network topology; fault tolerance and efficiency of network topology; radio relay equipment.

Introduction

As you know, in a modern military field telecommunications network, communication between nodes is organized using radio relay stations and satellite communications based on Ethernet technologies, as well as optical cables. Sources of information are located in specially equipped server rooms away from hazardous areas. Information confidentiality is provided mainly by cryptographic tools based on complex algorithms. In terms of strength and performance, all of the above tools in most cases fully comply with modern requirements. However, the ever-changing conditions of the battlefield require a special approach to the resilience and performance of the network topology, as well as the efficient use of redundant communications.

In order to determine the most stable and efficient topology for providing users with access to information resources at nodes within certain specified limits, in advance, before creating a field telecommunication network, the article developed and presented a methodology for assessing the corresponding topology parameters.

Assess the fault-tolerant of the node

The node fault tolerance (T_N) characterizes the ability of a network to perform its functions with the specified quality, despite the failure of any element during a given period of operation [1]. The stability of the host depends on the stability of the hardware, devices and other elements used here and the method of interconnection, as well as the availability of reserves and replacement period (t_{rp} -replacement period) for fault devises (to simplify the procedure, the time required to replace the elements here is assumed to be greater than the time allowed for the host to pause):

$$T_N = T_{CD\Sigma} \cdot T_{ap\Sigma}, \quad (1)$$

where $T_{CD\Sigma}$ - is the final stability of n_{CD} series-connected elements commonly used for all radio relay apparatuses in the control point (index: *CD*-commonly used device):

$$T_{CD\Sigma} = \prod_{k=1}^{n_{CD}} P_{CD\,k}, \quad (2)$$

$T_{ap\Sigma}$ - is the final stability of n_{ap} radio relay apparatus applied in parallel:

$$T_{ap\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^{n_{ap}} (1 - P_{ap\,i}), \quad (3)$$

$P_{ap\,i}$ – the probability of uninterrupted operation of the elements common to all radio relay sets in the i radio relay apparatus; $T_{RR\Sigma}$ - is the total stability of a set of n_{RR} radio relays applied in parallel:

$$T_{RR\Sigma} = 1 - \prod_{j=1}^{n_{RR}} (1 - P_{RR\,j}), \quad (4)$$

$P_{RR\,j}$ – the probability of continuous operation of the j radio relay set.

In practice, each of the radio relay apparatus can operate autonomously, and the element common to all of them is mainly a single power source of the control centre. Since each radio relay apparatus is equipped with its own electric generator and uninterruptible power supply period (T_{UPS}), i.e. the availability of backup and $t_{rp} < T_{UPS}$ allows us to assume $T_{CD\Sigma}=1$. The topology sustainability report does not take into account the fact that there is a single number of workstations serving users and their reliability.

The uninterrupted operation of common elements in the radio relay apparatus is very critical for radio relay sets, in practice their failure (excluding the power supply) completely restricts access to the network, regardless of the number of sets in the apparatus, and adversely affects the stability of the network. Therefore, it is very important to ensure a high $T_{ap\Sigma}$ parameter in the hardware (Fig. 1).

The graph shows that if the number of radio relay sets is $n \geq 2$ and belong to different radio relay apparatus, i.e. $m \geq 2$, the stability of the host can be considered maximum, i.e. $T_N \approx 1$. However, at some nodes, the use of more than one apparatus is not only inefficient and difficult to provide electricity in the field, but also in terms of privacy and security. The radio relay sets can be connected to each other in such a way that the radio relay

© Nastakalov A. R., 2021

hardware continues to function as a transit in the network, despite the failure of general-purpose devices. Under such conditions, it is possible to accept $T_{ap\Sigma} = 1$ without taking into account the influence of these devices on the stability of the topology, and the connection of each node to the network from two directions ($n = 2$) can be considered satisfactory from the point of view of the stability of the topology, i.e. $T_N \approx 1$.

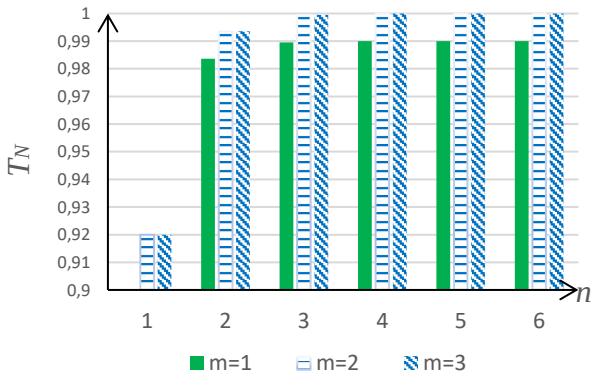


Fig. 1. Graph of the dependence of the host stability on the number of radio relay sets for *m=1, m=2* and *m=3* cases of the number of apparatuses

The expression for the probability of node failure can be written as follows: $Q_N = 1 - T_N$.

Depending on whether the devices are connected in series or in parallel in any group of elements at the control point, the total probability of continuous operation of that group is calculated as follows:

The total probability of continuous operation of n devices connected in series and also without backup (or the time required to replace the spare device exceeds the allowable break time):

$$P_{sd} = \prod_{k=1}^{n} P_k .$$

The total probability of continuous operation of *m* devices with "hot" reserve (2 connected in parallel):

$$P_{pd} = \prod_{t=1}^{m} (1 - (1 - P_1)(1 - P_2))_t .$$

The continuity of services for users at control points also depends on the number of channels the node connects to the network and the stability of the rest of the network.

Assess the fault-tolerant of the topology

The field telecommunications network must provide users at control points with safe, timely and with a given quality access to information resources, as well as the continuity of the services provided, regardless of internal and external destabilizing influences.

The stability of a telecommunications network is its ability to ensure uninterrupted access of hosts to information resources, regardless of the exit of one of its nodes or the loss of one of its channels.

The probability of uninterrupted operation of the network depends on the reliability of each nodes of networks, reliability of communication between them and reliability of implemented topology, as well as server redundancy and channel loading [2].

Considering that the probability of simultaneous failure of two or more network nodes or two or more channels is very small, sustainability of topology can be determined taking into account such parameters like the number of nodes connected in one direction (n_{deg1}) and their stability (T_{Ndeg1}); the number of critical links (n_{CL}) and nodes (n_{CN}), where their failure can be the reason for the loss of access to the servers of other nodes in the network, probabilities of failure of them (Q_{CL} and Q_{CN}); as well as the number of nodes (n_{DCN}) that are disconnected from the servers due to their failure and coefficients indicating levels of importance of them ($K_{I\Sigma\ DNC}$). Mathematically it can be written like this

$$T_T = T_{CN\Sigma} \cdot T_{CL\Sigma} \cdot T_{deg1} \qquad (5)$$

or $$T_T = \prod_{m=0}^{n_{CN}} T_{CN_m}^{\frac{K_{I\Sigma\ DNC}}{K_{I\Sigma\ N}}} \cdot \prod_{k=0}^{n_{CL}} T_{CL_k}^{\frac{K_{I\Sigma\ DNC}}{K_{I\Sigma\ N}}} \times$$

$$\times \left(1 - \frac{K_{I\Sigma\ deg1}}{K_{I\Sigma\ N}} \left(1 - \prod_{l=0}^{n_{deg1}} T_{Ndeg1_l} T_{Adeg1_l} T_{Ldeg1_l}\right)\right).$$

The expressions take into account the following critical factors that affect the stability of the network:

$T_{CN\Sigma}$ - is a multiplier that determines the influence of the probability of failure of critical nodes on the stability of the network, in the absence of a critical link, we take $T_{CN\Sigma} = 1$:

$$T_{CN\Sigma} = \prod_{m=0}^{n_{CN}} T_{CN_m}^{\frac{K_{I\Sigma\ DCN}}{K_{I\Sigma\ N}}}, \qquad (6)$$

where $K_{I\Sigma\ DNC} = \sum_{i=0}^{n_{DCN}} K_{I\,i}$ – is the sum of the coefficients indicating the importance of all nodes that lost accessability with the server due to the failure of the critical node (link); $K_{I\Sigma\ N} = \sum_{j=0}^{n_N} K_{I\,j}$ – is the sum of the coefficients indicating the importance of all nodes in the network. $T_{CL\Sigma}$ - fault tolerance of critical links, this multiplier determines the influence of the probability of failure of critical connections on the stability of the network, and in the absence of a critical link, we take $T_{CL\Sigma} = 1$:

$$T_{CL\Sigma} = \prod_{k=0}^{n_{CL}} T_{CL_k}^{\frac{K_{I\Sigma\ DCN}}{K_{I\Sigma\ N}}} .$$

Fig. 2 shows the number of critical nodes $n_{CN} = 1$, $n_{CN} = 2$, $n_{CN} = 3$, $n_{CN} = 4$ və $n_{CN} = 5$ (number of critical links $n_{CL} = 1$, $n_{CL} = 2$, $n_{CL} = 3$, $n_{CL} = 4$ və $n_{CL} = 5$), as well as the dependence of the $\boldsymbol{T_{CN\Sigma}}$ and $\boldsymbol{T_{CL\Sigma}}$ values on the ratio $K_{I\Sigma\ DCN}/K_{I\Sigma\ N}$ for network topologies with stability of all support points $\boldsymbol{T_{CN}} = 0.9$. As can be seen from the graph, the higher the number of critical nodes and the number of nodes that lose accessibility to the servers in the event of their failure, the lower the value of $\boldsymbol{T_{CN\Sigma}}$ bit.

If each network has a single critical link ($\boldsymbol{n_{CN} = 1}$) and its failure causes all other support points to lose contact with the server, i.e. $K_{I\Sigma\ DCN}/K_{I\Sigma\ N} = 1$, then the stability of the topology is affected, the value $\boldsymbol{T_{CN\Sigma}}$ ($\boldsymbol{T_{CL\Sigma}}$) will be determined by the stability of this critical node (link), in our example $\boldsymbol{T_{CN\Sigma}} = 0.9$. If the number of such critical nodes (links) increases, the value of the multiplier decreases even more.

T_{deg1}-is a multiplier that determines the influence of the probability of no-failure operation of nodes with one-way communication on the stability of the network, where is taking into account the fault tolerance of these

nodes (T_{Ndeg1}), fault tolerance adjacent nodes with them (T_{Adeg1}) and fault tolerance of the link between them (T_{Ldeg1}), as well as the ratio $K_{I\Sigma\ degr}/K_{I\Sigma\ N}$:

$$T_{deg1} = \\ = \left(1 - \frac{K_{I\Sigma\ deg1}}{K_{I\Sigma\ N}}\left(1 - \prod_{l=0}^{n_{deg1}} T_{Ndeg1_l} T_{Adeg1_l} T_{Ldeg1_l}\right)\right), \quad (9)$$

where $K_{I\Sigma\ DNC} = \sum_{i=0}^{n_{deg1}} K_{I\ deg1\ i}$ – is the sum of the cefficients indicating the importance of the nodes that communicate in one direction

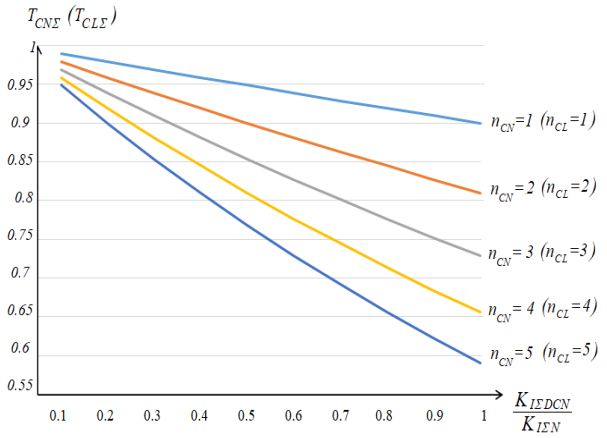


Fig. 2. Dependence of the final $T_{CN\Sigma}$ and $T_{CL\Sigma}$ values on the ratio $K_{I\Sigma\ DCN}/K_{I\Sigma\ N}$, which affects the fault tolerance of the network topology

Loss of communication links due to external influences can be caused by electromagnetic jamming or physical damage by the enemy any of the radio relay stations (h_i *or* h_j) that make it up, as well as due to unfavourable weather conditions. Therefore, for the stability or the probability of failure of links, we can write the following expression:

$$T_L = T_{EJ\ i} \cdot T_{EJ\ j} \cdot T_{PD\ i} \cdot T_{PD\ j} \cdot T_{UWC} \quad (9)$$

and $$Q_L = 1 - T_{CL}$$

where T_{EJ} - is the resilience of the *i* and *j* radio relay stations forming the link to electromagnetic jamming; T_{PD} - is the resilience of the *i* and *j* radio relay stations forming the link to physical destruction by the enemy; T_{UWC} - is the resilience of the link against the effects of adverse weather conditions.

The resilience of the radio relay stations forming the link depends on technical parameters such as the antenna directivity, the maximal output power of radio relay stations and applying automatic control mode for it, the immunity to interference of the used type of modulation and its automatic adjustment, applying anti-jamming technology (OFDM, MIMO), selected frequencies and channel width, applying frequency hopping mode, frequency hopping speed and hopping algorithm complexity, the he signal-to-interference ratio required for the normal operation of the radio relay station, as well as on factors such as the maximal output power of electronic warfare station, the distance between the radio relay and electronic warfare stations, the angle between the link and the direction to the electronic warfare station and topography. To evaluate T_{EJ} parameter, there are appropriate methodologies that take into account the above factors and can be calculated [3].

The likelihood of physical disabling of a radio relay station depends on the proximity of its location in the enemy's engagement zone, the intensity of fire and the presence of the enemy with high-precision weapons, as well as the possibility of penetration of reconnaissance and sabotage groups. The choice of safe places for stations and their antenna feeder devices, the organization of the security of the communication centre, the installation of equipment on armoured vehicles, the effective use of the protective and masking capabilities of the terrain reduces this possibility. In addition, the presence of a reserve in a safe area in short distance, the availability of safe road infrastructure, weather conditions, cross-country ability of vehicles and staff training level are important factors for recovery of a failed station in a short time. The evaluation of T_{PD} can be done experimentally, taking into account the above factors. In order to identify critical links (*CL*) and critical nodes (*CN*), as well as other suitable parameters a new algorithm is proposed, based on the Dijkstra algorithm from Graph theory. Algorithm sequence:

1. The initial parameters of the topology are determined from the database in the following sequence:

1.1. Number of nodes in the network, $\boldsymbol{n_N}$;

1.2. The coefficients indicating the importance of all nodes in the network, $\boldsymbol{K_I}$;

1.3. Minimum bandwidth of links, $\boldsymbol{F_{Lmin}}$;

1.4. The fault-tolerance of nodes due to internal reasons, $\boldsymbol{T_N}$;

1.5. The fault-tolerance of nodes to electromagnetic attenuation, $\boldsymbol{T_{EJ}}$;

1.6. The fault-tolerance of nodes to physical destruction, $\boldsymbol{T_{PD}}$;

1.7. Nodes connected to a local stationary network (servers), $\boldsymbol{n_{ST}}$;

2. ***Bandwidth table*** showing the adjacent nodes for each node and their throughput is compiled. The columns of the *bandwidth table* are:

2.1. List of adjacent nodes (stationary node inclusive if there is a connection to it);

2.2. Bandwidth with each adjacent node (bandwidth with stationary node can be take 1*Qbitps*);

2.3. The degree of nodes, ***degN***;

3. Using Dijkstra's algorithm in graph theory, a subroutine is developed to check if there is a path between each node;

4. Critical nodes are defined and the value $T_{CN\Sigma}$ is calculated, for which:

4.1. The nodes in the network where ***degN*** ≥2 are cancelled one by one (for this it is enough to select their throughput in the *matrix* equal to 0) and move on to point 3;

4.2. If there is a node that loses contact with the static local network (server), the cancelled nodes are considered critical and are defined as follows:

4.2.1. The number of cancelled nodes is added to the list "***CN*** - Critical Nodes" and the number ($\boldsymbol{n_{CN}}$) is determined;

4.2.2. Lists of nodes that lose contact with the stationary network (server) due to failure of each critical node are compiled, as well as the number ($\boldsymbol{n_{DCN}}$) and degrees of importance of them ($K_{I\Sigma\ DNC}$) are calculated;

4.3. The value $T_{CN\Sigma}$ is calculated based on the (6);

5. Critical links are identified and the value $\boldsymbol{T_{CL\Sigma}}$ is calculated, for which:

5.1. The links in the network are cancelled one by one (for this it is enough to select the corresponding capacity of the nodes forming that link in the matrix equal to 0) and move on to point 3;

5.2. If there is a node that loses contact with the static network (server), the cancelled links are considered critical and the following are defined:

5.2.1. The number of cancelled nodes is added to the list "CL - Critical Links" and the number ($\boldsymbol{n_{CL}}$) is determined;

5.2.2. Lists of nodes that lose contact with the stationary network (server) due to failure of each critical link are compiled, as well as the number ($\boldsymbol{n_{DCN}}$) and degrees of importance of them ($K_{I\Sigma\ DNC}$) are calculated;

5.3. The value $\boldsymbol{T_{CL\Sigma}}$ is calculated based on the expression (7)

6. The $\boldsymbol{T_T}$ fault-tolerance of the topology is calculated based on the expression (5)

Assess the efficiency of the topology

Topology efficiency is the ability of a network to perform specified functions in accordance with specified requirements using a minimum number of tools. This parameter is proposed to be determined by the ratio of the minimum number of radio relay stations (obviously this is n_N, when $n_N \geq 3$ and there are usually 2 radio relay sets in each radio relay stations) required to connect nodes from at least two directions to the number of radio relay devices used:

$$E_T = \frac{n_N}{n_{ap}} = \frac{n_N}{\sum_i^{n_N}([deqN/2]+n_{ex})_i}, \qquad (10)$$

where $\lceil deqN/2 \rceil$ - is the minimum number of radio relay stations (taking into account that it contains 2 sets of radio relays) required at the *i* node; n_{ex} - is the number of RR apparatus supplied to the support *i* node in addition to the required.

Evaluating Network Topology Performance

İn field control points, it is required to provide users within the established limits with access to information resources located in stationary centres. In modern times, the requirement to organize a live video conference for management staff between control points, as well as the sending of video images from various surveillance cameras for users requires high performance of the information and telecommunications system. Therefore, it is important to assess the ability to transfer information from a stationary network to a local area network established in the field, and to identify a more productive topology. It is also necessary to know the time parameters such as packet latency and response time in order to provide access to information resources located in stationary centres for users at the nodes [4].

Depending on the value of the *degN* of nodes of the field telecommunication network and the information transmission capacity of adjected nodes, it is recommended to select the most suitable node for integration of the desert telecommunication network into the stationary network as follows:

1. The minimum information transfer rates required for node and for the entire network are defined:

$$F_{N\ OUT} = \sum_{RN=1}^{k} n_{RN} \cdot F_{RN}; \qquad (11)$$

and

$$F_{\sum OUT} = \sum_{n=1}^{nN} F_{N\ OUT}.$$

where $n_{RN} \cdot F_{RN}$ is the final transfer rate required at the node for each communication type (n_{RN} is the number of users in that communication type and F_{RN} is the minimum transmission speed required for one channel in this type of communication), n_N is the number of reference points.

2. For each node, the maximum speed that a stationary network can be send to the field telecommunication network using that it is determined here:

$$F_{IN} = \sum_{j=1}^{degN} F_{Aj}, \qquad (12)$$

where F_{Aj} is the capacity of the connection with the adjacent node, *degN* - the number of connections of the support point with neighbouring nodes.

3. If any node (source) is connected to a stationary network, the transmission speeds to be provided at each other node (target) are determined. The Ford-Fulkerson algorithm can be used for this purpose.

4. The final flow rate to the network is calculated.

5. Nodes that affect the speed of receiving information in each node from central data sources are identified.

Conclusion

1. To maximize the stability of nodes in a field computer network, it is sufficient to install them on two radio relay apparatuses, each with two sets of radio relays.

2. In order to ensure reliable access to information resources in the field computer network, each node is required to be connected to the network from at least two directions.

3. It is required to have spare parts for devices with a high probability of failure in the radio relay apparatus and to make the necessary preparations for their replacement in a short time, as well as to arrange supply bases in a convenient place to ensure that spare parts and devices are delivered to the fault point in a short time.

4. The fault tolerance of the topology plays a more critical role in the field computer network based on radio relays in terms of network security.

5. Assessing the fault-tolerant of a topology based on the following critical factors can provide a more accurate result:

a. The fault tolerance of critical nodes, as well as the number of nodes that lose contact with the servers in the event of their failure, the degree of importance of them and the ratio of the number of total nodes;

b. The fault tolerance of critical links, the importance and number of support points that lose contact with servers in the event of their failure, and the ratio of this number to the total number of support points.

c. The number of nodes with just a single connection and the ratio of this number to the total number of all nodes of network, the degree of importance and the fault tolerance of each, as well as the fault tolerance of adjected node with it, the fault tolerance of the link between them.

6. The Dijkstra algorithm in Graph theory can be used to identify critical links and points, for which the appropriate algorithm is presented above.

7. Depending on the node to which the servers are connected, the speed of data transmission to and from the field computer network is different and depends on the bandwidth of links of the nodes with neighbours.

8. The maximum velocities of information flow, which can be transmitted individually and simultaneously to each reference point, are determined by the Dijkstra algorithm in Graph theory.

9. The delay in the flow of information from servers to support points varies depending on the chosen route.

10. Depending on the speed and latency requirements of the information type, suitable routes should be calculated in advance, and for these routes in the network devices, appropriate adjustments should be made.

11. On servers and workstations in communication centres, appropriate adjustment work should be carried out taking into account the speed and delay of data transmission.

REFERENCES

1. Borsh, V.I., Koval, V.V. and Tumanov, Yu.G. (2000), "Probability of non-failure operation of radio access equipment to fixed telecommunication networks", *Communication equipment*, Academy of Communications, Odessa, pp. 29–31.
2. Kayashev, A.I., Rakhman, P.A. and Sharipov, M.I. (2013), "Analysis of reliability indicators of local computer networks", *Vestnik USATU*, Vol. 17, No. 5 (58), pp. 140–149.
3. Butakova, M.A., Lindenbaum, M.D. and Moskat, N.A. (2009), "Calculation of the reliability of the functioning of industry information networks", *Izvestiya vuzov, North-Caucasian region, Technical science*, No. 5, pp. 32–37.
4. Muriel, Médard (2003), *Network Reliability and Fault Tolerance*, Massachusetts Institute of Technology | MIT Department of Electrical Engineering and Computer Science, Laboratory for Information and Decision Systems, Cambridge, MA 02139,

Received (Надійшла) 27.05.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 14.07.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Adil Ramazan Nastakalov – PhD student of the Military Academy of the Armed Forces of Azerbaijan Republic, Baku.
Аділ Рамазан Настакалов - ад'юнкт Військової Академії Збройних Сил Азербайджанської Республіки, Баку.
e-mail: adil.nastakalov.75@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1040-3869.

Оцінка надійності, ефективності і продуктивності топології військово-польової локальної мережі

А. Р. Настакалов

Анотація. Залежно від розташування вузлів зв'язку в пунктах управління і точок ретрансляції в польових умовах, особливо в гірських районах, знаходження точок з прямою видимістю і встановлення хорошого радіорелейного з'єднання з сусідніми вузлами може бути складним завданням. Крім того, в залежності від вимог до пропускної здатності і стабільності зв'язку в польових умовах часто виникає ситуація, коли можна побудувати мережу тільки на основі певних типів топологій. Для оцінки безпеки телекомунікаційних мереж військового призначення важливо визначити такі важливі параметри, як відмовостійкість і ефективність мережі, пропускна здатність і час затримки каналів зв'язку. Відомо, що найбільші значення цих параметрів досягаються в топології мережі типу «повнозв'язна». Однак низька ефективність, високе енергоспоживання, складності з безпечним і прихованим розміщенням великої кількості техніки в зоні бойових дій і складність обслуговування, а також той факт, що радіорелейний апаратура складається в основному з 2 комплектів радіорелейних пристроїв. роблять цей тип топології непридатним для польових мереж. Отже, важливо визначити топологію мережі з високою стабільністю, використовуючи мінімальну кількість радіорелейних транспортних засобів. За вищевказаній причині в статті пропонуються математичні методи розрахунку відмовостійкості і ефективності обраної топології мережі, а також відмовостійкості, пропускної спроможності і затримки для кожного мережевого вузла.

Ключові слова: пункти управління; пропускна здатність; стабільність каналу та час задержки каналів зв'язку; топологія мереж; відказостійкість та ефективність топології мереж; радіорелейна апаратура.

Оценка надежности, эффективности и производительности топологии военно-полевой локальной сети

А. Р. Настакалов

Аннотация. В зависимости от расположения узлов связи в пунктах управления и точек ретрансляции в полевых условиях, особенно в горных районах, нахождения точек с прямой видимостью (LOS) и установление хорошего радиорелейного соединения с соседними узлами может быть сложной задачей. Кроме того, в зависимости от требований к пропускной способности и стабильности связи в полевых условиях часто возникает ситуация, когда можно построить сеть только на основе определенных типов топологий. Для оценки безопасности телекоммуникационных сетей военного назначения важно определить такие важные параметры, как отказоустойчивость и эффективность сети, пропускная способность и время задержки каналов связи. Известно, что наибольшие значения этих параметров достигаются в топологии сети типа «полносвязная». Однако низкая эффективность, высокое энергопотребление, сложности с безопасным и скрытым размещением большого количества техники в зоне боевых действий и сложность обслуживания, а также тот факт, что радиорелейная аппаратура состоит в основном из 2 комплектов радиорелейных устройств. делают этот тип топологии непригодным для полевых сетей. Следовательно, важно определить топологию сети с высокой стабильностью, используя минимальное количество радиорелейных транспортных средств. По вышеуказанной причине в статье предлагаются математические методы расчета отказоустойчивости и эффективности выбранной топологии сети, а также отказоустойчивости, пропускной способности и задержки для каждого сетевого узла.

Ключевые слова: пункты управления; пропускная способность; стабильность канала и время задержки каналов связи; топология сети; отказоустойчивость и эффективность топологии сети; радиорелейная аппаратура.

УДК 621.399 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.12

О. В. Струцінський[1], В. Д. Карлов[2], А. О. Ковальчук[2], М. В. Бархударян[2], В. А. Ковальчук[2]

[1] Військова частина А 0215Г, Вінниця, Україна
[2] Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ АВТОСУПРОВОДЖЕННЯ ВИСОКОМАНЕВРЕНИХ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ РАДІОТЕХНІЧНИМИ СЛІДКУЮЧИМИ СИСТЕМАМИ БАГАТОКАНАЛЬНОЇ РЛС

Анотація. Багатоканальні радіолокаційні станції (РЛС) з фазованими антенними решітками (ФАР) широко застосовуються для супроводження повітряних об'єктів. Використання ФАР у комбінації з цифровою обчислювальною технікою дозволяє керувати діаграмою спрямованості (ДС) РЛС і супроводжувати декілька цілей в режимі розподілу часу. Супроводження повітряних цілей в багатоканальній РЛС забезпечується підсистемами визначення дальності, радіальної швидкості та кутових координат, в більшості випадків, без адаптації до характеристик зовнішніх впливів. Так, при супроводженні високоманеврених повітряних цілей, до яких відносяться, в першу чергу, винищувачі 5-го і так званого 4^{++}-го поколінь, відбувається суттєве зниження точності і стійкості супроводження відносно ділянки відсутності маневрування, яка буває досить тривалою. У разі налаштування алгоритмів слідкуючих систем на низьку інтенсивність або відсутність маневрування, надто суттєве зростання помилки супроводження літального апарату на ділянці здійснення маневру призведе до зриву автосупроводження за рахунок значної динамічної складової помилки. В даній публікації проведено аналіз точності автосупроводження маневруючих цілей підсистемами дальності, радіальної швидкості та кутових координат з фіксованими параметрами у разі, коли налаштування параметрів алгоритмів слідкуючих систем співпадають з характеристиками зовнішніх впливів. Досліджено вплив параметрів моделі спостережень, стохастичної моделі руху цілі з експоненціально корельованими значеннями прискорення цілі, а також періоду вимірювання координат на потенційну точність автосупроводження радіотехнічними слідкуючими системи багатоканальної РЛС. Для оцінки стійкості автосупроводження запропоновано використання еквівалентного розміру апертури дискримінаційної характеристики. Проведено оцінку впливу параметрів стохастичної моделі руху цілі, моделі спостережень та періоду вимірювання координат на стійкість автосупроводження за дальністю, радіальною швидкістю та кутовими координатами. Виявлено, що "слабким місцем" є система автосупроводження за радіальною швидкістю. В результаті проведених досліджень з'являється можливість подальшої оцінки доцільності адаптації до маневрених характеристик цілей та надання рекомендацій щодо вибору періоду вимірювання координат.

Ключові слова: система автоматичного супроводження; дисперсія похибки екстраполяції; дальність; радіальна швидкість; кутові координати; слідкуюче вимірювання.

Вступ

Постановка проблеми. Важливою властивістю сучасних літаків є надманевреність – здатність літака зберігати стійкість та керованість і наводити зброю на ціль при критичних кутах атаки. Надманевреними вважаються літаки, як правило це винищувачі 4^{++}-го та 5-го поколінь, в яких за рахунок спеціальних органів керування підйомною та боковими силами і використанням високоенергетичних двигунів з керованим вектором тяги можливо виконання маневрів з суттєво більш складними просторовими змінами, що може викликати складнощі їх супроводження в РЛС [1]. Найбільш відомими видами маневру сучасних винищувачів є "Хук", "J-turn", "Кульбіт" (рис. 1).

Основною характеристикою стійкості супроводження є ймовірність відсутності зриву автосупроводження (АС) протягом певного інтервалу часу. Однак у зв'язку з нелінійними характеристиками дискримінаторів, що визначають граничні умови, є складнощі в отриманні аналітичного і, навіть, чисельного розв'язку задачі.

Виключенням є розглянутий в [2] випадок безперервної системи першого порядку, де здійснюється кусково-лінійна апроксимація реальної дискримінаційної характеристики (ДХ), що має постійну крутість у межах

Маневр "Хук": відхилення більш, ніж на 90° корпусу літака в напрямку на уявну ціль, т а повернення до попереднього положення

Маневр "J-turn": розворот з малим радіусом на 180°

Маневр "Кульбіт": літак розвиває велику кутову швидкість обертання, і продовжуючи його, повертається в початкове положення, зробивши переворот на 360°

Рис. 1. Фігури вищого пілотажу, які можуть виконувати винищувачі поколінь 4^{++} та 5
(**Fig. 1.** Aerobatics that can be performed by fighters of generations 4 ++ and 5)

 © Струцінський О. В., Карлов В. Д., Ковальчук А. О., Бархударян М. В., Ковальчук В. А., 2021

інтервалу $(-L_x/2, L_x/2)$, де L_x - ширина апертури еквівалентної ДХ, і дорівнює нулю за цими межами (рис. 2, суцільна лінія). У цьому випадку зрив АС відбувається при першому досягненні помилкою величини $\pm L_x/2$. Тому оцінку стійкості АС можна здійснювати шляхом зіставлення помилки з напівшириною еквівалентного розміру апертури ДХ.

В [3] запропоновано використовувати еквівалентну кусково-лінійну апроксимацію ДХ для оцінки стійкості АС в дискретних радіотехнічних слідкуючих системах високого порядку за ймовірністю потрапляння помилки екстраполяції координати усередину інтервалу $(-L_x/2, L_x/2)$.

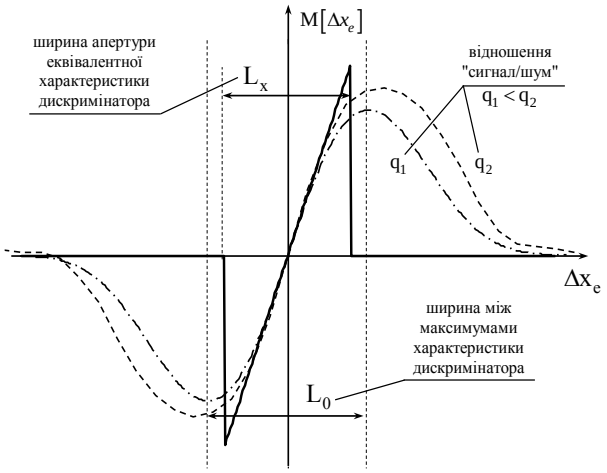


Рис. 2. Дискримінаційна характеристика дискримінатора та її апроксимація: Δx_e – помилка екстраполяції координати; $M[\Delta x_e]$ – математичне сподівання величини вихідної напруги дискримінатора
(**Fig. 2.** Discriminatory characteristics of the discriminator and its approximation)

Такий підхід не враховує ймовірності повернення помилки в наступних радіоконтактах у припустимі межі через особливості еволюції щільностей розподілу ймовірностей для похідних помилки супроводження, і тому з математичної точки зору він не є цілком коректним. Втім, якщо врахувати різке зростання величин флуктуаційної характеристики дискримінатору при наближенні помилки екстраполяції координати цілі до границь його апертури, така ймовірність стає чисто гіпотетичною й може не враховуватись в розрахунках.

Як відомо, у лінійних слідкуючих системах помилки супроводження (екстраполяції Δx_e) мають нормальний закон розподілу [4, 5], а ймовірність знаходження помилки екстраполяції в межах інтервалу $(-L_x/2, L_x/2)$ визначається функцією помилок

$$P_{1x} = 0{,}5\left[erf\left[\frac{0{,}5L_x + m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] + erf\left[\frac{0{,}5L_x - m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] \right], \quad (1)$$

де m_e, σ_e – математичне сподівання (систематична складова) та середньоквадратичне відхилення помилки екстраполяції координати, відповідно.

У випадку, якщо алгоритми оцінювання й екстраполяції слідкуючої системи мають структуру, адекватну моделі руху цілі, систематична складова помилки дорівнює нулю, і вираз (1) набуває вигляду

$$P_{1x} = erf\left[L_x \Big/ \left(2\sqrt{2}\sigma_e \right) \right]. \quad (2)$$

У першому наближенні (1) і (2) можна сприймати як вирази для ймовірності відсутності зриву супроводження протягом одного інтервалу $T_n = t_n - t_{n-1}$ між радіоконтактами з ціллю. На практиці таке наближення буде давати адекватний результат при $\sigma_e << L_x$, тобто, при $P_{1x} \approx 1$. Якщо ж помилка екстраполяції порівняна з напівшириною апертури, що відповідає величинам $P_{1x} < 0{,}9$, то через нелінійність характеристик дискримінаторів щільності розподілів ймовірностей помилок оцінювання й екстраполяції будуть досить помітно відрізнятися від нормальних. Проте, і в цьому випадку для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження можна використовувати вирази (1), (2), якщо в них еквівалентний розмір апертури L_x встановлювати з урахуванням відношення “сигнал / шум” q. При доборі L_x головним критерієм, який гарантує можливість використання виразів (1), (2) для оцінки ймовірності відсутності зриву автосупроводження, має бути збіг результатів статистичних випробувань стійкості супроводження системи з реальним дискримінатором, і аналітичних розрахунків.

Розв'язок задачі відшукання еквівалентного розміру L_x апертури дискримінатора може бути проведений в декілька етапів. На першому етапі виконується підготовка вихідних даних для проведення статистичного експерименту: відпрацьовується модель руху цілі; визначаються статистичні характеристики дискримінатора системи супроводження; задаються структура й параметри алгоритмів системи супроводження.

На другому етапі проводиться статистичний експеримент з визначення залежності ймовірності відсутності зриву слідкування від відношення “сигнал / шум” та маневрених можливостей літального апарату із реальним дискримінатором.

Третій етап характеризується знаходженням величини еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора L_x за збігом результатів аналітичних розрахунків за виразами (1), (2), та експерименту, з реальною характеристикою дискримінатора.

Отже, подальші дослідження стійкості супроводження здійснюються із використанням визначеної величини L_x й виразів (1), (2). Недоліком розглянутої методики є необхідність проведення складного й об'ємного статистичного дослідження на другому етапі. Однак тільки це може гарантувати вірогідність результатів, що даються аналітичними розрахунками ймовірності відсутності зриву супроводження (1), (2).

Еквівалентний розмір апертури взагалі залежить від структури системи супроводження і визначається стосовно до конкретного типу дискримінатора його параметрами, а також співвідношенням “сигнал /

шум". Зазначена обставина дозволяє проводити широке дослідження впливу структури й параметрів алгоритмів оцінювання й екстраполяції координат цілей на стійкість супроводження в системах, що використовують певний тип дискримінатора, для якого одноразово розраховано еквівалентний розмір апертури ДХ. Відповідно до викладеної методики проведено порівняльний аналіз стійкості супроводження надманеврених літальних апаратів за дальністю, радіальною швидкістю й кутовими координатами стосовно того типу дискримінаторів, що використовуються в сучасних РЛС сантиметрового діапазону. Максимальна стійкість супроводження, як випливає з (1), (2), досягається в системах, оптимальних за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки супроводження. Для проведення порівняльного аналізу за базові прийнято такі слідкуючі системи, алгоритми оцінювання й екстраполяції координат яких при супроводженні маневруючих цілей є оптимальними за визначеним критерієм.

Основний матеріал

Модель руху маневруючих літальних апаратів. Оскільки причиною руху матеріальних об'єктів є діючі на них сили, основою для побудови моделі руху об'єкта є другий закон Ньютона й рівняння кінематики, які зв'язують між собою вектори прискорення, швидкості й положення об'єкта. Модель руху об'єкта в більшості практичних випадків будують на основі кінематичних рівнянь і статистичної моделі прискорень. Для математичного опису руху сучасних літальних апаратів пропонується застосовувати модель руху маневруючих цілей [6], в якій складові вектора прискорення об'єкта покладаються взаємно незалежними експоненціально корельованими випадковими процесами із багатопіковою щільністю розподілу ймовірностей (рис. 3). Синтез алгоритму оцінювання стану об'єкта при такій щільності розподілу ймовірностей складових вектора прискорення не може проводитися в рамках теорії оптимальної лінійної фільтрації, у зв'язку із чим багатопіковий розподіл ймовірностей, який досить адекватно відображає характер зміни прискорення багатьох маневруючих об'єктів, замінюється еквівалентним нормальним розподілом. При цьому математичне сподівання складових вектора прискорення покладається рівним нулю, а середньоквадратичне відхилення обчислюється наступним чином:

$$\sigma_м = w_{\max} \cdot (1 + 4P_1 - P_0)/3, \qquad (3)$$

де $w_{\max} = n_{\max} g$ – максимальне значення прискорення, обумовлене маневреними можливостями повітряної цілі (максимальними перевантаженнями $n_{\max}$); P_1 – імовірність маневру з інтенсивністю $\pm w_{\max}$; P_0 – імовірність відсутності маневру. Кореляційна функція величин прискорення цілі при цьому має вигляд:

$$R_м(\tau) = \sigma_м^2 \exp\left(-|\tau|/T_м\right), \qquad (4)$$

де $T_м$ – стала маневрування повітряного об'єкта, величина, зворотна частоті маневрування, може становити від одиниць до десятків секунд; $\sigma_м^2$ – дисперсія значень прискорення повітряного об'єкта.

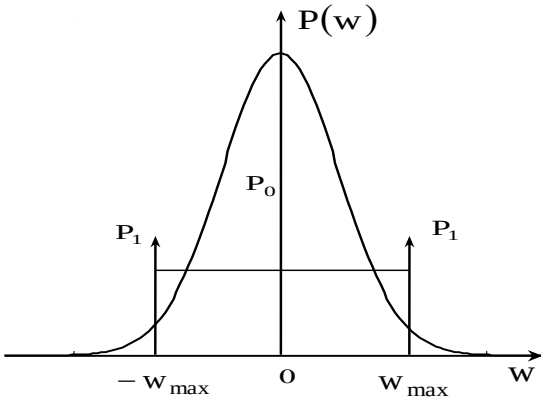


Рис. 3. Багатопікова щільність розподілу ймовірностей (**Fig. 3.** Multi-peak probability density)

Ймовірності P_1 і P_0 визначаються, виходячи з аналізу тактики застосування винищувальної авіації й можуть змінюватися в широких межах. Так, на рис. 4 наведені графіки залежностей $\sigma_м$ від $w_{\max}$, P_1 і P_0, відповідно.

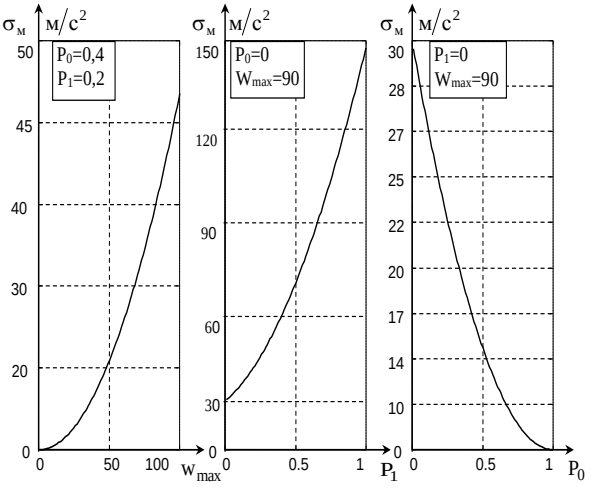


Рис. 4. Залежності $\sigma_м$ від $w_{\max}$, P_1 і P_0

(**Fig. 4.** Dependencies $\sigma_м$ from $w_{\max}$, P_1 and P_0)

Аналізуючи графіки, бачимо, що величина $\sigma_м$ залежно від співвідношення між P_1 й P_0 може змінюватись в досить широких межах.

Використовуючи метод формуючого фільтра, запишемо стохастичне рекурентне матричне рівняння стану [4, 7]:

$$\overline{x}(t_n + T_n) = \Phi(T_n)\overline{x}(t_n) + B\eta(t_n), \qquad (5)$$

де $\overline{x}(t_n)$, $\overline{x}(t_n + T_n)$ – поточне та наступне значення координати цілі, відповідно; $\Phi(\mathrm{T_n})$ – перехідна матриця стану за дальністю й кутовим координатам:

$$\Phi(\mathrm{T_n}) = \begin{pmatrix} 1 & \mathrm{T_n} & \mathrm{T_n^2}/2 \\ 0 & 1 & \mathrm{T_n} \\ 0 & 0 & \rho \end{pmatrix},$$ або перехідна матриця стану за радіальною швидкістю:

$$\Phi(\mathrm{T_n}) = \begin{pmatrix} 1 & \mathrm{T_n} \\ 0 & \rho \end{pmatrix}; \qquad (6)$$

B – матриця збудження за дальністю й кутовим координатам: $B = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{\mathrm{T}}$, або матриця збудження за радіальною швидкістю: $B = (0\ 1)^T$; $\eta(t_n)$ – послідовність шумів збудження з нульовим середнім і дисперсією $v_\eta(T_n) = \sigma_м^2(1-\rho^2)$ для дальності й радіальної швидкості, та $v_\eta(T_n) = \sigma_м^2(1-\rho^2)/r^2$ – для кутової координати; $\rho = e^{-T_n/T_м}$ – коефіцієнт кореляції значень прискорення на інтервалі спостережень.

Модель спостережень. Характеристики дискримінаторів. Відомо, що вихідна величина дискримінатора визначається наступним виразом [4]:

$$y(t_n) = F\left[\Delta x_e(t_n)\right] + f(t_n), \qquad (7)$$

де $F\left[\Delta x_e(t_n)\right]$ – математичне сподівання величини вихідної напруги дискримінатора, обумовлене його ДХ; $f(t_n)$ – дискретна послідовність шумів спостереження з нульовим середнім і дисперсією v_f, що визначається флуктуаційною характеристикою дискримінатора; $\Delta x_e(t_n) = x(t_n) - x_e(t_n)$ – величина неузгодженості між дійсним і екстрапольованим значеннями координати цілі. Для виконання порівняльного аналізу стійкості супроводження необхідно знання статистичних характеристик часового, частотного й кутового дискримінаторів. Для часового дискримінатора системи автосупроводження за дальністю РЛС сантиметрового діапазону, основними вихідними даними були тривалість зондуючих імпульсів в пачці (τ_u = 0,75 мкс) та тривалість селекторних імпульсів прямокутної форми (τ_{cu} = 0,4 мкс). Частотний дискримінатор системи АС за радіальною швидкістю виконаний на розузгоджених контурах з рознесенням за частотою $\Delta \mathrm{f_Д} = 500$ Гц при ширині спектра сигналу $\Delta \mathrm{f_c} = 450$ Гц. Парціальні ДС антенної системи моноімпульсного пеленгаційного пристрою рознесено на кут 0,01 рад при ширині кожної з них за рівнем половинної потужності $\Delta\theta_{0,5P} = 0,012$ *рад*. Статистичне моделювання проводилося з урахуванням обробки прийнятого сигналу в приймачі і його нормування схемою автоматичного регулювання підсилення. Результати статистичного моделювання характеристик кутового дискримінатора наведені на рис. 5, 6 для різних значень відношення "сигнал / шум". ДХ за оссю ординат (рис. 5) побудована у відносному масштабі шляхом поділу вихідної величини дискримінатора на крутість його статичної характеристики. Відзначимо, що завдяки роботі системи автоматичного регулювання підсилення в прийомному тракті, зменшення відношення "сигнал / шум" на вході приймача практично не позначається на крутості ДХ, але веде до звуження ширини апертури. При малих неузгодженнях дисперсії помилок виміру (спостереження) слабо залежать від величини неузгодженості (рис. 6).

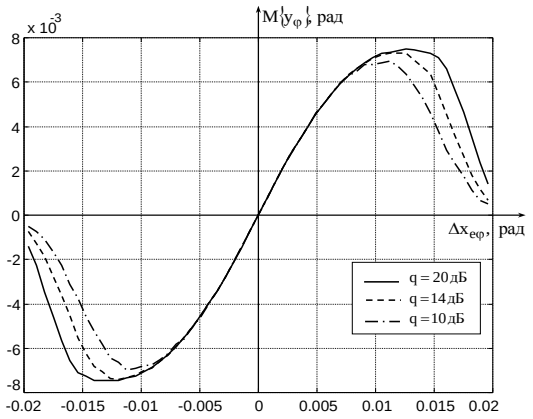


Рис. 5. Дискримінаційна характеристика кутового дискримінатора (**Fig. 5.** Discriminatory characteristics of the angular discriminator)

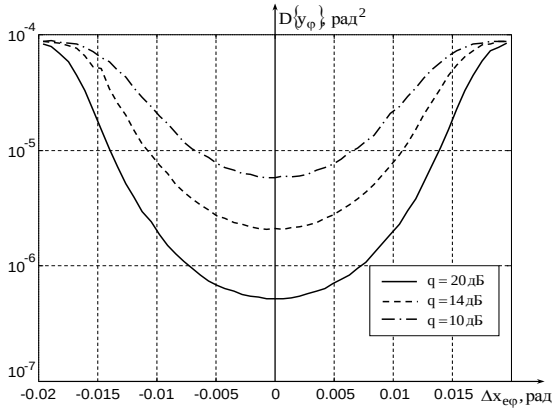


Рис. 6. Флуктуаційна характеристика кутового дискримінатора (**Fig. 6.** Fluctuation characteristic of the angular discriminator)

Зазначені обставини дозволяють для зручності розв'язку задачі оцінки стійкості супроводження використовувати лінеаризовану (еквівалентну) математичну модель дискримінатора (модель спостережень), яка описується рівнянням:

$$y(t_n) = \Delta x_e(t_n) + f(t_n). \qquad (8)$$

Для рішення задачі визначення ширини апертури еквівалентної характеристики дискримінатора використовувалась нелінійна математична модель дискримінатора, в якій були враховані граничні ефекти, що виникають при виході помилки супроводження за межі лінійної ділянки ДХ.

Структура лінійних алгоритмів оцінювання й екстраполяції. Рівняння моделі спостережень (8) можна також записати, як:

$$y(t_n) = \mathrm{H}(\bar{x}(t_n) - \bar{x}_e(t_n)) + f(t_n), \qquad (9)$$

де H – матриця спостережень за дальністю й кутовою координатою: $\mathrm{H} = (1\ \ 0\ \ 0)$, або матриця спостережень за радіальною швидкістю: $H = (1\ 0)$; $f(t_n)$ – послідовність некорельованих шумів спостереження відповідної координати з нульовим середнім і дисперсією $v_f(t_n)$; $\bar{x}_e(t_n)$ – вектор-стовпець екстрапольованих до поточного виміру координат стану цілі.

Алгоритм слідкуючої системи, оптимальної за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки,

може бути описаний рекурентними рівняннями оцінювання й екстраполяції [4]:

$$\hat{\bar{x}}(t_n) = \hat{\bar{x}}_e(t_n) + K(t_n)\ y(t_n)\,, \qquad (10)$$

$$\hat{\bar{x}}_e(t_n + \mathrm{T}_n) = \Phi(T_n)\hat{\bar{x}}(t_n)\,, \qquad (11)$$

де $K(t_n)$ – матриця коефіцієнтів підсилення, яка розраховується з таких рекурентних рівнянь:

$$K(t_n) = V_e(t_n)\mathrm{H}^T\left[\mathrm{H}V_e(t_n)\mathrm{H}^{\mathrm{T}} + v_f(t_n)\right]^{-1}, \quad (12)$$

$$V(t_n) = V_e(t_n) - V_e(t_n)H^{\mathrm{T}} \times \times\left[HV_e(t_n)H^{\mathrm{T}} + v_f(t_n)\right]^{-1} HV_e(t_n); \qquad (13)$$

$$V_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n)V(t_n)\Phi^{\mathrm{T}}(T_n) + +B(T_n)v_\eta(T_n)B^{\mathrm{T}}(T_n), \qquad (14)$$

в яких V, V_e – матриці других центральних моментів (коваріаційні матриці) помилок оцінювання й екстраполяції стану повітряного об'єкта, відповідно.

У алгоритмах (12)-(13) параметрами, які підлягають завданню й визначають якість функціонування системи, є $\sigma_м$, $\mathrm{T}_м$, v_f, причому, перші двоє залежать від маневрених властивостей цілі (визначають дисперсію шумів збудження $v_\eta(T_n)$), а останній – від величини відношення "сигнал / шум" та параметрів дискримінатора (визначає дисперсію шумів спостереження $v_f(t_n)$).

Цілком природно, що чим точніше зазначені параметри відповідають реальним характеристикам зовнішніх впливів, тем ближче точність автосупроводження до потенційно досяжної.

Аналіз впливу маневрених можливостей, відношення "сигнал / шум", та періоду вимірювання координат на потенційну точність автосупроводження. У разі, коли моделі руху цілі й спостережень адекватні реальним умовам, потенційна точність оцінювання й екстраполяції вектора стану визначається діагональними елементами коваріаційних матриць (13) та (14). Зокрема, дисперсія помилки супроводження σ_e^2 дорівнює елементу v_{e11} коваріаційної матриці помилок екстраполяції вектора стану V_e.

При незмінних зовнішніх впливах і фіксованому інтервалі спостережень система супроводження через час, який характеризує тривалість перехідного режиму, переходить в усталений режим, в якому рекурентні рівняння (13), (14) стають системою алгебраїчних рівнянь зі сталими коефіцієнтами. Розрахунок усталеної дисперсії помилки супроводження виконувався шляхом розв'язку системи рівнянь (13) та (14) до досягнення стаціонарного режиму. Результати розв'язку для періоду вимірювання координат цілі $T_n = 0{,}1\ c$ для систем АС за кутовими координатами, дальності й радіальної швидкості наведені на рис. 7-9, відповідно. Як випливає з аналізу графіків, дисперсія помилки супроводження цілі за дальністю й за кутовими координатами найбільшою мірою залежить від відношення "сигнал / шум" (дисперсії шумів спостережень). Помітно слабіше виявляється залежність від дисперсії прискорення цілі $\sigma_м^2$, і зовсім незначно - від постійної маневрування $T_м$. У порівнянні із системами супроводження цілі за дальністю й за кутовими координатами точність в системі супроводження за радіальною швидкістю залежить від дисперсії шумів спостережень (відношення "сигнал / шум") у меншому ступеню, але суттєво залежить від дисперсії прискорення цілі $\sigma_м^2$, і сталої маневрування $T_м$.

Залежності дисперсій помилок оцінювання й екстраполяції координат від інтервалу спостережень наведені на рис. 10-12 для систем супроводження за кутовими координатами, дальності і радіальної швидкості (суцільною лінією наведена дисперсія помилки екстраполяції координати, пунктирною – дисперсія помилок оцінювання). У системах супроводження за кутовими координатами (рис. 10) й за дальністю (рис. 11) динамічна складова помилки супроводження завжди залишається менше складової, обумовленої шумами спостереження (відношення "сигнал / шум").

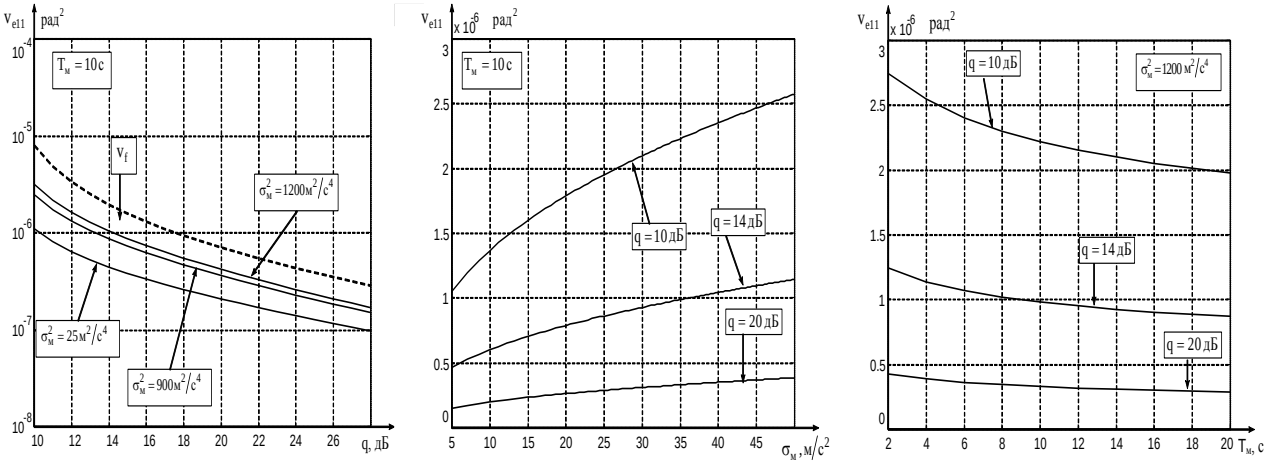


Рис. 7. Залежність дисперсії помилки екстраполяції v_{e11} від q, $\sigma_м$, $T_м$ в радіотехнічних слідкуючих системах (РТСС) за кутовими координатами, T = 0,1 с, **(Fig. 7.** The dependence of the variance of the extrapolation error)

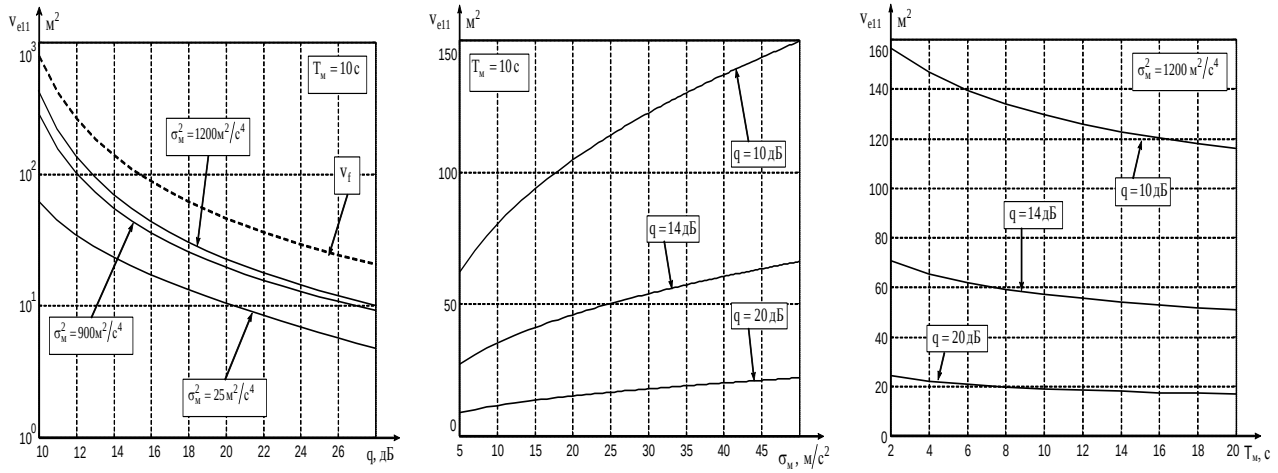


Рис. 8. Залежність дисперсії помилки екстраполяції v_{e11} від $q, \sigma_м, T_м$ в РТСС за дальністю, Т = 0,1 с

(**Fig. 8.** The dependence of the variance of the extrapolation error)

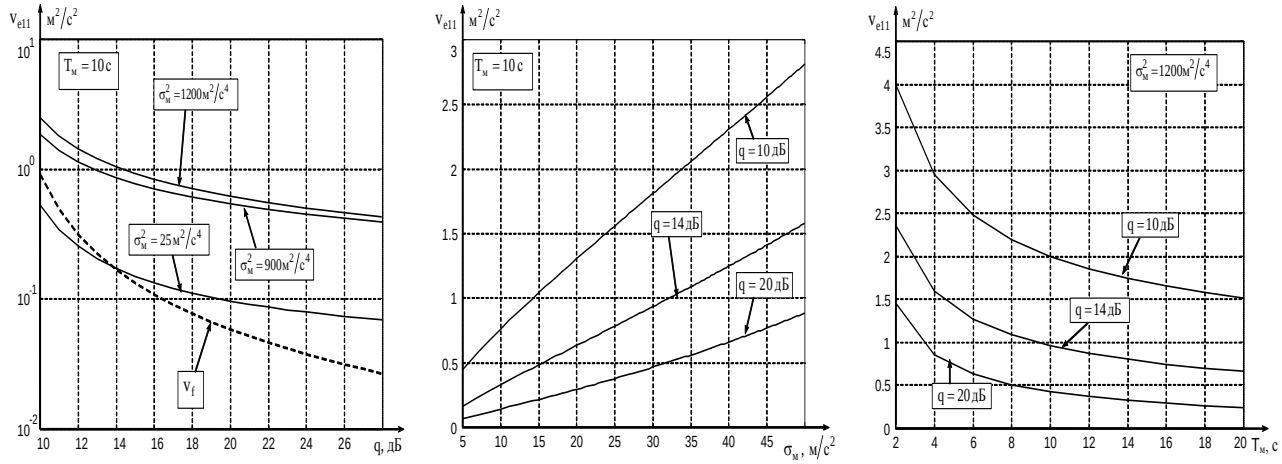


Рис. 9. Залежність дисперсії помилки екстраполяції v_{e11} від $q, \sigma_м, T_м$ в РТСС за радіальною швидкістю, Т = 0,1 с

(**Fig. 9.** The dependence of the variance of the extrapolation error)

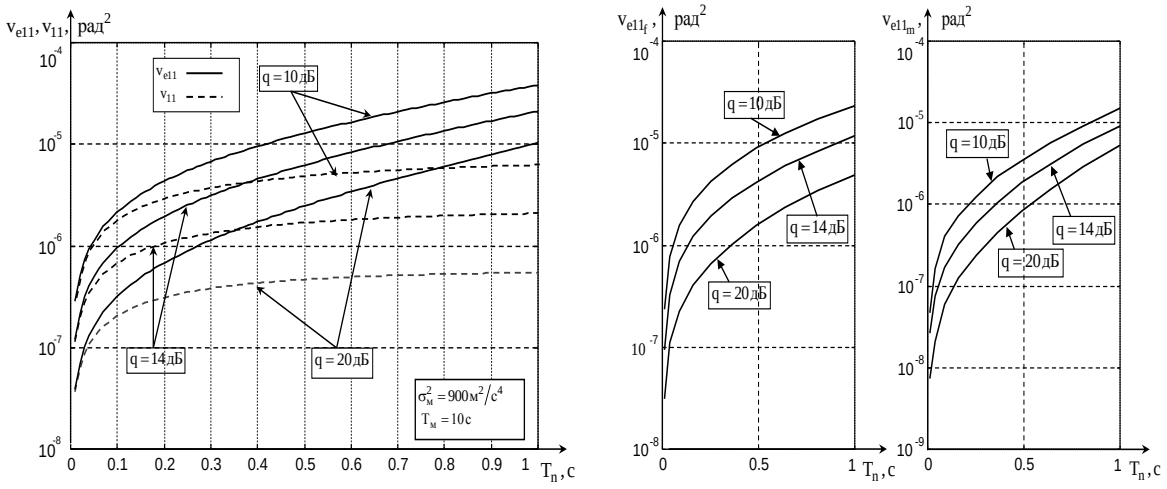


Рис. 10. Залежність дисперсій оцінювання v_{11} та екстраполяції v_{e11} кутової координати, а також її складової, обумовленої шумами спостережень v_{e11_f}, і динамічної складової v_{e11_m}, від періоду вимірювання координат T_n

(**Fig. 10.** Dependence of variances of estimation and extrapolation of angular coordinate, as well as its component)

З графіків (рис. 12) видно, що особливістю системи АС за радіальною швидкістю є те, що помилка екстраполяції (супроводження) слабо залежить від відношення “сигнал / шум”. Для з'ясування причин цього були розраховані динамічна складова σ_{ex}^2 дисперсії помилки й складова σ_{ef}^2 дисперсії помилки, обумовлена шумами спостережень.

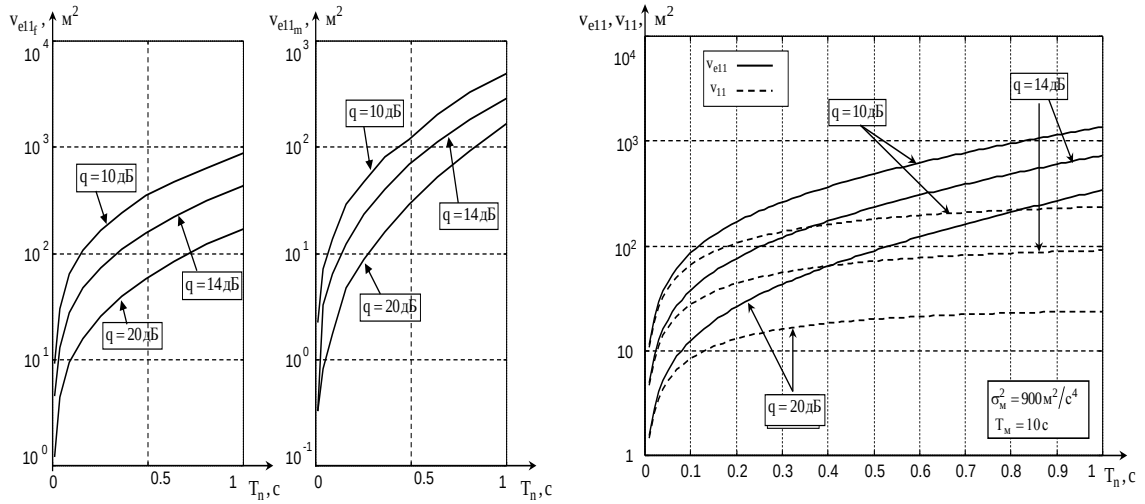


Рис. 11. Залежність дисперсій оцінювання v_{11} та екстраполяції v_{e11} дальності, а також її складової, обумовленої шумами спостережень v_{e11_f}, і динамічної складової v_{e11_m}, від періоду вимірювання координат $T_п$

(**Fig. 11**. Dependence of variances of estimation and extrapolation of range, as well as its component)

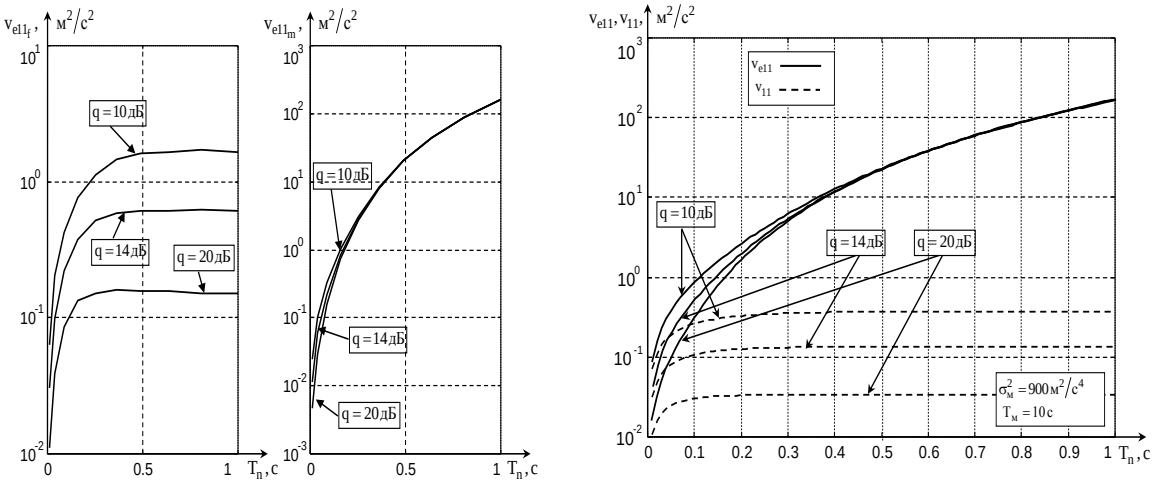


Рис. 12. Залежність дисперсій оцінювання v_{11} та екстраполяції v_{e11} радіальної швидкості, а також її складової, обумовленою шумами спостережень v_{e11_f} і динамічної складової v_{e11_m}, від періоду вимірювання координат $T_п$

(**Fig. 12.** Dependence of variances of estimation and extrapolation of radial velocity, as well as its component)

Аналіз поведінки цих складових свідчить про те, що вже починаючи від $T_n = 0{,}1c$ у системі АС за радіальною швидкістю основний внесок у помилку системи вносить динамічна складова.

Визначення еквівалентних розмірів апертури характеристик дискримінаторів. Розрахунки еквівалентних розмірів апертури характеристик дискримінаторів L_x виконані з урахуванням їхніх ДХ і флуктуаційних характеристик. При розрахунках структура й параметри алгоритмів оцінювання й екстраполяції координат повітряної цілі (10)-(14) були оптимальні за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки. При проведенні статистичного експерименту з оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження використовувалась стохастична модель руху цілі (6). За результатами дослідження знайдені залежності відносного еквівалентного розміру апертури L_x/L_0, де L_0 - ширина апертури між максимумами статичної ДХ (рис. 2), від відношення "сигнал / шум", які наведені на рис. 13 (суцільна лінія – часовий дискримінатор, пунктирна – частотний дискримінатор, штрих-пунктирна – кутовий дискримінатор).

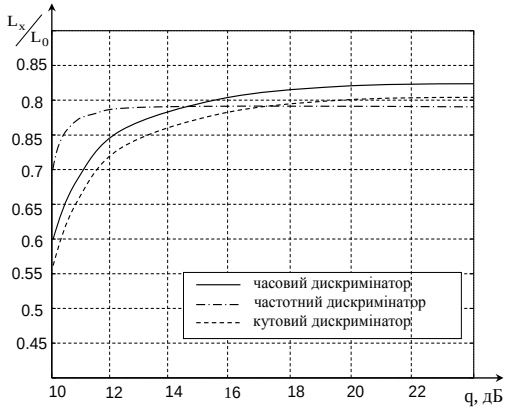


Рис. 13. Залежність відношення L_x/L_0 від відношення "сигнал / шум" (**Fig. 13.** Dependence of the ratio L_x/L_0 on the ratio "signal / noise")

З аналізу наведених залежностей випливає, що еквівалентний розмір апертури практично постійний, починаючи з певного відношення "сигнал / шум". Сталість параметра L_x підтверджує, що в зазначених умовах відхилення щільності розподілу ймовірностей помилок екстраполяції від нормального закону залишаються незначними, і тому результати оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження не мають потреби в додатковому коригуванні.

Ширина еквівалентних характеристик у всіх досліджених дискримінаторах виявилася менше ширини апертури статичних характеристик. Цей факт пояснюється різким збільшенням рівня шумової складової напруги на виході приймача при наближенні помилки спостереження до границь апертури.

При зменшенні відношення "сигнал / шум" еквівалентний розмір апертури зменшується, що свідчить, по перше, про появу істотних відхилень щільності розподілу ймовірностей помилок екстраполяції від нормального закону, а по друге, про різке збільшення ймовірності зриву супроводження.

Також встановлено, що еквівалентний розмір апертури L_x практично не залежить від періоду виміру координат і слабо залежить від вибору параметрів і структури алгоритмів оцінювання й екстраполяції. Зазначені властивості підкріплюють можливість широкого застосовування досить простої методики оцінки стійкості супроводження відповідно до виразів (1), (2).

Порівняльний аналіз стійкості АС радіотехнічними слідкуючими системами РЛС. Запропонована методика, що базується на застосуванні еквівалентного розміру апертури дискримінатора L_x [8], була використана для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження в РТСС за дальністю, радіальною швидкістю та за кутовими координатами. Структура алгоритмів оцінювання й екстраполяції координат повітряних цілей в розглянутих системах задавалася виразами (10)-(14). Параметри алгоритмів супроводження вибиралися виходячи з аналізу маневрених можливостей сучасних винищувачів, з урахуванням середньої тривалості маневру та максимальної інтенсивності. Розрахунки ймовірності відсутності зриву супроводження виконувалися для випадку, коли параметри систем супроводження, обумовлені рівняннями (10)-(14), повністю адекватні моделям руху цілі (6) і спостережень (8). У такому разі, при використанні стохастичної моделі руху цілі (6) і спостережень (8) дисперсії помилок σ_e^2 дорівнюють елементам v_{e11} матриць помилок екстраполяції вектору стану V_e.

Для перевірки вірогідності аналітичних результатів у ряді контрольних точок імовірність відсутності зриву супроводження визначалася шляхом проведення прямого статистичного експерименту. У ході прямого експерименту рух цілі задавався безпосередньо стохастичним рівнянням (6), та використовувалися моделі реальних дискримінаторів На рис. 14 наведені графіки залежностей імовірності P_1 відсутності зриву супроводження протягом одного інтервалу вимірювання координат від періодичності спостережень T_n, для параметрів моделі руху цілі $\sigma_м$ = 35 м/с^2, $T_м = 8\ c$ (рис. 14). Суцільною лінією представлені залежності для відношення "сигнал / шум" – 10 дБ, штрих-пунктирною – 14 дБ, і пунктирною – 20 дБ.

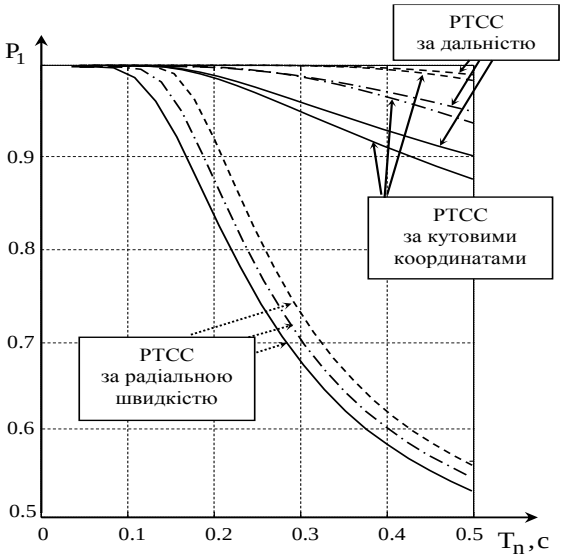


Рис. 14. Залежність імовірності P_1 відсутності зриву супроводження протягом одного інтервалу вимірювання координат від періодичності спостережень T_n
(**Fig. 14**. Dependence of probability of absence of failure of support during one interval of measurement of coordinates on periodicity of supervision)

Як видно з наведених результатів, у всіх системах при малих відношеннях "сигнал / шум" стійкість супроводження на одному інтервалі може бути досить високою тільки при $T_n < 0{,}1...0{,}15c$, але слідкуючі системи за дальністю й за кутовими координатами мають суттєво більш високу стійкість в порівнянні із системою супроводження за радіальною швидкістю. Таким чином, вона є найбільш чутливою до темпу вимірювання координат цілі та уразливою підсистемою АС в багатоканальній РЛС.

Найбільш повною характеристикою впливу стійкості супроводження на можливості РЛС є ймовірність відсутності зриву спостереження протягом інтервалу часу t_c, що дорівнює середній тривалості супроводження цілі:

$$P_x(t_c) = \prod_{n=1}^{n_c} P_{1x}(T_n), \qquad (15)$$

де $P_{1x}(T_n)$ – імовірність відсутності зриву спостереження за ціллю системою супроводження ($x = r, v_r, \varphi_1, \varphi_2$) протягом одного інтервалу вимірювання координат. Якщо $T_n = const$ і ймовірність відсутності зриву супроводження на всіх інтервалах однакова $P_{1x}(T_n) = P_{1x}$, розподіл (15) перетвориться до найпростішого вигляду:

$$P_x(T_c) = P_{1x}^{T_c/T_n}. \qquad (16)$$

Виходячи з (16) і отриманих результатів (рис. 14), проведено розрахунки ймовірності P_{x100} відсутності зриву за 100 секунд для відповідних систем супроводження, які наведені на рис. 15.

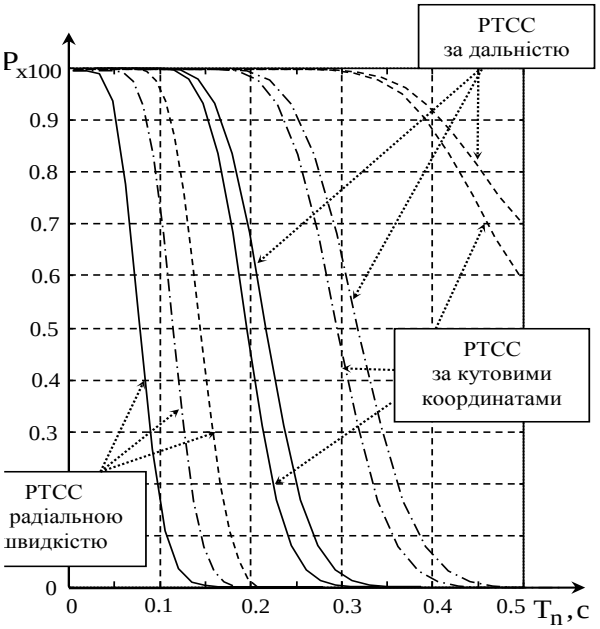


Рис. 15. Графіки залежностей імовірності P_{x100} відсутності зриву супроводження протягом 100 с вимірювання координат від періоду вимірювання T_n
(**Fig. 15**. Graphs of dependences of probability of absence of failure of support within 100 s of measurement of coordinates from the measurement period)

Суцільною лінією представлені залежності для відношення "сигнал / шум" – 10 дБ, штрих-пунктирною – 14 дБ, і пунктирною – 20 дБ.

З наведених графіків можна визначити, що при малих відношеннях "сигнал / шум" інтервал вимірювання координат цілей не повинен перевищувати 0,03 с.

Аналізуючи отримані графіки маємо "слабке місце", яким являється система автосупроводження за радіальною швидкістю [9].

Іншою важливою характеристикою стійкості є середній час до зриву супроводження. У випадку, коли ймовірність відсутності зриву супроводження на інтервалі $t_c = n_c T_n$ задовольняє умові (16), імовірність першого зриву спостереження $Q_x(t_c)$ точно після t_c секунд супроводження підкоряється геометричному закону розподілу

$$Q_x(T_c) = (1 - P_{1x}) P_x(T_c), \qquad (17)$$

для якого середній час до зриву супроводження визначається виразом

$$\overline{T}_{cx} = \frac{P_{1x}}{1 - P_{1x}} T_n. \qquad (18)$$

З аналізу залежності середнього часу до зриву супроводження за радіальною швидкістю, що наведена на рис. 16, випливає, що при малих відношеннях "сигнал / шум" прийнятним є мінімально можливий для багатоканальної РЛС період вимірювання координат, а середній час до зриву слідкування при зростанні періоду вимірювання може становити усього лише одиниці секунд, що є зовсім неприйнятним.

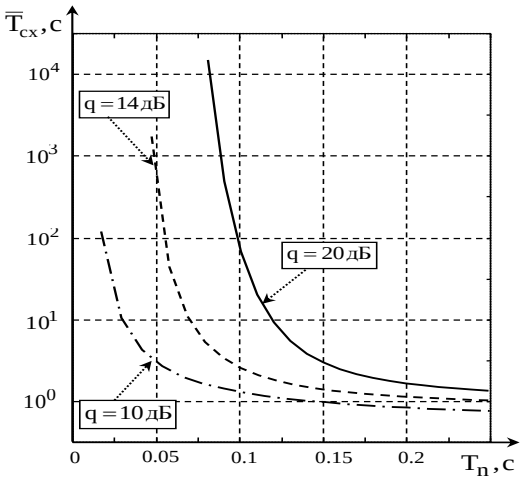


Рис. 16. Залежності середнього часу до зриву супроводження за радіальною швидкістю від періоду вимірювання T_n
(**Fig. 16**. Dependences of the mean time to failure of tracking at radial velocity on the measurement period)

Висновки

1. Розвиток маневрених можливостей сучасних літальних апаратів потребує оцінки можливостей радіотехнічних слідкуючих систем існуючих РЛС на предмет стійкості автосупроводження таких цілей.

2. Для оцінки стійкості автосупроводження можливо застосовувати методику, засновану на використанні еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора. Розрахунки величини еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора і його залежності від відношення "сигнал / шум" виконуються на підставі результатів статистичного експерименту з оцінки стійкості супроводження в РТСС з реальними дискримінаційною та флуктуаційними характеристиками дискримінатору.

3. В підсистемах автосупроводження за дальністю та кутовим координатам при малих відношеннях "сигнал / шум" стійкість супроводження може бути досить високою тільки при періоді вимірювання координат $T_n \le 0{,}1...0{,}15c$. При високому відношенні "сигнал / шум" відбувається стрімке покращення стійкості супроводження в даних системах та з'являється можливість щодо суттєвого збільшення періоду вимірювання координат та перерозподілу енергетичних ресурсів РЛС.

4. В системі супроводження за радіальною швидкістю при $T_n > 0{,}1c$ основною складовою помилки екстраполяції (супроводження) є динамічна складова.

Період вимірювання координат $T_n = 0{,}1\,c$ є завеликим для супроводження за радіальною швидкістю і може застосовуватись при супроводженні високоманеврених цілей лише при великих значеннях відношення "сигнал / шум". Зокрема, середній час до зриву супроводження в РТСС за радіальною швидкістю набагато нижче в порівнянні з системами супроводження за дальністю та кутовими координатами. При малих відношеннях "сигнал / шум" (T_n = 0,1 с)

середній час до зриву супроводження за радіальною швидкістю може скласти декілька секунд, що суттєво менше середнього часу знаходження цілі на супроводженні. При малому відношенні "сигнал / шум" доцільно зменшувати період вимірювання координат цілі до значень $T_n \approx 0{,}01\ldots0{,}03$ с.

5. Таким чином, система супроводження цілі за радіальною швидкістю має показники стійкості набагато гірші, ніж системи супроводження за дальністю й за кутовими координатами, тому, основні зусилля мають бути спрямовані на зменшення динамічної помилки супроводження за радіальною швидкістю шляхом вдосконалення алгоритмів супроводження, використання адаптивних алгоритмів та змінного періоду вимірювання координат, в тому числі для оптимізації енергетичних ресурсів РЛС.

Список літератури

1. Канащенков А., Корчагин В., Меркулов В., Самарин О. Сверхманевренность и бортовые радиолокационные системы *Радиотехника*. 2002. № 5. С. 43-50.
2. Обрезков Г.В., Разевиг В.Д. Методы анализа срыва слежения. М.: Сов. Радио, 1972. 240 с.
3. Хисматулин В.Ш., Ковальчук А.О., Сосунов О.О., Сачук И.И. Оценка устойчивости сопровождения целей с помощью эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора. *Системи обробки інформації*. Х.: ХВУ, 2004. Вип. 2. С. 125-132.
4. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. М.: Связь, 1976. 496 с.
5. Первачев С.В., Валуев А.А., Чиликин В.М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. М.: Сов. Радио, 1973. 488 с.
6. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью. *Зарубежная радиоэлектроника*. 1971. № 8. С. 40-57.
7. Кузьмин С. З. Цифровая радиолокация. Киев: КВІЦ, 2000. 430 с.
8. Хисматулин В.Ш.., Зубрицкий Г.М., Ставицкий О.М., Ковальчук А.О. Оценка устойчивости сопровождения по дальности и угловым координатам сверхманевренных летательных аппаратов многоканальной РЛС. *Системи обробки інформації*. Х.: ХУПС, 2009. Вип. 4(78). С. 130-133.
9. Kovalchuk A.O., Oleshchuk M. M., Karlov V. D., Karpenko O. V., Besova O. V., Lukashuk O. V. Analysis of sensitivity of target tracking systems to external interference in multichannel radars with fixed parameters. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, No. 1. С. 82-86. DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.11.

References

1. Kanashchenkov, A., Korchagin, V., Merkulov, V. and Samarin, O. (2002), "Super maneuverability and onboard radar systems", *Radiotekhnika*, No. 5, pp. 43-50.
2. Obrezkov, G.V. and Razevig, W.D. (1972), *Methods of tracking failure analysis*, Sov. Radio, Moscow, 240 p.
3. Khismatulin, V.Sh., Kovalchuk, A.O., Sosunov, O.O. and Sachuk, I.I. (2004), "Estimation of stability of support of the purposes by means of the equivalent size of an aperture of the characteristic of the discriminator", *Information processing systems*, No. 2. HVU, Kharkiv, pp. 125-132.
4. Sage, E. and Mels, J. (1976), *Evaluation theory and its application in communication and control*, Comm., Moscow, 496 p.
5. Pervachev, S.V., Valuev, A.A. and Chilikin V.M. (1973), *Statistical dynamics of radio engineering tracking systems*, Sov. Radio, Moscow, 488 p.
6. Singer, R.A. (1971), "Estimation of the characteristics of the optimal filter for tracking a manned target", *Foreign Radio Electronics*, No. 8, pp. 40-57.
7. Kuzmin, S.Z. (2000), *Digital Radar*, KVIC, Kyiv, 430 p.
8. Khismatulin, V.Sh., Zubritsky G.M., Stavitsky O.M. and Kovalchuk, A.O. (2009), "Estimation of stability of tracking by range and angular coordinates of super maneuverable aircraft of multichannel radar", *Information processing systems*, No. 4 (78), HVU, Kharkiv, pp. 130-133.
9. Kovalchuk, A.O., Oleshchuk, M. M., Karlov, V. D., Karpenko, O. V., Besova, O. V., and Lukashuk, O. V. (2021), "Analysis of sensitivity of target tracking systems to external interference in multichannel radars with fixed parameters", Advanced information systems, Vol. 5, No. 1, pp. 82-86, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.11.

Received (Надійшла) 27.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.09.2021

Відомості про авторів / About the authors

Струцінський Олег Васильович – кандидат технічних наук, командир військової частини А 0215Г, Вінниця, Україна;
Oleh Strutsinsky – Candidate of Technical Sciences Deputy Head of the military unit A 0215Г, Vinnitsa, Ukraine;
e-mail: Inna700nf@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6175-7678.

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.

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: Inna700nf@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1269-9368.

Бархударян Микола Віталійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Mykola Barkhudaryan – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Associate Professor of Department; Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Barkhudaryan_M@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-8547-6504.

Ковальчук Віктор Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна;
Viktor Kovalchuk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Department; Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Kovalchuk_Viktor@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1370-355X.

Анализ устойчивости автосопровождения высокоманевренных воздушных объектов радиотехническими следящими системами многоканальной РЛС

О. В. Струцинский, В. Д. Карлов, А. А. Ковальчук, Н. В. Бархударян, В .А. Ковальчук

Аннотация. Многоканальные радиолокационные станции (РЛС) сопровождения целей с фазированными антенными решетками (ФАР) широко применяются для сопровождения воздушных объектов. Использование ФАР в комбинации с цифровой вычислительной техникой позволяет управлять диаграммой направленности (ДС) РЛС и сопровождать несколько целей в режиме распределения времени. Использование ФАР в комбинации с цифровой вычислительной техникой позволяет управлять диаграммой направленности (ДС) РЛС и сопровождать несколько целей в режиме распределения времени Сопровождение воздушной цели в многоканальной РЛС обеспечивается подсистемами измерения дальности, радиальной скорости и угловых координат, в большинстве случаев, без адаптации к характеристикам внешних воздействий. При сопровождении высокоманевренных воздушных целей, к которым относятся, в первую очередь, истребители 5-го и так называемого 4^{++}-го поколений, происходит существенное снижение точности и устойчивости сопровождения относительно участка отсутствия маневрирования. В случае настройки алгоритмов следящих систем на низкую интенсивность маневрирования или его отсутствие значительное возрастание ошибки сопровождения летательного аппарата на участке маневрирования приведет к срыву автосопровождения за счет значительной динамической составляющей ошибки. В данной публикации проведен анализ точности автосопровождения маневрирующих целей подсистемами дальности, радиальной скорости и угловых координат с фиксированными параметрами в случае, когда настройки параметров алгоритмов следящих систем совпадают с характеристиками внешних воздействий. Исследовано влияние параметров модели наблюдений, стохастической модели движения цели с экспоненциально коррелированными значениями ускорения цели, а также периода измерения координат на потенциальную точность сопровождения радиотехническими следящими системами многоканальной РЛС. Для оценки устойчивости автосопровождения предложено использование эквивалентного размера апертуры дискриминационной характеристики. Проведена оценка влияния параметров стохастической модели движения цели, модели наблюдений и периода измерений координат на устойчивость автосопровождения по дальности, радиальной скорости и угловым координатам. Показано, что «слабым звеном» является система сопровождения по радиальной скорости. В результате проведенных исследований появляется возможность дальнейшей оценки целесообразности адаптации систем автосопровождения к маневренным характеристикам целей и выработка рекомендаций по выбору периода измерения координат цели.

Ключевые слова: система автоматического сопровождения; дисперсия ошибки экстраполяции; дальность; радиальная скорость; угловые координаты; следящее измерение.

Analysis of the stability of automatic tracking of super maneuvering air objects by radio technical tracking systems of the multichannel radar

Oleh Strutsinsky, Volodymyr Karlov, Andrii Kovalchuk, Mykola Barkhudarian, Viktor Kovalchuk

Abstract. Multichannel tracking radars with phased antenna arrays are widely used to track air targets. The use of a phased array in combination with digital computing technology allows to control the radar radiation pattern and track several targets in the time distribution mode. Air target tracking in a multichannel radar is provided by subsystems for measuring range, radial velocity and angular coordinates, in most cases, without adaptation to the external influence characteristics. When tracking supermaneuverable air targets, such as 5th and so-called 4^{++} generation fighters, there is a decrease in the accuracy and stability of tracking relative to the area without maneuver. If the tracking system algorithms are tuned to a low intensity of maneuvering or its absence, a significant increase in the error of tracking the aircraft in the maneuvering section will lead to disruption of auto tracking due to a significant dynamic component of the error. The stability of auto-tracking of maneuvering targets by subsystems of range, radial velocity, and angular coordinates with fixed parameters for the case when the setting of the parameters of the tracking system algorithms coincide with the characteristics of the external influence is analyzes in the paper. The influence of the observation model parameters, the stochastic model of the target movement with exponentially correlated values of the target acceleration, and the measurement period of the target coordinates on the potential tracking accuracy by radio technical tracking systems of the multichannel radar is investigated. To assess the stability of auto-tracking, it is proposed to use the equivalent aperture size of the discriminating characteristic. The influence of the parameters of the target movement stochastic model, the observation model, and the measurement period of the target coordinates on the stability of auto-tracking in terms of range, radial velocity, and angular coordinates is estimated. It is shown that the "weak link" is the radial velocity tracking system. As a result of the research carried out, it becomes possible to further assess the feasibility of adapting the auto-tracking systems to the target maneuvering characteristics and to develop recommendations for choosing the measurement period of the target coordinates.

Keywords: automatic tracking system; extrapolation error dispersion; range, radial velocity; angular coordinates; tracking measurement.

Intelligent information systems

UDC 004.032.26:004.85+528.854 DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.13

Andrii Podorozhniak[1], Nataliia Liubchenko[1], Mykyta Kvochka[1], Ivan Suarez[2]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Universidad Autonoma Metropolitana (Azcapotzalco), Mexico City, Mexico

USAGE OF INTELLIGENT METHODS FOR MULTISPECTRAL DATA PROCESSING IN THE FIELD OF ENVIRONMENTAL MONITORING

Abstract. **The subject** of study in the article is artificial intelligence methods that can be used for recognition of specific areas of the earth's surface in multispectral images provided by Earth remote sensing systems (ERS). **The goal** is to automate data analysis for recognizing areas affected by fire on multispectral remote sensing images. **The task** is to study and formulate a method for processing multispectral data, which makes it possible to automate the process of operational recognition of areas of burned-out areas in images, for the development of an eco-monitoring software system using artificial intelligence tools such as deep learning and neural networks. As a result of the analysis of modern methods of processing multispectral data, an investigation of the supervised learning strategy was chosen. The choice of the described method for solving an applied problem is based on the high flexibility of these method, as well as, provided that there is a sufficient amount of used training input data and correct training strategies, the possibility of analyzing heterogeneous multispectral data with ensuring high accuracy of results for each individual sample. **Conclusions**: the application of methodologies for intelligent processing of multispectral images has been investigated and substantiated. The theoretical foundations of the construction of neural networks are considered, the applied area of application is selected. An architectural model of a software product is analyzed and proposed, taking into account its scalability, the model of software system is developed and the results of its work are shown. The obtained results show the efficiency of proposed system and prospects of the proposed algorithms, which is a reason for further research and improvement of the used algorithms, with their possible use in industrial and enterprise eco-monitoring systems.

Keywords: eco-monitoring system; Earth remote sensing; multispectral image; image processing; neural network.

Introduction

Nowadays, computer systems have become so widespread that it is even difficult to name an industry that would not be affected by the process of total computerization. Every day, millions of hardware and software solutions allow humanity to solve a large number of applications precisely due to the rapid development of the information technology industry. One of such areas is undoubtedly the field of environmental monitoring. Every year the violation of state environmental standards leads to multimillion losses of the budget of our country, so government agencies and enterprises in the field of eco-monitoring aim to control, detect and prevent environmental violations. However, in order to increase the level of efficiency and manufacturability of this process it is required to use an appropriate software solutions that would facilitate the implementation of this task [1].

One of the sub-tasks in the field of environmental monitoring is the detection and control of burnt areas due to fires caused by burning grass, deadwood, etc [1, 2]. This applied task requires prompt detection of foci of environmental violations, as well as accurate identification of the affected areas in order to understand the strategy of counteraction and neutralization of the results of arson. One way to solve this problem is to use multispectral data from remote sensing systems [3]. This method allows you to cover a large amount of territory, and also allows you to achieve more effective results of the analysis due to the specifics of the burned areas detection. However, it is not possible to productively perform analysis of multispectral images by visual method, in addition, the amount of remote sensing data reach significant volumes. For these reasons, there is a need to develop an automated algorithm for analyzing such data [4].

To solve this problem, the use of modern computerized methods of multispectral images analysis in combination with machine learning tools, such as neural networks, may be proposed [5].

Problem analysis and task statement

By definition, multispectral images are images that cover visual data in certain wavelength ranges in the electromagnetic spectrum. Wavelengths can be separated by filters or detected by devices sensitive to specific wavelengths, including light from frequencies outside the visible light range, ie infrared and ultraviolet. A multispectral image typically contains two aspects of data: spatial data that transmits location information, and spectral data that transmits the reflection level of different bands. In particular, each multispectral pixel is an h-dimensional vector, where h is the number of spectral bands, the pixel is usually considered as an input sample for multispectral classification programs. Fig. 1 shows a data model of a multispectral image [6].

The effect of fire on vegetation is not binary (not only divided by "burned"/"unburned"), but rather depends on a number of conditions, such as the type of fire, its nature and the time between extinguishing the fire and obtaining an image of the burned territory. An important factor is that the reflectance of the surface, its temperature and backscattering should be taken into account, as they can be very different for the periods

© Podorozhniak A., Liubchenko N., Kvochka M., Suarez I., 2021

before and after the fire. Mapping of burnt plots of land has traditionally been done from field sketches. However, with the launch of the Earth's first artificial satellites, remote sensing has quickly become a more practical alternative for detecting burned areas, as it provides timely regional and global coverage of fires that occur in a number of areas [2, 7].

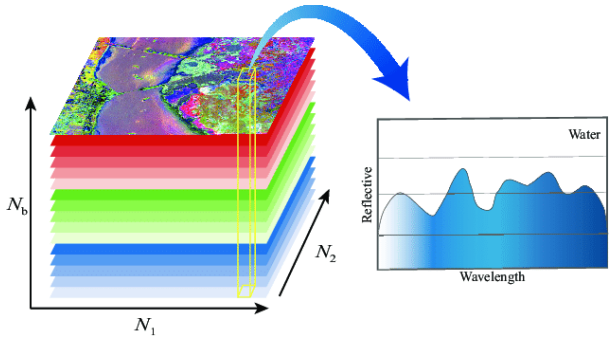


Fig. 1. Data model of a multispectral image

After all, the actual multispectral images are only input data to solve the problem of environmental monitoring and require automated analysis. Based on this, there is a question of investigating the possibility to develop an intelligent system that could process the input data of multispectral imaging and provide output data, which could allow recognizing of certain areas affected by fires with the defined probability. Since the applied problem of ecomonitoring, and the determination of burned areas in particular, are based on large data sets that require processing and automatic classification, such a problem can theoretically be solved using machine learning technologies [8].

Thus, the task of the article is to study and formulate a model of intellectual analysis of multispectral data, which will automate the recognition of burned areas for the field of environmental monitoring using artificial intelligence methods [9].

Main part

Nowadays, machine learning technologies have made a rapid leap forward in their development and spread. They have an extremely wide range of areas of practical application due to their versatility, including the field of multispectral data analysis [10].

One of the proposed methods for solving the applied problem of burned areas identification is the data mining approach for mapping. According to the study of this methodology, the NN and SVM approaches showed worse results than C5.0 or RF, due to the imbalance of the database, which led to the production of structures and models that had a low ability to generalize. Tree-based algorithms have shown better efficiency, given the ability to work with large and unbalanced databases, as well as their ability to provide accurate probabilities.

Another approach is to use the BA-Net model to identify burned areas. Traditionally, the procedure of displaying burned areas with the usage of satellite images consists of carefully crafted algorithms. Figure 2 shows an image of a burned obtained from Sentinel-2 satellites [11]. The image on the left is similar to a normal photo showing RGB colors. The image on the right contains a NIR spectrum instead of a green channel. The dark area on the right image identifies the burned area. The basic approach to displaying recorded pixels can be as simple as defining a threshold value to indicate how dark the pixels must be to display them as burned.

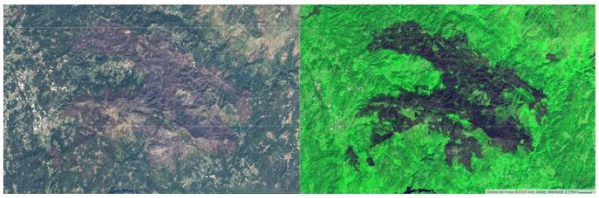


Fig. 2. Image of a burned area from the Sentinel-2 satellite

For mapping burned areas, existing products based on traditional methods can provide fairly good accuracy. However, these products are usually more accurate spatially than timely - the assignment of the burning day is often spatially inappropriate, especially if the images are contaminated with clouds, which complicate the task for any algorithm. For the BA-Net method, the following is proposed: instead of trying to write a complex algorithm to determine which pixels correspond to the burned area, the approach defines a model with several million learning parameters with architecture capable of studying spatial and time structures in image sequences. The model then looks at the images and targets and tries to make the output as close as possible to the target. This model is a set of differentiated operations, including the process of convolution in space and time, layers of reduction and scaling and the level of LSTM (class of recurrent neural networks) to capture longer time relationships in the data [12].

In mathematics, convolution is a mathematical operation on two functions (f and g) that produces a third function that expresses how the shape of one is modified by the other [13, 14]:

$$(f \times g)(t) = \int f(t-r)\, g(r)\, dr. \qquad (1)$$

LSTM, like most RNNs, is universal in the sense that with a sufficient number of network nodes, it can compute anything that a conventional computer can compute, provided it has a proper weight matrix. Traditional LSTM can be expressed by the following set of formulas:

$$\begin{aligned} f_t &= \sigma_g\left(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f\right); \\ i_t &= \sigma_g\left(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i\right); \\ o_t &= \sigma_g\left(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o\right); \\ c_t &= f_t \circ c_{t-1} + i_t \circ \sigma_c\left(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c\right); \\ h_t &= o_t \circ \sigma_h\left(c_t\right), \end{aligned} \qquad (2)$$

where x_t – input vector; h_t – hidden state vector also known as output vector; c_t – cell state vector; W, U, b – weight matrices and bias vector parameters which need to be

learned during training; f_t – forget gate's activation vector; i_t, – input/update gate's activation vector; o_t – output gate's activation vector; σ_g – sigmoid function; σ_c – hyperbolic tangent function; σ_h – hyperbolic tangent function, or, as the peephole LSTM paper suggests $\sigma_h(x) = x$.

Fig. 3 shows the structure of the described model:

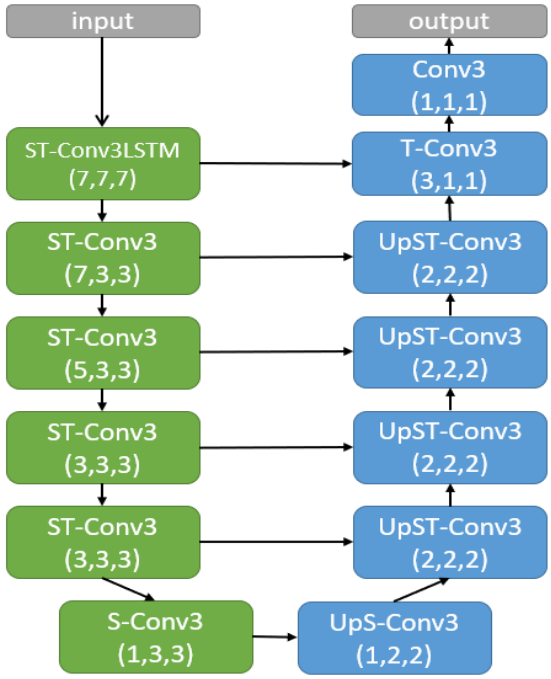


Fig. 3. The structure of the BA-Net model [15]

Consider the learning process of this model of artificial intelligence. The BA-Net input is provided with a set of 64 consecutive images for 128x128 pixels. A sequence of the same size is then generated, indicating the probability that each individual pixel corresponds to a burned area. This model uses binary cross entropy. The model parameters are then updated slightly based on gradients to move in a direction that reduces losses (i.e. increases the similarity between the output and the target). This process is repeated using a diverse set of input samples that allow models to study the spectral sign of fire in space-time data.

The diagram representing the learning process of the model is shown in Fig. 4 [11].

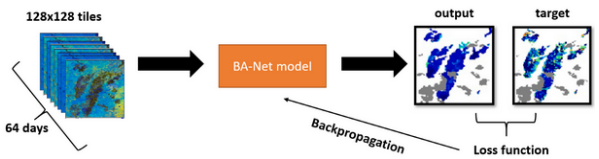


Fig. 4. Semantic diagram of BA-Net model learning

Finally, a teacher-based learning approach based on the BA-Net method was formulated and investigated. The first step to creating a classifier in the proposed model is to teach it using a training set for which the data are marked with labels (in this case it is a classification) or directly related to the value (in this case it is a regression) [16]. The algorithm tries to build a model that connects functions for a label or value. This training kit provides a model that can be used to predict new data for which there are function values but no label or ready-made output [17].

Fig. 5 shows a generalized diagram of how the proposed controlled learning process of the ML model works.

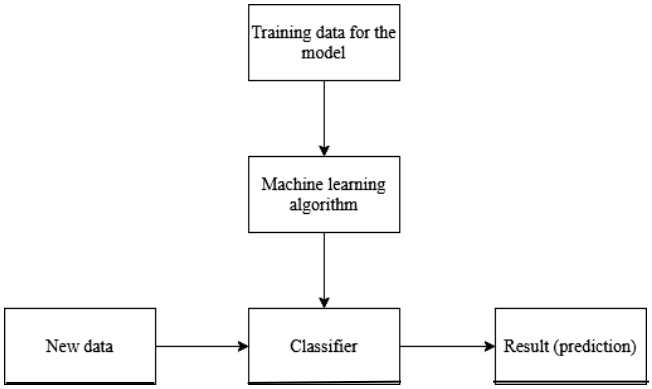


Fig. 5. Scheme of ML model teaching

The data of the consequences of the fire that occurred on August 3-9, 2018 in the Algarve, in the south of Portugal, were used as training datasets. This is a relatively easy case to analyze, as there are almost no clouds in the input images. This dataset was chosen because of the high quality of inputs and sufficient volume for full training on a given strategy. As a training sample, a set of training images with a size of 32 × 32 pixels was formed using 5 (Near Infrared) and 7 (SWIR 2) spectra of Landsat 8, for which their content is known. The total sample size is at least 8000 images, of which 1500 images contain fragments of burned areas [18].

Acer PC based on Intel Core i5 CPU with a clock speed of 2.7 GHz, Nvidia GTX 950M graphics processor and 16 GB of RAM was used to train the ML model. After the process of learning the model of artificial intelligence, the general architectural design of the developed software application was carried out. A generalized diagram of the application architecture is shown in Fig. 6.

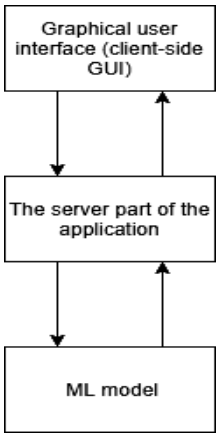


Fig. 6. Simplified diagram
of the functional components of the software product

During the development of a system based on this architecture, both the client and server part will be located on the same workstation for ease of building a working prototype. However, this architecture also has the

potential to expand: for example, the system can be further modified to perform the server part and the ML model data analysis on a separate powerful workstation (local server), and users (clients) will be able to join it, for example, via TCP/IP socket [19].

The general algorithm of the typical scenario of the developed ecomonitoring system usage is shown on the sequence diagram from Fig. 7.

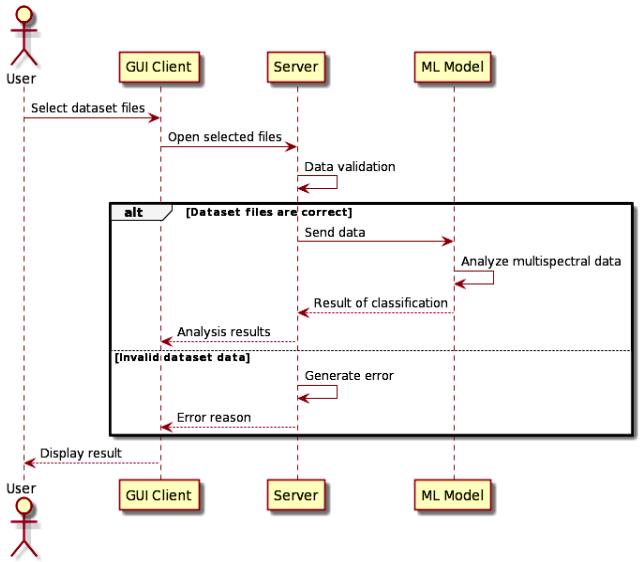


Fig. 7. Ecomonitoring system use case scenario

As can be seen from the diagram, the main action of the user is to provide a dataset, which will be further analyzed. The graphical interface is responsible for the primary reception of user input data (path to the dataset directory in the file system) and to output the result of data processing or notify error message. Server side of the application is responsible for the validation of the data provided by the user, transfering this data to the ML model and an error generation in case of invalid data. The task of the ML model is to actually analyze the provided dataset for the presence of burned areas on the provided multispectral images, as well as to send the processing results to the server part of the application.

The Python programming language and the Tkinter graphics library were chosen to implement a software product that demonstrates the proposed intelligent processing method. Of the libraries that were used to process multispectral data to build the ML model, it is worth noting the libraries Tensorflow, numpy, matplotlib, rasterio, geopandas and earthpy [20].

As a result of the development of the ecomonitoring system, a window application with a graphical interface, shown in Fig. 8, was created.

The result of data processing is presented in the form of a map indicating the probability of fire by each part of the territory, which was accessible from the input multispectral data. The value of the probability of fire damage is reflected by color: from green ("no fire damage") to dark red ("serious fire damage"). This method of data visualization is intuitive, although it is possible to make suggestions for adding a map legend for better clarity of interpretation.

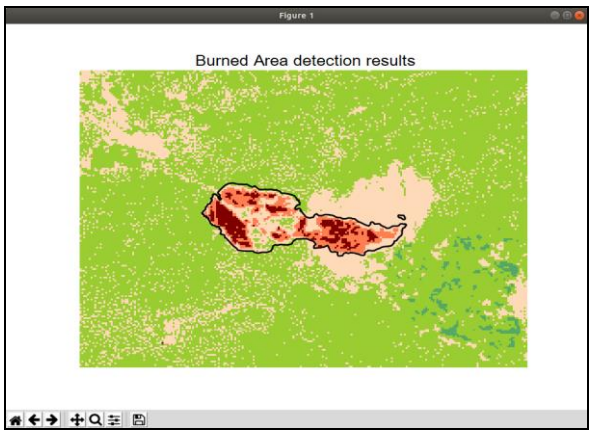


Fig. 8. Results of data analysis by ecomonitoring system

An analysis of the detection accuracy as a result of 50 epochs of learning was performed. A graph of the dependence of the detection accuracy (vertical axis) on the number of epochs of learning (horizontal axis) is shown in Fig. 9.

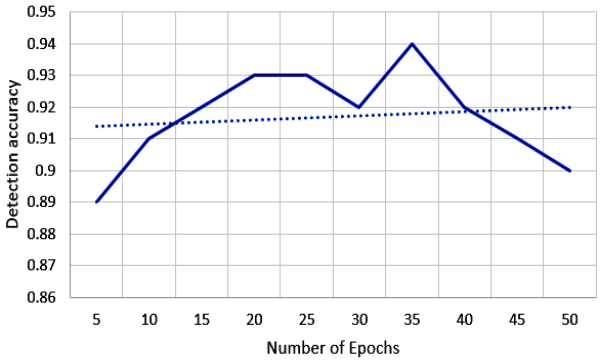


Fig. 9. Dependence graph of the detection accuracy of the test sample on the number of learning epochs

The spatial performance (detection accuracy) of the model is measured using Dice coefficient which is as a statistic used to gauge the similarity of two samples (also known as F_1 score) [15]:

$$Dice = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}, \quad (3)$$

where TP, FP and FN are the number of true positives, the number of false positives and the number of false negatives, respectively.

The verification was carried out according to the following strategy: after every 5 epochs of training, 100 tiles with a known presence or absence of burned territory were randomly selected from the multispectral data set. Next, the tiles were presented as input data for the ML model, and the result of its analysis was compared with the predefined data. The overall detection accuracy was 0.917.

As a result of testing the developed system, it was determined that the accuracy of burned areas detection is sufficient enough to consider the proposed intelligent ecomonitoring system for practical use to solve the problem of automated Burned areas detection and improve the results of multispectral image analysis compared to analogue systems.

Conclusions

The article investigates and substantiates the application of intellectual methodologies for multispectral images processing.

The theoretical bases of construction of models of artificial intelligence in the field of analysis of multispectral data are considered.

The applied field of application in the field of ecological monitoring is chosen.

The architectural model of the software product is analyzed and offered taking into account its scalability, the software implementation is developed and the results of its work are shown.

The obtained results show the efficiency and prospects of the proposed algorithms, which is the reason for further research and improvement of the applied algorithms, with their possible implementation in industrial and enterprise eco-monitoring systems.

REFERENCES

1. Kvochka M. and Podorozhniak A. (2020), “Intelligent ecomonitoring solutions” [Vykorystannia zasobiv hlybynnoho navchannia u haluzi ekomonitorynhu], *Informatization problems, 7th International Conference on*: November 13-15, 2020, Cherkasy-Kharkiv-Baku-Balsko-Biala: Vol. 2., p. 51, available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/42754/1/Conference_NTU_KhPI_2019_Problemy_informatyzatsii_Ch_2.pdf.
2. Kvochka M. and Podorozhniak A. (2020), “Intelligent ecomonitoring solutions” [Intelektualni rishennia u haluzi ekomonitorynhu], *Modern development directions of information and communication technologies and controls, 10th International Conference on*: April 9-10, 2020, Baku-Kharkiv-Žilina: Vol. 1., p. 97, available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/53485/1/Podorozhniak_Intelektualni_2020.pdf.
3. Ramachandran B., Justice C.O. and Abrams M.J. (2011), *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, Springer, 873 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7.
4. Chang-I C. (2013), *Hyperspectral Data Processing: Algorithm Design and Analysis*, John Wiley&Sons, 1st edition, 1164 p. DOI: https://doi.org/10.1002/9781118269787
5. Nahar, K. (2012), "Artificial neural network", *COMPUSOFT, An international journal of advanced computer technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 25-27, available at: https://ijact.in/index.php/ijact/article/view/421/.
6. Dong H., Li T., Leng J., Kong L. and Bai G. (2017), “GCN: GPU-based Cube CNN Framework for Hyperspectral Image Classification”, *IEEE 46th International Conference on Parallel Processing* (ICPP), DOI: https://doi.org/10.1109/ICPP.2017.13
7. Podorozhniak A., Kvochka M. (2021), “Multispectral images processing using systems on chips”, *Modern development directions of information and communication technologies and controls, 11th International Conference on*: April 8-9, 2021, Baku-Kharkiv-Kyiv-Žilina: Vol. 2., p. 31, available at: http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/52974/1/Podorozhniak_Multispectral_images_2021.pdf.
8. Vargas R., Mosavi A. and Ruiz R. (2018), "Deep learning: a review", *Advances in Intelligent Systems and Computing*, DOI: https://doi.org/10.20944/preprints201810.0218.v1.
9. Liubchenko N., Podorozhniak A. and Bondarchuk V. (2017), "Neural network method of intellectual processing of multispectral images", *Advanced information System*, Vol. 1, No. 2, pp. 39-44, DOI: https://doi.org/10.20998/2522-9052.2017.2.07.
10. Podorozhniak A., Lubchenko N., Balenko O. and Zhuikov D. (2018), "Neural network approach for multispectral image processing". *Advanced Trends in Radioelecrtronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET-2018), 14th International Conference on*: IEEE, pp. 978-981, available at: http://dx.doi.org/10.1109/TCSET.2018.8336357.
11. Pinto M.M. (2021), “*Mapping burned areas from space with Artificial Intelligence*”, available at: https://medium.com/@mnpinto/mapping-burned-areas-from-space-with-artificial-intelligence-3657bdb97a9d.
12. Patterson J. and Gibson A. (2017), *Deep Learning: A Practitioner's Approach*, *O'Reilly Media*, 538 p. ISBN: 9781491914250.
13. Hui J. (2017), "Understanding Matrix capsules with EM Routing (Based on Hinton's Capsule Networks)", available at: https://jhui.github.io/2017/11/14/Matrix-Capsules-with-EM-routing-Capsule-Network/.
14. Hlavcheva D. and Yaloveha V. (2018), "Capsule neural networks", *Control, Navigation and Communication Systems*, Vol. 5, No. 51, pp. 132-135, DOI: https://doi.org/10.26906/SUNZ.2018.5.132.
15. Pinto M. M., Libonati R., Trigo R. M., Trigo I. F. & DaCamara C. C. (2020), "A deep learning approach for mapping and dating burned areas using temporal sequences of satellite images", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 160, 260–274, DOI: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.12.014.
16. Bengio, Y. (2009), "Learning deep architectures for AI", *Foundations and trends in Machine Learning*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-127, DOI: https://doi.org/10.1561/2200000006.
17. Johnston B. and Mathur I. (2019), *Applied Supervised Learning with Python*, *Packt Publishing*, 2019, 404 p. ISBN: 9781789954920.
18. Pinto M. M. (2020), *BA-Net: A deep learning approach for mapping and dating burned areas using temporal sequences of satellite images*, available at: https://github.com/mnpinto/banet#train-the-model-from-scratch.
19. Mosavi A. and Varkonyi-Koczy A. R. (2017), "Integration of machine learning and optimization for robot learning", *Recent Global Research and Education: Technological Challenges*: Springer, pp. 349-355, DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-46490-9_47.
20. McKinney W. (2017), *Python for Data Analysis*, 2nd Edition, O'Reilly Media, 544 p. ISBN: 9781491957660.

Надійшла (received) 15.07.2021
Прийнята до друку (accepted for publication) 08.09.2021

Подорожняк Андрій Олексійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Andrii Podorozhniak – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: andriipodorozhniak@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-6688-8407.

Любченко Наталія Юріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та інтелектуальної власності, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Nataliia Liubchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Computer science and intellectual property Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: n_lubchenko@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-4575-4741.

Квочка Микита Миколайович – студент-магістрант кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Mykyta Kvochka – student of Computer Science and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Mykyta.Kvochka@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0274-4065.

Суарес Іван – магістрант кафедри Систем, Автономний Столичний Університет (Аскапоцалько), Мехіко, Мексика;
Ivan Suarez – masters in computer science, Coordination of graduate studies, Department of Systems, Universidad Autonoma Metropolitana (Azcapotzalco), Mexico City, Mexico;
e-mail: al2181800100@azc.uam.mx; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-4204-2183.

Застосування інтелектуальних методів мультиспектральної обробки даних у галузі екомоніторингу

А. О. Подорожняк, Н. Ю. Любченко, М. М. Квочка, І. Суарес

Анотація. Предметом вивчення в статті є методи штучного інтелекту, що можуть бути застосовані для розпізнавання конкретних ділянок земної поверхні на мультиспектральних зображеннях, наданих системами дистанційного зондування Землі. **Мета** – автоматизація аналізу даних для розпізнавання територій, уражених вогнем на мультиспектральних зображеннях ДЗЗ. **Задача** – дослідження і формулювання способу обробки мультиспектральних даних, що дозволяє автоматизувати процес оперативного розпізнавання на зображеннях ділянок вигорілих територій задля розробки програмної системи екомоніторингу із використанням таких засобів штучного інтелекту, як глибинне навчання та нейронні мережі. У результаті аналізу сучасних методів обробки мультиспектральних даних було обрано для дослідження застосування нейронних мереж зі стратегією навчання з учителем. Вибір описаних методів для вирішення прикладної задачі базується на високій гнучкості даних методів, а також, за умови достатнього обсягу використаних навчальних вхідних даних та коректних стратегій навчання, можливості аналізу різнорідних мульспектральних даних із забезпеченням високої точності результатів для кожної окремої вибірки. **Висновки:** досліджено та обґрунтовано застосування методологій інтелектуальної обробки мультиспектральних зображень. Розглянуто теоретичні основи побудови нейронних мереж, обрано прикладну галузь застосування. Проаналізовано та запропоновано архітектурну модель програмного продукту із урахуванням його масштабованості, проведено розробку програмної реалізації та показано результати її роботи. Отримані результати показують працездатність та перспективність запропонованих алгоритмів, що є приводом для подальшого дослідження і вдосконалення застосованих алгоритмів, із їх можливим впровадженням до промислових та корпоративних систем екомоніторингу.

Ключові слова: система екомоніторингу; дистанційне зондування Землі; мультиспектральне зображення; обробка зображень; нейромережа.

Применение интеллектуальных методов мультиспектральной обработки данных в сфере экомониторинга

А. А. Подорожняк, Н. Ю. Любченко, Н. Н. Квочка, И. Суарес

Аннотация. Предметом изучения в статье являются методы искусственного интеллекта, которые могут быть применены для распознавания конкретных участков земной поверхности на мультиспектральных изображениях, предоставленных системами дистанционного зондирования Земли. **Цель** - автоматизация анализа данных для распознавания территорий, пораженных огнем на мультиспектральных изображений ДЗЗ. **Задача** - исследование и формулирование способа обработки мультиспектральных данных, позволяющего автоматизировать процесс оперативного распознавания участков выгоревших территорий на изображениях, для разработки программной системы экомониторинга с использованием таких средств искусственного интеллекта, как глубокое обучение и нейронные сети. В результате анализа современных методов обработки мультиспектральных данных было выбрано исследование применения нейронных сетей со стратегией обучения с учителем. Выбор описанных методов для решения прикладной задачи базируется на высокой гибкости данных методов, а также, при условии достаточного объема использованных учебных входных данных и корректных стратегий обучения, возможности анализа разнородных мульспектральных данных с обеспечением высокой точности результатов для каждой отдельной выборки. **Выводы**: исследовано и обосновано применение методологий интеллектуальной обработки мультиспектральных изображений. Рассмотрены теоретические основы построения нейронных сетей, выбрана прикладная область применения. Проанализирована и предложена архитектурная модель программного продукта с учетом его масштабируемости, проведена разработка программной реализации и показаны результаты ее работы. Полученные результаты показывают работоспособность и перспективность предложенных алгоритмов, что является поводом для дальнейшего исследования и совершенствования применяемых алгоритмов, с их возможным использованием в промышленных и корпоративных системах экомониторинга.

Ключевые слова: система экомониторинга; дистанционное зондирование Земли; мультиспектральное изображение; обработка изображений; нейросеть.

Methods of information systems protection

UDC 621.396.13+004.056.55 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.14

Petro Klimushin, Tetiana Solianyk, Tetiana Kolisnyk, Oleksandr Mozhaev

Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine

POTENTIAL APPLICATION OF HARDWARE PROTECTED SYMMETRIC AUTHENTICATION MICROCIRCUITS TO ENSURE THE SECURITY OF INTERNET OF THINGS

Abstract. The paper objective is to determine the basic schemes and their characteristics for ensuring the security of Internet of Things nodes using symmetric authentication cryptographic microcircuits. The main results that had been obtained by using method of structural and functional design represent potentially possible options for using symmetric authentication cryptomicrocircuits to ensure the protection of Internet of Things nodes. The analysis of the presented schemes' functioning made it possible to form the following conclusions. The host-side private key storage authentication scheme provides a fast symmetric authentication process, but requires secure storage of the private key on the host side. The simplest authentication scheme without storing a secret key on the host side, which does not imply the use of a cryptographic chip on the host side, provides a fast symmetric authentication process, but has a relatively low cryptographic strength, since the interaction in the system is performed without a random component in cryptographic transformations, which assumes constant the nature of requests in the system, and, consequently, the possibility of cryptanalysis of messages. To increase the cryptographic strength of such a scheme, it is advisable to introduce into the interaction system a random component in cryptographic transformations and use additional hashing procedures with an intermediate key, which leads to the complication of the scheme due to double hashing, but significantly increases the level of information security of IoT nodes. Downloading software in the system is implemented using secret encryption and authentication keys, which are permanently stored in the secure non-volatile memory of cryptographic chips of IoT nodes. In this case, session keys for encrypting the firmware code or decrypting it are generated on the client and host side, respectively. This approach allows creating unique downloads of the original firmware code (application) by preventing cryptanalysts from obtaining its images and algorithms. The peculiarity of the scheme of exchange of symmetric session encryption keys of messages are: use of a secret key stored on the side of the host and the client; the determination of the session key is performed as a result of hashing a random number with a secret key, that is, the exchange of the session key is performed in an encrypted secure form.

Keywords: Internet of Things; cybersecurity; symmetric cryptography; crypto authentication; encryption algorithms; cryptographic chips; microcontrollers; micro accelerators; fog and cloud computing.

Introduction

With the implementation of the Internet of Things (IoT), the solution of universally important social problems is expected: improvement of people's way of life; increasing the quality of medical services; ensuring reliable public safety; improvement of management processes; job creation; creating special opportunities for business, increasing productivity and competitiveness.

The projected number of devices (things) that will be connected to the Internet is constantly growing, so the size of the address space has already changed from 32 bits in IPv4 (4.3 billion unique addresses) to 128 bits in IPv6 ($3.4x10^{38}$ unique addresses). In addition, billions of already installed sensors and devices are still not IP-compatible.

When it comes to protecting such systems, "encryption" is often equated with the term "security", although it is only one element of security. To create a secure environment, you must first identify and identify the elements connected to the network. First, you need to determine who exactly wants to connect to the network, so encryption without prior authentication allows you to protect only those who should not be online.

Network security is provided by various switching and network technologies at different levels, sets of protocols used in the network. However, they should not be considered as a means of ensuring comprehensive end-to-end security of the connection. The level of the entire system's security is determined by the level of security of the weakest link, which is the weakest link of the entire security system.

Obviously, the main problem with the introduction of the Internet of Things is the personalization of devices using unique IDs, MAC addresses, keys and certificates in order to ensure the security of their operation on the network.

Using of a certain protection scheme has particular difficulties that have to be solved by either the equipment manufacturer or the end consumer. Someone must take the cost of solving the problem of personalization and the connection process. This can be a device manufacturer, service provider or customers with their own demand to connect ready-made equipment. The complexity of these processes makes them a weak chain in network security.

The offered article is focused on research of potential possibilities of using the technical decisions of personalization in system of the Internet of things. These solutions provide additional tools to ensure the highest level of security, with minimal additional costs.

Literature analysis. Nowadays, IoT devices are present in many environments, such as agriculture, housing automation, transportation, industry, defense and public safety, energy efficiency programs, health care, where security issues can pose a risk to human

© Klimushin P., Solianyk T., Kolisnyk T., Mozhaev O., 2021

security and privacy [1-6]. Many authors who analyze these unsecured systems pay attention to the problem of IoT authentication, in particular: development of mutual authentication protocols [3], blockchain-based IoT authentication [7, 9], multifactorial and continuous IoT authentication [8], etc.

Analysis of works in this field shows that the applying of authentication methods requires further research to determine the most secure (reliable) technologies for access to IoT nodes.

Currently, great attention in the IoT system is paid to the security of stored, processed and transmitted data, protection against copying of intellectual property and digital content, as well as protection against cloning of the final IoT [2, 14]. It should be noted that receiving confirmation from a node to access it (authentication) becomes a decisive factor in ensuring the security of the Internet of Things. In addition, IoT devices bring a new paradigm to network interaction, a distinctive feature of which is almost no interaction with humans, because they are very compact, limited in computing and energy resources. It is advisable to consider the following parameters for a quality choice of tools to provide access to IoT objects: a new paradigm of IoT network interaction; the possibility of using modern microcontrollers and additional cryptographic accelerators (crypto accelerators); a variety of built-in interfaces, protocols and cryptographic algorithms with hardware support.

The aim of the article is to study approaches to use cryptographic chips to ensure secure authentication of Internet of Things nodes using symmetric cryptography procedures.

1. Technology for Internet of things security. The Internet of Things is a network consisting of interconnected physical objects (devices). These devices have built-in microcontrollers, sensors, and software that allows transferring and exchanging data between them over communication protocols. It means the Internet of Things is a network of physical objects that have built-in technologies for interaction with the local or global computing environment [13, 18].

In general, from the information and communication point of view Internet of Things means a set of the following components, which is described as a symbolic formula [17]:

IoT = Microcontrollers (sensors) + Data + Network + Services.

IoT is a network of various IoT nodes connected to the Internet, which implement different models of interaction:

1) "Thing-Thing";

2) "Thing-User";

3) "Thing-Web Object".

IoT nodes are connected by wired and wireless communication lines and interact under the control of microcontrollers, which are built into physical objects. These interconnected IoT objects have a programming and identification function that provides the IoT network with data and executes commands received from data centers or from a user who interacts with them through a computer, cell phone, car system, smart device or another platform.

IoT network is based on the concept of "vague computing» in order to obtain greater efficiency and high performance. Fog Computing – is a model of computing and storing data between terminals (nodes IoT) and traditional cloud computing centers, and any device having computing resources can be a fog node.

In this case, the centers of computing will be called "hosts″. A host can be understood as:

1) Computer system or device that has a connection to a local network or to a network and the Internet and is an integral part of this network (network node);

2) Computer server that contains a resource and provides access in a client-server format;

3) Computer program that provides services to other programs and applications. Hosts interact with IoT endpoints (called "clients") to solve their functional tasks.

Integrated security level on a route "client-host" has the following objectives: IoT node authentication; creation and exchange of session encryption keys; data encryption; secure storage of keys and data; key and certificate management; data integrity and confidentiality; software download protection and password protection from copying and reading when logging in.

It is known that security measures involve three main elements (in English literature they are denoted by the abbreviation CIA – Confidentiality, Integrity, Authenticity) [2]:

– Authenticity – the sender of the message must be identified, it means be who he claims to be;

– Integrity – the message one have sent should not change during transportation to the destination;

– Confidentiality – data stored or transmitted should be available only to authorized persons or intended facilities.

In general, main task of CIA is to ensure the security of IoT nodes, while remaining within the available resources in terms of processing power, memory and power supply.

The negative impact on the security of the IoT node is possible in four ways:

1) Over a network through the following results:

– Network scanning using web tools (such as Shodan) to detect unprotected sites;

– Poor generation of random numbers in cryptoalgorithms;

– Use of malicious software;

– Updating the firmware of the original software with code written by an attacker;

– Violation of security at the transport layer of cryptographic protocols SSL/TLS (Secure Sockets Layer/Transport Layer Security);

2) Through external ports including through the unused port and providing access to the site IoT;

3) With the help of proximity attacks one can extract information about cryptographic keys by measuring the level of radiated interference or vibration on an unprotected device;

4) By physically penetrating the device, trying to investigate the internal circuits of the device or the contents of the internal memory.

It should be remembered that the consequences of a successful attack can put at risk the network as a whole, it means, everything connected to it. Therefore, the comprehensive security of IoT nodes should protect against all these methods of attacks. There are a number of ways to support important elements of the CIA [10]:

– Authenticity – by identifying the identity of any user or any additional device that tries to connect to the node;

– Integrity – by using the message authentication code (MAC) to confirm the invariability of the message along the route;

– Confidentiality – achieved by encrypting the message.

In addition, measures can be taken to protect against contactless attacks, which are practical in nature and can be implemented throughout the system or only in a single IoT node [10]:

– Storage of keys in the protected Flash - memory without possibility of electric access to keys;

– Shielding system to limit electromagnetic radiation;

– Introduction of special schemes to prevent attempts to control the supply voltage or other signals;

– Encryption of key information in the repository so that it is not possible to open it with physical access to the built-in Flash - memory;

– Reducing the number of external ports.

It is also extremely important to protect cryptographic keys throughout their life cycle – from generation, use, storage to destruction. The tested methodology is the use of hardware security modules (HSM), which store keys in encrypted form and in secure equipment. All transactions encrypt and decrypt data that comes from outside, occurring within the device. Thus, cryptographic keys never leave a secure perimeter inside the device in which they were created.

Authentication can be performed in two main ways: symmetric and asymmetric. The main difference between them is how secret keys are used. If the same key is used on both the host side and the client side, the authentication is symmetric. If a mathematically related pair of public and secret keys is used, the authentication is asymmetric.

The Advanced Encryption Standard (AES) symmetric block encryption algorithm was adopted by the US government as a standard in a 2002 through the competition between technology institutes (128-bit block size, 128/192/256-bit key). It is an international block encryption standard ISO/IEC 18033-3:2010 and has replaced the Data Encryption Standard (DES), which no longer meets network security requirements.

The main advantages of the AES algorithm include:

1) Scattering – changing any key character or plaintext affects a large number of ciphertext characters;

2) Mixing – the transformations that are used make it difficult to obtain statistical relationships between open and closed text;

3) Byte-oriented structure, which gives good prospects for the implementation of the algorithm in future processors;

4) High speed on different platforms;

5) Not prone to many types of cryptanalytic attacks, such as: differential cryptanalysis, linear cryptanalysis, cryptanalysis based on related keys (there are no weak keys in the algorithm).

There are three ways to implement encryption according to the AES algorithm [19]:

1) Software implementation – focused on the bit rate of the platform and uses mathematical optimizations and calculated substitution tables;

2) Hardware implementation – used extensions of the command system and special instructions for modern microprocessors, which allow performing some hardware operations, which significantly speeds up the process;

3) Implementation with the use of a video card - the resources of graphics accelerators are used to perform parallel encryption or decryption.

Asymmetric cryptography based on the cryptographic algorithm with RSA (Rivest Shamir Adleman) public key, ECC (Elliptic Curve Cryptography) is a powerful tool, but it requires much more processing power for encryption and decryption compared to symmetric algorithms DES, AES block encryption. Therefore, the use of algorithms with public key was found as not very effective to transfer each encrypted data packet through the Internet. As a result, using of asymmetric cryptography was limited to the exchange and calculation of symmetric session keys, which are used to encrypt and decrypt data streams in the Internet [15].

The security of the RSA cryptosystem is based on the problem of integer factorization, and ECCs are based on elliptic curves over finite fields. To ensure the required level of cryptocurrency, the ECC system uses keys of much shorter length than the RSA system. This emphasizes the effectiveness of their use in the field of Internet security as devices with very limited resources.

The basis for building cryptographic systems are random sequences, which can be obtained using random number generators. The cryptographic stability of the data encryption tool significantly depends on the quality of randomness of these sequences, which are used to generate cryptographic keys, key information and system parameters of the cryptographic system.

Random number generators as well as sequences obtained with their use can be divided into two classes:

1) Random (physical, hardware) – random sequences with high-quality randomness;

2) Pseudo-random (algorithmic, software) – pseudo-random sequences that have a period of repetition.

The creation of effective random sequence generators, as well as the evaluation of their statistical properties is one of the important and separate areas of cryptography research [12].

Today, hardware information security is becoming more widely used, despite the fact that they are much more expensive compared to similar software. The main advantages of such security include [16]:

1) The presence of a hardware built-in random number generator, which provides the generation of more reliable keys of crypt algorithms;

2) Cryptographic keys are stored and cryptographic procedures are performed on the data in a secure cryptographic chip, not in the computer's RAM;

3) The ability to distinguish between the processes of protection of information from unauthorized access and access to a computer;

4) Use a specialized microprocessor function to perform cryptographic transformations, which reduces the load on the computer's CPU;

5) Guaranteeing the integrity of the cryptographic transformation algorithms implementation, because cryptographic software by modifying the program code can change the structure of the cryptoalgorithm;

6) Increase the speed of data encryption / decryption.

Due to certain advantages of hardware protection of information and the requirements of the development of security technology for the use of the Internet of Things, there is a need to create cryptographic accelerators (cryptoaccelerators) – specialized modules in general purpose microprocessor kits.

A feature of cryptoaccelerators is that they operate separately from the core. Thus, the microcontroller core can use its resources to perform other tasks. In addition, cryptoaccelerators, unlike standard interfaces (SPI, I2C, UART, USB, etc.), have specific implementations depending on the model and family of microcontrollers, which complicates the optimal choice for a particular task [18]. The use of cryptographic accelerators increases the speed of encryption by the AES algorithm compared to its software implementation in 8/16-bit microcontrollers by 10-20 times, and in 32-bit microcontrollers – up to 150 times. At the same time, the speed of hash algorithms SHA-256 with hardware implementation in 32-bit microcontrollers increases 100 times, and for hash algorithms HMAC – up to 500 times [11].

It should be noted that the trend towards a comprehensive security solution is observed in 32-bit microcontrollers. They also provide the ability to securely generate and store keys, support electronic certificates and signatures, secure download of firmware (applications).

Let us analyze the potential applications of cryptographic chips of the CryptoAuthentication family for the security of the Internet of Things using symmetric cryptography procedures. Such procedures should include:

– Symmetric authentication with and without storage of the secret key on the host side;

– Symmetric authentication according to the scheme with an intermediate key and without storing the secret key on the host side;

– Creation and exchange of session keys of data encryption;

– Secure storage and transmission of data using symmetric encryption;

– Password protection from copying and reading when logging in;

– Protection of downloading the original firmware code (application) using secret encryption and authentication keys.

2. Symmetric authentication with storage of the secret key on the host side. For symmetric authentication tasks with mutual authorization between the host and the device, both sides use the same secret key encryption. This secret key is pre-programmed into the protected memory of cryptographic chips of symmetric authentication on the host and client side (Fig. 1). The host sends the client a random request number from the Random number generator (RNG), which is created by the built-in random number generator of the chip.

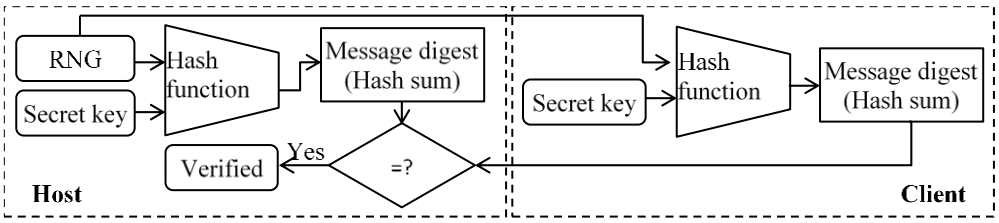


Fig. 1. Symmetric authentication with storage of the secret key on the host side

Upon receiving this request, the client submits it to the input of the hash algorithm (Hash function) together with the secret key, which is stored in the protected memory of the chip. The result is a message digest (hash sum) of the message, which is also called the message authentication code, or MAC. The message is forwarded to the host, where it is compared to a message received in the same way on the host side. If the client and host digests match, the client is considered verified, i.e. the client has been authenticated.

The main features of such an authentication scheme:

1) Fast process of symmetric authentication;

2) Cryptographic chips of symmetric authentication on both sides provide secure storage of secret keys. The disadvantage of this scheme is the storage of the secret key on the host side [14].

3. Symmetric authentication without storing a secret key on the host side. Symmetric authentication can be performed without storing secret keys on the host side, ie without a cryptographic chip on the host side. This approach is called "fixed request". In this case, the host no longer uses random numbers. Instead, certain pairs of pre-calculated numbers are used (query values and corresponding responses that are written to the non-volatile memory of the microcontroller on the host side).

However, this method has a relatively low cryptographic resistance, as the request has no random component and the cryptanalyst can use a logic analyzer on the information exchange bus to intercept messages and reveal secrets.

Advantages of the approach: fast process of symmetric authentication; no cryptographic chip on the host side is required, the host performs the authentication function under the control of the microcontroller; it is not necessary to securely store secret keys on the host side. The disadvantage of this scheme is low cryptocurrency.

4. Symmetric authentication according to the scheme with an intermediate key and without storing the secret key on the host side. This approach is implemented by an additional hashing procedure with an intermediate key (Fig. 2).

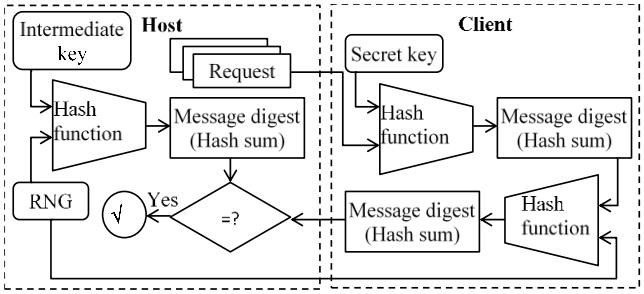


Fig. 2. Symmetric authentication according to the scheme with an intermediate key and without storing the secret key on the host side

As in the previous case, the values of the requests and pre-calculated and related responses are pre-written to the non-volatile memory of the host microcontroller. But now these answers become Intermediate keys. The process begins with a request (Request), which the host sends to the client. This request is hashed (Hash function) in the cryptographic chip on the client side with a secret key (Secret key). The received digest (Message digest), which will be an intermediate key, then hashes again, but with a random number (RNG), for example, a combination of current values of date and time, which is generated by the host and sent to the client. The re-received digest (Message digest) is a client response that is sent to the host and compared there with the digest received by the host by the same calculations with the same data. If the digests coincide, the client is considered verified. Note that in this scheme, the client's response will be new each time, because the random number (RNG) is different each time. This significantly increases the level of information security of the system - now the use of a logic analyzer will not give the cryptanalyst the desired result. Thus, the host request has a random component and as a result the client forms a response that is not repeated. Therefore, the level of cryptocurrency is significantly increased, and the storage of the secret key is on the client side and does not require secure storage of secret keys on the host side.

5. Protection of downloading the original firmware code (application) using secret encryption and authentication keys. This approach uses the encryption of the original firmware code (application) and the generation of authentication code on the host side and includes operations of decryption, authentication and download of source code on the client side (Fig. 3).

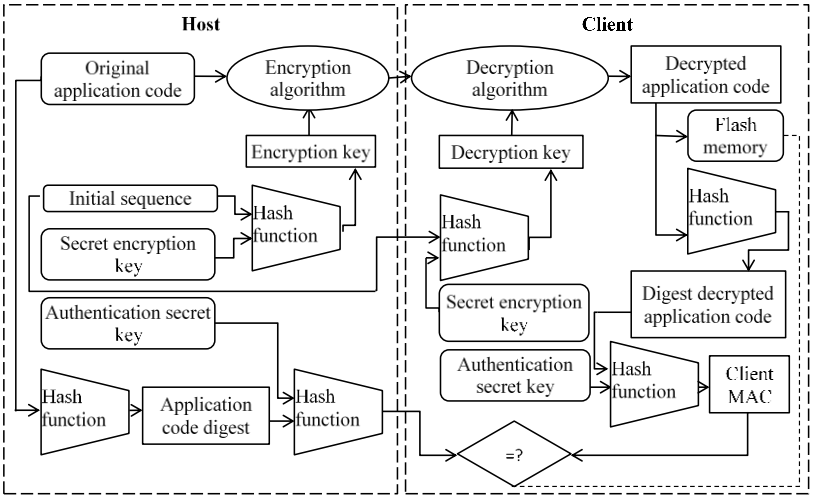


Fig. 3. Protection of firmware code download (application) with secret keys

The encryption process on the host side is performed by hashing (Hash function) of some initial sequence (Initial sequence) together with the secret encryption key (Secret encryption key). The resulting digest of the initial sequence will be a session encryption key (Encryption key) for the symmetric encryption algorithm. The result of this conversion will be an encrypted firmware (application) code, which together with the initial sequence will be transmitted to the client side so that it can be decrypted.

Obtaining the MAC is done by hashing (Hash function) of the original application code (Original application code). As a result, the digest of the application code (Application code digest) is determined, which is then hashed together with the secret authentication key (Authentication secret key). The resulting digest is a MAC and is sent to the client.

On the client side, the received encrypted code is first decrypted, and then its authentication is performed to confirm the authenticity. To decrypt the code, the initial sequence (Hash function) is hashed together with the secret encryption key, which is also stored on the client side. The result of hashing is a decryption key, which, of course, coincides with the encryption key.

This key restores the Decrypted application code. The process of obtaining a MAC on the client side follows the same procedure as on the host side. If the client-side MAC (Client MAC) matches the MAC obtained from the host, the resulting source code (Decrypted application code) is considered valid and can be loaded into Flash memory for execution.

Thus, this approach allows you to create unique downloads of the original firmware code (application) using secret encryption and authentication keys. In this case, the session keys for encrypting the firmware code or decrypting it are formed on the client and host side, respectively. This approach allows creating unique downloads of the original firmware code (application) by preventing cryptanalysts from obtaining its images and algorithms [14].

6. Creating and exchanging session encryption data keys. A data encryption session key is a parameter for cryptographically converting data into a single communication session. The session key is limited in time and is typically used to encrypt and decrypt within a single communication session. This is due to the fact that encrypting with the same key several ciphertexts increases the probability of compromising the key, i.e. increases the possibility of cryptanalysis of data in the system.

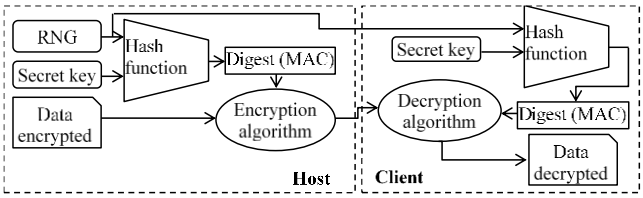


Fig. 4. Exchange a symmetric message encryption session key

Session key exchange begins with random number generation using the built-in RNG random number generator. This number, along with the Secret key stored in the host's secure memory, is hashed using a hash function to produce a digest (Digest MAC). The first or second 16 bytes (128 bits) are taken from the received digest, which become the session key of AES encryption. This key can be used to perform the procedure of encrypting the required source data (Data encrypted) according to the AES-128 algorithm.

The encrypted data and the random number are then forwarded to the client side and used to recover the session key using the same secret key stored in the client's secure memory.

Since the secret keys are the same on both sides, the hash operation with the same random number on each side will result in the same digests. Also on the client side, the first or second 16 bytes of the received digest are taken as a session key for the AES-128 algorithm. This key is used to decrypt the received encrypted data by executing the decryption algorithm AES-128.

Thus, the exchange of a symmetric session key encryption of messages is performed on the basis of generating a random number on the host side, using a secret key stored on the host side and the client. The session key is defined as the result of hashing a random number with a secret key and extracting a certain part from the digest obtained by the hashing result. To ensure security, the transmission of the session key to the client side is performed as a result of encrypting some data with the session key. The allocation of the session key on the client side is carried out according to the same scheme as on the host side - based on a random number and a secret key. The peculiarity of this methodology is that the session key is changed for each session, which increases the level of security. This methodology can be implemented using cryptographic chips of symmetric authentication ATSHA204A [14].

7. Secure storage and transmission of data using symmetric encryption. In the operation of distributed data collection and processing systems connected to data banks on remote servers or cloud storage, secure from the point of view of information security data exchange is very important. It involves the use of a proven and reliable encryption algorithm and encryption keys, which must be stored in a secure place. The capabilities of cryptographic devices in this sense look better compared to traditional software-based solutions.

Let the remote client obtain confidential information from the host. This information must be encrypted beforehand. However, for further decryption on the side of the remote client it is necessary to have a decryption key. There is a task of sending it on the same communication channels without the risk of disclosure. CryptoAuthentication chips can help solve this problem.

Symmetric encryption is used for this purpose (Fig. 5). The information intended to be sent to the client is encrypted on the server side by a fast symmetric AES algorithm. The session encryption key for this operation is formed by hashing some initial sequence (random number) and a secret key, which is securely stored on the encryption side. Encrypted data (Encrypted file) and Initial sequence are stored on the server, and the session key is destroyed.

The initial sequence and encrypted data (file) are then sent to the client. The encrypted file is received by the client's system microcontroller, and the initial sequence is received by the CryptoAuthentication chip, which stores the same secret key as the remote host. This initial sequence is hashed in the secure hardware environment of the cryptographic device with the secret key. The result of the hashing will be a session key, with which the decrypted file will be decrypted according to the AES symmetric encryption algorithm.

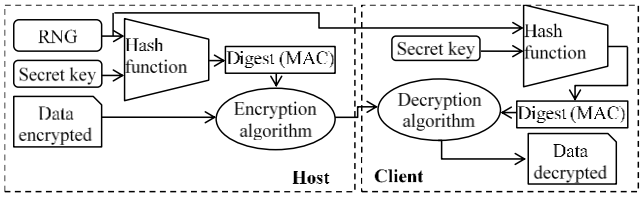


Fig. 5. Secure data storage using symmetric encryption

Note that the provided scheme of secure storage and transmission of data using symmetric encryption is

very simple. Another cryptographic chip from the CryptoAuthentication family is added to the system, which can also be used to store other small amounts of sensitive data.

8. Password protection from copying and reading when logging in. Sometimes it is necessary to compare the password entered into the system with the reference value stored in it, so that the password can not be copied or read. Since the firmware of the standard microcontroller can be hacked, in such cases it is recommended to store both the password in a secure hardware environment and to compare the value of the entered password with the reference, i.e. to perform authentication.

CryptoAuthentication family cryptographic chips can be used for this purpose. In the example in Fig. 6, the cryptographic device sends a request to the microcontroller in the form of a random number at the time when the password begins to be entered into the system from the outside. This random number is generated (RNG) and then hashed (Hash function) in the cryptographic chip with the reference value of the password, which is stored in its protected independent memory.

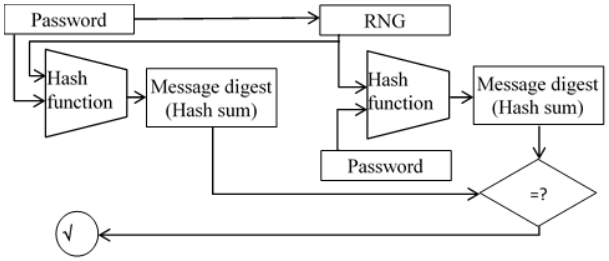


Fig. 6. Password protection from copying and reading when logging in

After entering the password into the system, the microcontroller hashes the obtained value with a random number sent to it in advance from the cryptographic chip. The received second digest is sent from the microcontroller to the cryptographic device, which compares it with the already calculated first digest. When they match, the entered password is considered valid, the cryptographic chip signals the microcontroller, thus allowing the system to work.

A feature of the scheme is the secure storage of system passwords, inexpensive, reliable and easy to implement solution.

Conclusions. Conclusions. Thus, the level of complex security of the Internet of Things on the route "client-host" solves the following tasks: symmetric or asymmetric authentication of interacting system devices; creation and exchange of session encryption keys; storage of encryption keys; data integrity; data confidentiality; software and data download protection.

Asymmetric cryptography based on RSA, ECC public key cryptographic algorithms is a powerful tool, but it requires much more computing power to encrypt and decrypt data compared to symmetric DES, AES block encryption algorithms.

Analysis of basic symmetric authentication schemes is characterized by the fact that:

1) The authentication scheme with storage of the secret key on the host side provides a fast process of symmetric authentication, but requires secure storage of the secret key on the host side;

2) Authentication scheme without storing a secret key on the host side, i.e. without a cryptographic chip on the host side, provides a fast process of symmetric authentication, but has a relatively low cryptographic stability, as the interaction in the system is performed without a random component in cryptographic transformations;

3) To increase the cryptographic stability of the scheme of paragraph 2, it is advisable to introduce into the system of interaction of a random component in cryptographic transformations and the use of additional hashing procedures with an intermediate key.

Downloading the original firmware to the system is done using secret encryption and authentication keys, which are stored permanently in the protected non-volatile memory of cryptographic chips on the client and host side. In this case, the session keys for encrypting the firmware code or decrypting it are formed on the client and host side, respectively. This approach allows you to create unique downloads of the original firmware code (application) by preventing cryptanalysts from receiving its images and algorithms.

The peculiarity of the scheme of exchanging symmetric session keys encryption of messages is:

1) Execution based on the generation of a random number on the host side and the use of a secret key stored on the host and client side;

2) The session key is defined as the result of hashing a random number with a secret key and the selection of a certain part of the digest obtained by the hashing result;

3) To ensure the security of the transmission of the session key to the client is performed by encrypting some data with the session key;

4) The allocation of the session key on the client side is carried out on the same as on the host side based on a random number and a secret key.

In the operation of distributed data collection and processing systems connected to data banks on remote hosts, secure from the point of view of information security data exchange involves the use of a proven and reliable encryption algorithm and encryption keys, which must be stored in a secure place.

The capabilities of cryptographic devices in this sense look better compared to traditional software-based solutions.

Fast symmetric AES encryption is used for secure data storage. In this case, the session encryption key for this operation is formed by hashing some initial sequence (random number) and a secret key, which is securely and securely stored on the encryption side. Transmission of confidential data over the network is possible in an encrypted file. The encrypted file on the receiving side is received by the client's system microcontroller, and the initial sequence is received by a cryptographic chip, in the memory of which the same secret key is stored as on the remote host. This initial sequence is hashed in the secure hardware environment

of the cryptographic device with the secret key. The result of the hashing will be a session key, which will be used to decrypt the file using the symmetric AES encryption algorithm.

This scheme of secure storage and transmission of data is very simple. Another cryptographic chip from the CryptoAuthentication family is added to the system, which can also be used to store other small amounts of sensitive data.

To securely store system passwords, you must store them in a secure non-volatile memory of the cryptographic chip, as the firmware of a standard microcontroller can be cracked. In this case, the comparison of passwords entered into the microcontroller with the reference stored in the memory of the cryptographic chip, it is advisable to perform in a secure environment, as well as comparing the results of hashing these passwords with a certain random number.

REFERENCES

1. Burg, A., Chattopadhyay, A. and Lam, K. (2018), "Wireless Communication and Security Issues for Cyber-Physical Systems and the Internet-of-Things", *Proc. IEEE*, no. 106, pp. 38–60.
2. *CryptoAuthentication™ Family*. URL: https://www.microchip.com/en-us/products/security-ics/cryptoauthentication-family.
3. David J., Wu, Ankur, Taly, Asim, Shankar and Dan, Boneh Privacy, (2017), "Discovery, and Authentication for the Internet of Things", *Computer Science. Cryptography and Security*, URL: https://arxiv.org/abs/1604.06959.
4. Eustace, Asanghanwa and Ronald, Ih. (2020), *Security for Intelligent, Connected IoT Edge Nodes. White Paper, Security ICs, CryptoAuthentication Marketing*, URL: https://www.microchip.com/content/dam/mchp/documents/OTH/ProductDocuments/SupportingCollateral/Atmel-8994-Security-for-Intelligent-Connected-IoT-Edge-Nodes_Whitepaper.pdf.
5. Froiz-Míguez, I., Fernández-Caramés, T.M., Fraga-Lamas, P. and Castedo L. (2018), "Design, Implementation and Practical Evaluation of an IoT Home Automation System for Fog Computing Applications Based on MQTT and ZigBee-WiFi Sensor Nodes", *Sensors*, no. 18(8), 42 p., DOI: https://doi.org/10.3390/s18082660.
6. Lo'ai, Tawalbeh, Fadi, Muheidat, Mais, Tawalbeh and Muhannadm Quwaider (2020), "IoT Privacy and Security: Challenges and Solutions", *Appl. Sci.*, no. 10(12), 17 p., DOI: https://doi.org/10.3390/app10124102.
7. Mostafa, Yavari, Masoumeh, Safkhani, Saru, Kumari, Sachin, Kumar and Chien-Ming, Chen (2020), "An Improved Blockchain-Based Authentication Protocol for IoT Network Management", *Security and Communication Networks*, article ID 8836214, 16 p., DOI: https://doi.org/10.1155/2020/8836214.
8. Rainer, Falk and Steffen, Fries (2016), "Advanced Device Authentication: Bringing Multi-Factor Authentication and Continuous Authentication to the Internet of Things", *CYBER 2016: The First International Conference on Cyber-Technologies and Cyber-Systems*, Germany, pp. 69–74.
9. Zongqing, Tian, Biwei, Yan, Qiang, Guo, Jianyun, H. and Qingyu Du (2020), "Feasibility of Identity Authentication for IoT Based on Blockchain", Procedia Computer Science, vol. 174, pp. 328–332, DOI: https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.06.094.
10. Asangkhanva. Yu, Yi. R. and Syrov, A. (2019), "Improving the security level of the edge nodes of the IoT using microchip ATECC608A chips", *Electronics NTB*, no. 7 (00188), p. 60-64, DOI: https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.188.7.60.64.
11. Gnusov, Y. B., Klimushin, P. S., Kolisnyk, T. P. and Mozhayev, M. O. (2020), "Analysis of microcontroller modeling systems with additional modules of cryptographic information protection", *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*, no. 1 (3), pp. 79–84, DOI: https://doi.org/10.20998/2079-0023.2020.01.14.
12. Gorbenko, Y. I., Grinenko, T. O. and Narezhniy, O. P. (2015), "Analysis of statistical properties of the hardware generator of random sequences", *Collection of scientific works of Kharkiv University of the Air Force*, no. 4 (45), pp. 74–77.
13. Gorbovsky, A. I. and Voitovich, O. P. (2020), *Internet safety research*, URL: http://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/17277/2805.pdf?sequence=3 pdf.
14. Krivchenko, I. (2015), "Hardware-protected chips of the CryptoAuthentication family: potential applications of ATSHA204A", *Components and technologies*. no. 10, pp. 60–65.
15. Crinon, G. (2018), *Internet of Things security: existing problems and their solutions*, URL: https://controleng.ru/wp-content/uploads/In_08.pdf (accessed 21.05.2021).
16. Petrenko, A. B., Shmatok, O. S. and Ageenko, E. A. (2014), "Analysis of time attacks on the hardware encoder of the personal means of cryptographic protection of information SHIPKA", *Science-intensive technologies*, no. 2 (22), pp. 187–191.
17. Puleko, I. V. and Chumakevich, V. O. (2021), *IoT sensors with time representation of measuring information*, URL: https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/06/44.pdf.
18. Sovin, Y. R., Nakonechny, Y. M., Opirsky, I. R. and Stakhiv, M. Yu. (2018), "Analysis of hardware support for cryptography in IoT devices", *Ukrainian Scientific Journal of Information Security*, vol. 24, issue 1, pp. 36–48.
19. Shlykov, D. I. (2018), "About the fast implementation of the AES cipher in the Sdicrypt library", *Information systems*. no. 3 (53), pp. 34–40.

Received (Надійшла) 11.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Клімушин Петро Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри протидії кіберзлочинності Харківського Національного університету внутрішніх справ, Харків, Україна;
Petro Klimushin – Candidate of technical science, associate professor, associate professor of Countering Cybercrime Department Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: klimushyn@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1020-9399.

Соляник Тетяна Миколаївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри протидії кіберзлочинності Харківського Національного університету внутрішніх справ, Харків, Україна;
Tetiana Solianyk – Candidate of technical science, associate professor, associate professor of Countering Cybercrime Department Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: t.solianyk@khai.edu; ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3695-0019.

Колісник Тетяна Петрівна– кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри протидії кіберзлочинності Харківського Національного університету внутрішніх справ, Харків, Україна;
Tetiana Kolisnyk – Candidate of pedagogical science, associate professor, associate professor of Countering Cybercrime Department Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ktp201505@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7442-8136.

Можаєв Олександр Олександрович –доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій Харківського Національного університету внутрішніх справ, Харків, Україна;
Oleksandr Mozhaev – Doctor of technical science, professor, professor of information technology Department Kharkiv National University of Internal Affairs, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: mozhaev1957@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1412-2696.

Потенційне застосування апаратно захищених мікросхем симетричної автентифікації для забезпечення безпеки інтернет речей

П. С. Клімушин, Т. М. Соляник, Т. П. Колісник, О. О. Можаєв

Анотація. Метою роботи є визначення основних схем та їх характеристик для убезпечення вузлів інтернет речей з використанням криптографічних мікросхем симетричної автентифікації. **Результатами** роботи, що були отримані за допомогою **методу** структурно-функціонального проектування, є потенційно можливі варіанти застосування кріптомікросхем симетричної автентифікації для забезпечення захисту вузлів інтернет речей. Аналіз функціонування представлених схем дозволив сформувати наступні **висновки**. Схема автентифікації зі зберіганням таємного ключа на стороні хоста забезпечує швидкий процес симетричної автентифікації, але вимагає захищеного зберігання таємного ключа на стороні хоста. Найбільш проста схема автентифікації без зберігання таємного ключа на стороні хоста, яка не передбачає застосування криптографічної мікросхеми на стороні хоста, також забезпечує швидкий процес симетричної автентифікації, але має відносно невисоку криптостійкість, так як взаємодія в системі виконується без випадкової складової в криптографічних перетвореннях, що зумовлює незмінний характер запитів в системі, а отже можливість криптоаналізу повідомлень. Для підвищення криптостійкості цієї схеми доцільне введення в систему випадкової складової в криптографічних перетвореннях та використання додаткових процедур хешування з проміжним ключем, що приводить к ускладненню схеми за рахунок подвійного хешування, але значно підвищує рівень інформаційної безпеки вузлів IoT. Завантаження програмного забезпечення в системі реалізується за допомогою таємних ключів шифрування та автентифікації, які зберігаються постійно в захищеної енергонезалежної пам'яті криптографічних мікросхем вузлів IoT. При цьому сеансові ключі шифрування коду мікропрограми або її розшифрування формуються відповідно на стороні клієнта і хоста. Цей підхід дозволяє створювати унікальні завантаження оригіналу коду мікропрограм (додатку) шляхом недопущення отримання криптоаналітиками її образів і алгоритмів. Особливістю схеми обміну симетричними сеансовими ключами шифрування повідомлень є: використання таємного ключа, що зберігається на стороні хоста і клієнта; визначення сеансового ключа виконується як результат хешування випадкового числа з таємним ключем, тобто обмін сеансовим ключем виконується в зашифрованому безпечному вигляді.

Ключові слова: інтернет речей; кібербезпека; симетрична криптографія; криптоавтентифікація; алгоритми шифрування; криптографічні мікросхеми; мікроконтролери; мікроакселератори; туманні та хмарні обчислення.

Потенциальное применение аппаратно-защищенных микросхем симметричной аутентификации для обеспечения безопасности интернет вещей

П. С. Климушин, Т. Н. Соляник, Т. П. Колесник, А. А. Можаев

Аннотация. Целью работы является, определение основных схем и их характеристик для обеспечения безопасности узлов интернет вещей с использованием криптографических микросхем симметричной аутентификации. **Результаты** работы, полученные **методом** структурно-функционального проектирования, представляют собой потенциально возможные варианты применения криптомикросхем симметричной аутентификации для обеспечения защиты узлов интернет вещей. Анализ функционирования представленных схем позволил сформировать следующие **выводы**. Схема аутентификации с хранением секретного ключа на стороне хоста обеспечивает быстрый процесс симметричной аутентификации, но требует защищенного хранения секретного ключа на стороне хоста. Наиболее простая схема аутентификации без хранения секретного ключа на стороне хоста, которая не предполагает применение криптографической микросхемы на стороне хоста, также обеспечивает быстрый процесс симметричной аутентификации, но имеет относительно невысокую криптостойкость, так как взаимодействие в системе выполняется без случайной составляющей в криптографических преобразованиях, что предполагает неизменный характер запросов в системе, а, следовательно, возможность криптоанализа сообщений. Для повышения криптостойкости такой схемы целесообразным введение в систему взаимодействия случайной составляющей в криптографических преобразованиях и использование дополнительных процедур хеширования с промежуточным ключом, что приводит к усложнению схемы за счет двойного хеширования, но значительно повышает уровень информационной безопасности узлов IoT. Загрузка программного обеспечения в системе реализуется с помощью секретных ключей шифрования и аутентификации, которые хранятся постоянно в защищенной энергонезависимой памяти криптографических микросхем узлов IoT. При этом сеансовые ключи шифрования кода микропрограммы или ее расшифровки формируются соответственно на стороне клиента и хоста. Этот подход позволяет создавать уникальные загрузки оригинала кода микропрограмм (приложения) путем недопущения получения криптоаналитиками ее образов и алгоритмов. Особенностью схемы обмена симметричными сеансовыми ключами шифрования сообщений являются: использование секретного ключа, хранящегося на стороне хоста и клиента; определение сеансового ключа выполняется как результат хеширования случайного числа с секретным ключом, то есть обмен сеансовым ключом выполняется в зашифрованном безопасном виде.

Ключевые слова: интернет вещей; кибербезопасность; симметричная криптография; криптоаутентификация; алгоритмы шифрования; криптографические микросхемы; микроконтроллеры; микроакселераторы; туманные и облачные вычисления.

UDC 004.932 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.15

Igor Ruban, Nataliia Bolohova, Vitalii Martovitskyi, Roman Yaroshevych

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF METHODS FOR EMBEDDING DIGITAL WATERMARKS

Abstract. In recent years, we have seen a significant increase in traffic moving across various networks and channels. The development of technology and global network leads to an increase in the amount of multimedia traffic. To authenticate and avoid abuse, data should be protected with watermarks. This paper discusses various robust and invisible watermarking methods in the spatial domain and the transform domain. The basic concepts of digital watermarks, important characteristics and areas of application of watermarks are considered in detail. The paper also presents the most important criteria for assessing the digital watermark effectiveness. Based on the analysis of the current state of the digital watermarking methods, robustness, imperceptibility, security and payload have been determined as the main factors in most scientific works. Moreover, researchers use different methods to improve / balance these factors to create an effective watermarking system. Our research identified the main factors and new techniques used in modern research. And the assessment of watermark method effectiveness was proposed.

Keywords: digital watermark; authentication; LSB; copyright protection; digital image; steganographic; cyber-security.

Introduction

In recent years, we have seen a significant increase in traffic moving across various networks and channels. The development of technology and global network leads to an increase in the amount of multimedia traffic [1]. To authenticate and avoid abuse, data should be protected with watermarks. A digital watermark prevents illegal copying and distribution of multimedia content by hiding unremarkable ownership data [2, 3]. A digital watermark (DWm) is a technology used in information security to solve the problem of copyright protection for certain digital in-formation. With this, a special mark is applied to the digital graphic images, which can remain visible or invisible to a person.

The watermark embedding process can be determined based on domain and different groups. According to the domain, the methods of embedding digital water-marks could be divided both in the domain space and during domain transformation, for example, methods based on SVD [4]. Initially, approaches to the spatial domain, in which the process of embedding watermarks can be carried out by directly changing the pixels in an image, were used. It has such advantages as low computational complexity and ease of implementation. The most commonly used techniques in this area are the least significant bit (LSB) and the spread spectrum and correlation. However, techniques such as discrete cosine transforms (DCT), discrete wavelet transforms (DWT), discrete Fourier transforms (DFT), singular value decomposition (SVD), and Karhunen-Loew transforms (KLT) are examples of transform domain techniques. In the context of DWM visibility, there are two different categories of digital watermark: visible and invisible. In addition, there are various types of invisible watermarks that are both robust and fragile. A complete classification of digital watermarks is presented in [4].

Embedding and extracting watermark process

The system for embedding and extracting watermarks is shown in Fig. 1; it performs the tasks of embedding and extracting a digital watermark from a container image. A precoder is a device designed to convert a hidden watermark to a form suitable for embedding in a container. Digital watermark embedding device is intended for embedding a hidden digital watermark in the container image. The system combines two types of information so that they can be seen by two fundamentally different detectors. One of the detectors is a digital watermark extraction system, and another is a human. Pre-processing is often performed using a key to improve the secrecy of the data that is embedded. The following stage is the digital watermark "embedding" into the container, for example, by modifying the least significant bits of the coefficients. This process is possible due to the peculiarities of the human perception system. It is well known that images have great psycho-visual redundancy. The human eye is similar to a low-pass filter that skips fine details [6].

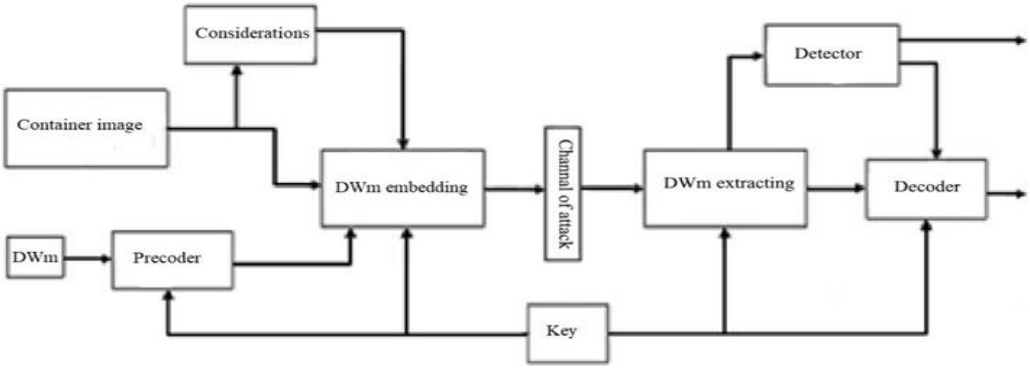


Fig. 1. Embedding and extracting watermark process

 © Ruban I., Bolohova N., Martovitskyi V., Yaroshevych R., 2021

Types of digital watermark systems

There are three different types of digital watermarks, which depend on the characteristics and method of their detection [7-9]. A brief description of this system is discussed below (Fig. 2):

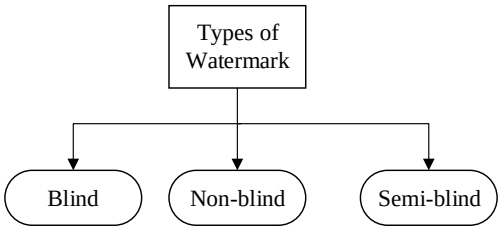


Fig. 2. Main types of watermarks

- Blind Digital Watermarking Method: In this type of system, watermarking only requires a watermarked image, and an original image is not necessary to extract a digital watermark. Potential applications for blind watermarking are healthcare, copyright protection, electronic voting system, and the like.

- Non-Blind Digital Watermarking Method: In such a system, an original image and an embedded image are copied; the watermark and the original image are required to extract the digital watermark. Potential applications for this type of watermarking system are covert communication and copyright protection.

- Semi-Blind Digital Watermarking Method: It works like a non-blind system, requiring additional input. Some important applications for such a system are image authentication, CAD models and the like.

Characteristics of watermark

There are many important properties that characterize the watermark, which are very important for digital watermarking systems [9]. Fig. 3 shows the main characteristics of watermarks.

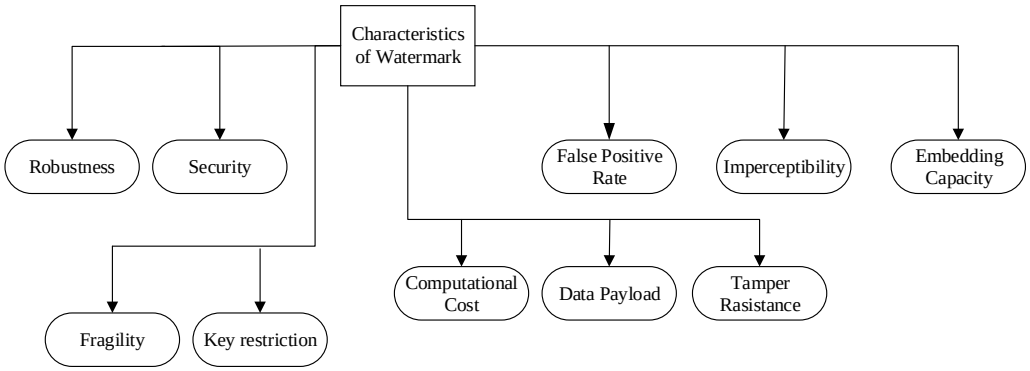


Fig. 3. Characteristics of watermark

Watermark robustness is the ability of an algorithm to resist against noise. Security means the watermark is difficult to change or remove without destroying the container image. Embedding capacity of the watermark is expressed as the amount of information contained in the container. Imperceptibility of the watermark is achieved by invisible to the human eye or ear file modifying. Watermark is called fragile if it cannot be detected with the slightest modification. Such digital watermarks are commonly used for integrity checking. Key restrictions are considered as another characteristic, it is the level of restriction that applies to the readability of the watermark.

Computational cost is described as the total resource cost of embedding and extracting the watermark. Other important characteristics are clearly defined in [10].

Applications of watermarking

Potential researchers use different watermarking schemes for different areas of human activity. These include copyright protection, digital forensics, military affairs, healthcare, medical programs, etc. Some applications are shown in Fig. 4.

1. Copyright protection. The main goal is to protect digital information copyrights by hiding classified information.

2. Broadcast monitoring. It allows content owners to automatically check, when, where and how long content broadcast via cable and satellite television.

3. Digital forensics. This is the process by which the watermarked container contains the recipient's identifier in order to trace the sources of illegal distribution.

4. Application in medicine. Application of reversible digital watermarks for medical image verification.

5. Electronic voting system. An electronic voting system is the process of accompanying elections by maintaining security during elections. Due to the widespread use of the Internet in any industry, such as banking, shopping, filing a tax return, a secure transaction is essential. Obviously, this is an alternative solution for holding elections, given the security of the election process. The most valuable solution to all these problems can be achieved by digital watermark embedding.

6. Distance education. Due to the unavailability of teachers and other problems, distance education is becoming an increasingly powerful method of providing education. Distance learning requires a strong demand for smart technology for the development of distance education. It uses a watermark to ensure the authenticity of data transmission in distance learning, as well as to protect multimedia content [10].

7. Chip and hardware protection: Mohanty et al. [12] introduced the role of watermarks in hardware protection. Intellectual Property (IP) core and hardware protection is a multi-faceted problem comprising of Trojan Security, buyer's ownership security, antipiracy protection. Digital watermarks can be embedded in a layered hardware design

abstraction based on the designer's choice.

8. Cloud data protection. Content-based image search is considered with the increasing number of images in daily life. Images take up more space than text files. Thus, cloud storage can be used to store images. Some sensitive images, such as medical and non-medical images, must be authenticated before being transferred to another location. Cloud server inserts a unique watermark into encrypted images before sending the images to the user. Upon detection of an illegal image, an unauthorized user can be found by the watermark extraction method [13].

Based on the analysis of the areas of application and criteria of the digital watermark, Table 1 presents the important characteristics of the digital watermark (Table 1).

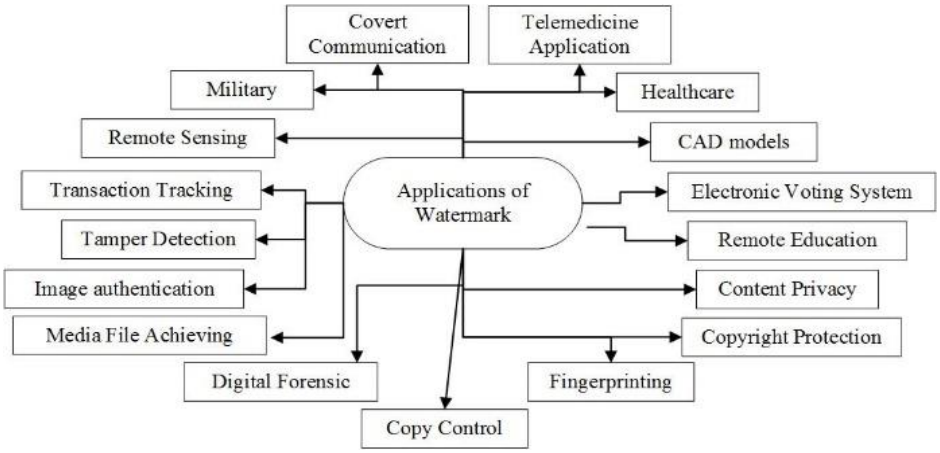


Fig. 4. Watermarking

Table 1 - **Specific uses of watermarks according to their characteristics**

Characteristics	**Definition**
Robustness	Ability of the algorithm to resist attacks
Imperceptibility	As a result of embedding a digital watermark, the image should have a minimum deviation from the original image
False positive digital watermark extracting	Error extracting digital watermark from empty container
Fragility	Digital watermark changes with the slightest modification of the container
Tamper resistance	Ability to resist deliberate attacks
Embedding capacity	Determined by the number of watermarks embedded in the data

Watermark attacks

Task of embedding and extracting information from the container is performed by the stegosystem, which consists of a stegosystem encoder and a stegosystem decoder. Encoder transforms the hidden message into a form suitable for embedding into the signal-container and embeds the hidden message into the signal-container taking into account the model. Decoder detects the presence of a hidden message in the container and, if present, retrieves and recovers the hidden message.

Steganography and cryptography are closely related, but these sciences have different approaches to information security. In particular, cryptography hides information by encryption operation, that is, it is known in advance that the cryptogram contains encrypted information. In turn, steganography hides the fact of the presence of secret information, so the filled container should not differ from the original one. Methods of cryptography and steganography can be combined to increase the security of information.

Stegosystem forms a stegochannel through which the filled container is transmitted. Violators may gain access to this channel. We will briefly describe the harm that violators can cause. For a secret message exchange, two addressees must have a secret key known to both, which determines the location of the hidden message. First of all, a violator can establish the presence of a stegochannel and read messages. Ability to read a message is determined by robustness of the hiding system used. Such type of violators is considered passive.

There is also an active violator who can delete or destroy hidden messages. Although the fact of the interference may be known, the goal of the violator - hacking the stegosystem - may be achieved. The most dangerous is a malicious violator who can substitute stego messages in addition to destroying. Violators use the following attacks to implement threats:

- Active attacks. In this type of attack, the hacker deliberately tries to remove the watermark or simply it undetectable. They are aimed at distorting the embedded watermark beyond recognition.

- Passive attacks. The hackers are trying to determine if there is a watermark, without any destruction or removal. These types of attacks are important in covert communication.

- Counterfeiting attacks. The hackers do not remove the watermark but insert a new valid watermark.

- Collusion attacks. This attack is no different from active attacks. The hacker uses several copies of the same information, each with a different mark, to create a copy from a copy without digital watermark.

- Simple attacks. Another name for this attack is waveform attack and noise attack. These are called simple attacks because the violator tries to harm the embedded watermark by modifying the entire watermark. Examples of these attacks are filtering, noise addition, signal-based compression (JPEG, MPEG), and gamma correction.

- Ambiguity attack. These attacks try to obfuscate by creating fake watermarked data or fake original data. The inversion attack is an example of this type of attack.

- Cryptographic attacks. The main purpose of this attack is to break the security method in watermarking techniques and find a way to remove the inserted watermark information. Due to the high computational cost, the use of these attacks is limited.

- Removal attack. Complete removal of watermark data from information in the container without violating the security of the watermark.

- Geometrical attack. Compared to the removal attacks, these attacks do not actually remove inserted watermark, but change the synchronization of the watermark detector with the inserted information.

Analysis of modern methods of digital watermarking

The analysis performed makes it possible to identify various reliable watermarking approaches to protect confidential information in different areas.

A reliable color image watermarking technique using decision tree induction in the DCT domain has been developed [14]. The method firstly uses DCT to transform the container and watermark image and uses the decision tree induction method to hide the secret watermark.

Paper [15] presents a robust multi-bit image watermarking scheme to render conventional image processing attacks ineffective as well as affine distortion. This scheme combines contrast modulation and efficient synchronization for large payloads and high robustness. The effectiveness and advantages of the proposed scheme are confirmed by experimental results that show superior performance compared to several modern watermarking methods.

The authors have developed a watermarking algorithm using SVD and a genetic algorithm [4, 16]. The method uses a singular vector to insert watermark into the container. In addition, the GA technique is used to improve the efficiency of the proposed scheme.

Wavelet-based watermarking is presented in [17]. The method uses a scale factor to modify a single vector of the container image and watermark. In addition, Multi-Purpose Particle Swarm Optimization (MOPSO) is applied to optimize the balance between conflicting watermarking factors.

The authors developed a watermarking scheme using association rules and vector quantization. First, rules are defined on both 2D barcode and watermark information. In the process of embedding, the defined rules of information about the watermark are embedded into the association rules of information about the container barcode. The results showed that the scheme is safe and has remarkable inlineability [18].

Reversible high capacity watermarking technique using a rhombus pattern, sorting, and histogram shift method was proposed in [19]. First, the container is split into two different datasets and the payload information is embedded in both datasets. The proposed method is reliable and invisible for various attacks.

In [20], the authors developed a pixel-based approach to data hiding. The method uses noise in the image to hide the watermark data. Look-up tables are used to quickly recover hidden watermarks.

In [21], the author proposed a perturbed method for authenticating secret data in the original data and reversing the perturbed data back to the original data. The method uses an adjustable weighting mechanism to estimate the degree of error in the input data. The demonstrated results clearly show that the method is reliable and safe with a large payload volume.

The author developed a robust watermark based on DWT, all phases of the discrete cosine orthogonal transform (APDCBT) and SVD [22]. The container image is transformed by DWT, and two similar watermarks are embedded to the selected areas. Due to the excellent energy concentration, the author applies APDCBT to provide better protection of classified data (watermarks). In addition, imperceptibility is improved by using constant energy ratios.

Fig. 5 shows various effective schemes / solutions to improve robustness of watermarking techniques.

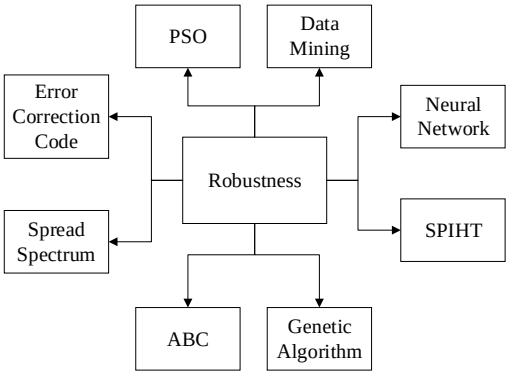


Fig. 5. Identified methods used to increase robustness of watermarking

After analysing the current state of research on watermark methods and significant watermark characteristics, it is possible to form the following assessment of watermark method 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 $R, R \in [0,1]$ – a security assessment of the method for digital watermark embedding;

$RS, RS \in [0,1]$ – an assessment of digital watermark invisibility on an image;

$ER, ER \in [0,1]$ – the probability of an error of the first and second kind;

$SC, SC \in [0,1]$ – an assessment of digital watermark fragility;

DT – is the number of embedded digital watermarks;

$\alpha_r, \alpha_{sr}, \alpha_{er}, \alpha_{sc}, \alpha_{dt}$ – significance coefficients of the corresponding criteria of the digital watermark method.

Such coefficients are needed, since there is no universal method for digital watermark embedding, therefore, due to such coefficients, it is possible to adjust the significance of each criteria and thereby influence the final method efficiency for a specific task facing a digital watermark.

As an example, we describe the effectiveness criteria of the digital watermark method for images.

Robustness of the method for digital watermarking can be clarified in a statistical sense by accepting the following assumptions:

The digital watermark method W can be defined as a set of some functions F and G that describe the process of embedding and extracting a digital watermark on a multiple data, such that each element is a pattern required for the digital watermark method:

$$E = (E_i, i = 1, 2, ..., N). \quad (2)$$

For simplicity, we will assume that the input data set includes a pair of values for a container image Im and a digital watermark Wm:

$$E_i = \{\mathrm{Im}_i, Wm_i\}. \quad (3)$$

The method has two stages, embedding $F(E_i) = \mathrm{Im}_i^*$ and extracting $G(\mathrm{Im}_i^*) = Wm_i$. Since robustness is the algorithm ability to resist attacks, we add an attack function $At_j \in At$, where At is the set of admissible attacks on the digital watermark.

$$At = (At_j,\ j = 1, 2, ..., M). \quad (4)$$

Using the function $At_j(\mathrm{Im}_i^*) = \mathrm{Im}_i^{*\prime}$ will distort the digital watermark container. Then, for some values of E_i the obtained value from $G(\mathrm{Im}_i^{*\prime})$ may be within acceptable limits Δi:

$$\left| G(\mathrm{Im}_i^{*\prime}) - G(\mathrm{Im}_i^*) \right| \le_{\Delta} i. \quad (5)$$

For all other E_i, that form subset of $E_l \in E$, execution of $G(\mathrm{Im}_i^{*\prime})$ does not provide an acceptable result, that is:

$$\left| G(\mathrm{Im}_i^{*\prime}) - G(\mathrm{Im}_i^*) \right| >_{\Delta} i. \quad (6)$$

All such cases are called false.

Each value of E_i represents a possible combination of values that can be input to functions F and G. Number N of possible E is very large, but finite. Combination of actions,

$$F \to \forall At_j, At_j \in At \to G, \quad (7)$$

that results in correct reading of the digital watermark from the container or a false positive.

Thus, the probability P that, after an attack on the container with digital watermark $At_j(\mathrm{Im}_i^*) = \mathrm{Im}_i^{*\prime}$ removing the digital watermark from the container will lead to an erroneous result (6) is equal to the probability that the set of input data E_i used in the j attack belongs to the set E_l. Suppose that $n_{l,j}$ is the number of different input data sets contained in E_l for the j attack, then $Q_j = n_{l,j} / N$ is a probability that the execution of the sequence of functions (7) on the data set E_i, randomly selected from E among the equally probable, will result in false digital watermark extraction. In this case, $P_j = 1 - Q_j = 1 - n_{l,j} / N$ is the probability that in the j attack on the input set E_i, randomly selected from E will lead to the correct digital watermark extraction, equation (5). Since various attacks are independent events, the probability that all attacks will not lead to false extraction of the digital watermark, equation (6), is equal to the product probability of each attack:

$$R = \prod_1^j P_j. \quad (8)$$

Robustness of the digital watermark method will be assessed by this product probability.

To assess imperceptibility, it is possible to use various metrics to estimate the difference between two images, such as the signal-to-noise metric. But such a metric will be of a higher order than all other terms, which can lead to a false assessment of the method effectiveness. Therefore, the following metric was proposed for assessing imperceptibility:

$$\begin{gathered}
SR = \frac{h_x + h_y}{2}; \\
h_x = \frac{1}{Wh} \times \\
\times \sum_{i=1}^{Wh-1} \left[\frac{1}{\sigma_x^{i-1} \bullet \sigma_x^{i-1}} \cdot \sum_{j=0}^{Ht-1} (Di_{i-1,j} - m_x^{i-1}) \times (Di_{i,j} - m_x^i) \right]^2; \\
h_y = \frac{1}{Ht} \times \\
\times \sum_{i=1}^{Ht-1} \left[\frac{1}{\sigma_x^{i-1} \bullet \sigma_x^{i-1}} \bullet \sum_{j=0}^{Wh-1} (Di_{i,j-1} - m_y^{i-1}) \times (Di_{i,j} - m_y^i) \right]^2; \\
Di_{x,y} = \left| Y(Pixel'_{x,y}) - Y(Pixel_{x,y}) \right|; \\
m_x^i = \frac{1}{Ht} \bullet \sum_{i=0}^{Ht-1} Di_{i,j}; \\
m_y^i = \frac{1}{Wh} \bullet \sum_{i=0}^{Wh-1} Di_{i,j}; \\
\sigma_x^i = \sqrt{\sum_{i=0}^{Ht-1} (Di_{i,j} - m_x^i)^2}; \\
\sigma_y^i = \sqrt{\sum_{i=0}^{Wh-1} (Di_{i,j} - m_y^i)^2},
\end{gathered} \quad (9)$$

where SR - an indicator for estimating the changes made when embedding digital watermark distortions;

h_x, h_y - average value of the square of linear correlation coefficient of the changes made when embedding digital watermark image distortions vertically and horizontally, respectively;

m_x^i, m_y^i - mathematical expectation of the distortion amount in corresponding column or row of the pixel matrix;

σ_x^i, σ_y^i - standard deviation of the distortion amount in corresponding column or row of the pixel matrix;

$Di_{x,y}$ - amount of brightness distortion in the corresponding pixel;

Wh - image width in pixels;

Ht - image height in pixels;

$Pixel'$ - pixel matrix of the watermarked image;

$Pixel$ - pixel matrix of the original image;

Y - pixel brightness determination operator;

ER - sum of errors of first and second kind when digital watermark extracting from the container.

To assess the fragility of a digital watermark, the following equations will be used.

Suppose that there is some distortion function

$$H(k, imige),$$

where k is the number of distortion pixels, and $imige$ - is an image with an embedded digital watermark. Then the fragility estimate will be as follows:

$$\begin{gathered} F(E_i) = \mathrm{Im}_i^*; G(\mathrm{Im}_i^*) = Wm_i; H(k, \mathrm{Im}_i^*) = \mathrm{Im}_i'^* \\ G(\mathrm{Im}_i'^*) = Wm_i'; \quad SC = count / (W \bullet H); \\ count = \sum_{x=0}^{W} \sum_{y=0}^{H} \begin{cases} 1, if\ Wm_{i[x,y]}' \neq Wm_{i[x,y]}; \\ 0, if\ Wm_{i[x,y]}' = Wm_{i[x,y]}, \end{cases} \end{gathered} \quad (10)$$

where $count$ - number of digital watermark pixels that do not match the original digital watermark after distorting the k pixels of the digital watermark container. W, H - image width and height in pixels.

Conclusion

This paper discusses various robust and invisible watermarking methods in the spatial domain and the transform domain. The basic concepts of digital watermarks, important characteristics and areas of application of watermarks are considered in detail.

The paper also presents the most important criteria for assessing the digital watermark effectiveness. Based on the analysis of the current state of the digital watermarking methods, robustness, imperceptibility, security and payload have been determined as the main factors in most scientific works. Moreover, researchers use different methods to improve / balance these factors to create an effective watermarking system. Our research identified the main factors and new techniques used in modern research. And the assessment of watermark method effectiveness was proposed.

References

1. Merlac, V., Smatkov, S., Kuchuk, N. and Nechausov, A. (2018), "Resourses Distribution Method of University e-learning on the Hypercovergent platform", *Conf. Proc. of 2018 IEEE 9th Int. Conf. on Dependable Systems, Service and Technologies*, DESSERT'2018, Kyiv, May 24-27, 2018, pp. 136-140, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/DESSERT.2018.8409114.
2. Van Schyndel, R. G., Tirkel, A. Z. and Osborne, C. F. (1994), "A digital watermark //Proceedings of 1st international conference on image processing" *IEEE*, Vol. 2, pp. 86-90.
3. Islam, M. and Laskar, R. H. (2018), "Geometric distortion correction based robust watermarking scheme in LWT-SVD domain with digital watermark extraction using SVM", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 11, pp. 14407-14434.
4. Loukhaoukha, K. (2012), "On the security of digital watermarking scheme based on SVD and tiny-GA", *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, Vol. 3, no 2. – C. 135-141.
5. Singh, A.K. (2017), "Improved Hybrid Algorithm for Robust and Imperceptible Multiple Watermarking using Digital Images", *Multimedia Tools Applications*, Springer, Vol. 76(6), pp. 881–890.
6. Ruban, I., Bolohova, N., Martovytskyi, V., Lukova-Chuiko, N. and Lebediev, V. (2020), "Method of sustainable detection of augmented reality markers by changing deconvolution", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, Vol. 9(2), pp. 1113-1120.
7. Mun, S. M. (2019), "Finding robust domain from attacks: A learning framework for blind watermarking", Neurocomputing, Vol. 337, pp. 191-202.
8. Roy, A., Maiti, A. K. and Ghosh, K. (2018), "An HVS inspired robust non-blind watermarking scheme in YCbCr color space", *International Journal of Image and Graphics*, Vol. 18, no. 03, DOI: https://doi.org/10.1142/S0219467818500158.
9. Vaidya, P. and PVSSR, C. M. (2017), "A robust semi-blind watermarking for color images based on multiple decompositions", *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 76, no. 24, pp. 256.23-256.56.
10. Ruban, I., Khudov, H., Makoveychuk, O., Khudov, V. and Lishchenko, V. (2020), "The Model and the Method for Forming a Mosaic Sustainable Marker of Augmented Reality", *Proceedings - 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering*, TCSET, pp. 402-406.
11. Singh, A.K., Kumar, B., Singh, G. and Mohan, A (2017), *Medical image watermarking: techniques and applications*, Book series on Multimedia Systems and Applications, Springer, ISBN: 978-3319576985.
12. Mohanty, S.P., Sengupta, A., Guturu, P. and Kougianos, E. (2017), "Everything you want to know about watermarking: From Paper marks to hardware protection", *IEEE Consumer Electronics Magazine*, Vol. 6(3), pp. 83–91.
13. Kuchuk, H., Kovalenko, A., Ibrahim, B.F. and Ruban, I. (2019), "Adaptive compression method for video information", *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, pp. 66-69, DOI: http://dx.doi.org/10.30534/ijatcse/2019/1181.22019.
14. Moosazadeh, M. and Ekbatanifard, G. (2016), "Robust image watermarking algorithm using DCT coefficients relation in YCoCg-R color space", *2016 Eighth Int. Conference on Information and Knowledge Technology* (IKT), IEEE, pp. 263-267.
15. Zhong, X. and Shih, F. Y. (2019), "Robust Multibit Image Watermarking Based on Contrast Modulation and Affine Rectification", *Int. J. of Pattern Recognition and Artificial Int.*, Vol. 33, no. 14. https://doi.org/10.1142/S0218001419540363.

16. Paikaray, D. and Mustafi, A. (2020), “Genetic Algorithm-Based Image Watermarking Using Multiple Location”, Proc. of the Fourth Int. Conference on Microelectronics, *Computing and Communication Systems*, Springer, Singapore, pp. 617-627.
17. Loukhaoukha, K., Nabti, M. and Zebbiche, K. (2014), “A Robust SVD- based Image Watermarking Using a MultiObjective Particle Swarm Optimization”, *Opto-Electronics Review*, Vol. 22(1), pp. 45–54.
18. Shen, J.J. and Hsu, P.W. (2008), “A Fragile Associative Watermarking on 2D Barcode for Data Authentication”, *International Journal of Network Security*, Vol. 7(3), pp. 301–309.
19. Sachnev, V., Kim, H.J., Nam, J., Suresh, S. and Shi, Y.Q. (2009), “Reversible Watermarking Algorithm Using Sorting and Prediction”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 19(7), pp. 989–999.
20. Pei, S.C. and Guo, J.M. (2003), “Hybrid Pixel-Based Data Hiding and Block-Based Watermarking for Error-Diffused Halftone Images”, *IEEE transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, Vol. 13(8), pp. 867–884.
21. Lin, CY (2006), “A Reversible Data Transform Algorithm Using Integer Transform for Privacy Preserving Data Mining”, *The Journal of Systems & Software*, Vol. 117(7), pp. 104–112.
22. Zhou, X., Zhang, H. and Wang, C (2018), “A Robust Image Watermarking Technique Based on DWT, APDCBT, and SVD”, *Symmetry MDPI*, Vol. 10(3), pp. 1–15.

Received (Надійшла) 28.05.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

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 RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: ihor.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, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: nataliia.bolohova@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0001-8927-0055.

Мартовицький Віталій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри ЕОМ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Vitalii Martovytskyi – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of Computer Science departments, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: vitalii.martovytskyi@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-2349-0578.

Ярошевич Роман Олександрович – асистент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Roman Yaroshevych – assistant, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: roman.yaroshevych@nure.ua; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-7949-1513.

Методологія оцінки ефективності методів вбудови цифрових водяних знаків

І. В. Рубан, Н. М. Бологова, В. О. Мартовицький, Р. О. Ярошевич

Анотація. В останні роки ми спостерігаємо значне збільшення трафіку, що рухається через різні мережі та канали. Розвиток технологій та глобальної мережі призводить до збільшення обсягу мультимедійного трафіку. Для автентифікації та уникнення зловживань дані повинні бути захищені водяними знаками. У даній роботі розглянуто різні надійні та непомітні методи водяних знаків у просторовій області та області перетворень. Детально розглянуті основні поняття цифрових водяних знаків, важливі характеристики та сфери застосування водяних знаків.Також в роботі представлені найважливіші параметри, для оцінки ефективності ЦВЗ. На основі аналізу сучасного стану методів вбудови ЦВЗ визначили стійкість, непомітність, безпеку та корисне навантаження - основними факторами більшості наукових робіт. Крім того, дослідники використовують різні методи для вдосконалення / збалансування цих параметрів для створення ефективної системи водяних знаків. Наше дослідження визначило основні фактори та нові методики, що використовуються в сучасних дослідженнях. Було запропоновано оцінку ефективності методів вбудови ЦВЗ.

Ключові слова: цифровий водяний знак; автентифікація; LSB; захист авторських прав; цифрові зображення; стеганографія; кібербезпека.

Методология оценки эффективности методов встраивания цифровой водяной знак

И. В. Рубан, Н. Н. Бологова, В. А. Мартовицкий, Р. О. Ярошевич

Аннотация. В последние годы мы наблюдаем значительное увеличение трафика, который проходит через различные сети и каналы. Развитие технологий и глобальной сети приводит к увеличению объема мультимедийного трафика. Для аутентификации и избежания злоупотреблений данные должны быть защищены водяными знаками. В данной работе рассмотрены различные надежные и незаметны методы водяных знаков в пространственной области и области преобразований. Подробно рассмотрены основные понятия цифровых водяных знаков, важные характеристики и сферы применения водяных знаков. Также в работе представлены важнейшие параметры для оценки эффективности ЦВЗ. На основе анализа современного состояния методов встраивания ЦВЗ определили устойчивость, незаметность, безопасность и полезная нагрузка - основными факторами большинстве научных работ. Кроме того, исследователи используют разные методы для совершенствования / сбалансирования этих параметров для создания эффективной системы водяных знаков. Наше исследование определило основные факторы и новые методики, используемые в современных исследованиях. Было предложено оценку эффективности методов встраивания ЦВЗ.

Ключевые слова: цифровой водяной знак; аутентификация; LSB; защита авторских прав; цифровое изображение; стеганография; кибербезопасность.

UDC 004.9 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.16

Serhii Semenov[1], Cao Weilin [2], Zhang Liqiang [2], Serhii Bulba[1]

[1] National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine
[2] Neijiang Normal University, Neijiang, China

AUTOMATED PENETRATION TESTING METHOD USING DEEP MACHINE LEARNING TECHNOLOGY

Abstract. The article developed a method for automated penetration testing using deep machine learning technology. The main purpose of the development is to improve the security of computer systems. To achieve this goal, the analysis of existing penetration testing methods was carried out and their main disadvantages were identified. They are mainly related to the subjectivity of assessments in the case of manual testing. In cases of automated testing, most authors confirm the fact that there is no unified effective solution for the procedures used. This contradiction is resolved using intelligent methods of analysis. It is proposed that the developed method be based on deep reinforcement learning technology. To achieve the main goal, a study was carried out of the Shadov system's ability to collect factual data for designing attack trees, as well as the Mulval platform for generating attack trees. A method for forming a matrix of cyber intrusions using the Mulval tool has been developed. The Deep Q - Lerning Network method has been improved for analyzing the cyber intrusion matrix and finding the optimal attack trajectory. In the study, according to the deep reinforcement learning method, the reward scores assigned to each node, according to the CVSS rating, were used. This made it possible to shrink the attack trees and identify an attack with a greater likelihood of occurring. A comparative study of the automated penetration testing method was carried out. The practical possibility of using the developed method to improve the security of a computer system has been revealed.

Keywords: machine learning; software security; automated penetration testing.

Introduction

Using computer systems in almost all in all areas in social life and the increase in the number of information security incidents have updated the problem of data and software protection. One of the ways to improve cybersecurity is through the use of penetration testing methods and tools. This applies both to the areas of real production and practical services, and to the area of software development.

Until recently, penetration testing was done manually. At the same time, first of all, based on their own experience and erudition, the testers needed to analyze the computer system to detect vulnerabilities. Only then can you enter the system and compromise the software. This is a rather laborious task, on the one hand, it requires a large amount of tester knowledge, and on the other hand, it has many risks of a subjective nature. Therefore, more and more organizations have recently been using penetration attack planner options based on automated targeting system models. So, for example, the company Core Security using this idea since 2010 in its tool Core IMPACT uses the attack planner MetricFF [1]. In addition, Core Security began the practice of implementing certain ethical cyberattacks in accordance with the known exploits of software vulnerabilities [2]. However, no uniform solution has been obtained for penetration testing procedures.

One of the ways to solve this contradiction is to use attack tree methods. These methods are based on the provisions of the theory of graphs by Bruce Schneier [3], which introduced the informal concept of attack trees to systematize and categorize various attack scenarios on computer systems.

By analyzing the attack tree, penetration testers can visualize and understand the interaction between attack patterns. For example, the paper [4] proposes a graph-based approach for modeling and detecting attacks. At the same time, transitions from state to state along the extended attack tree are characterized by the attributes of the TTL lifetime and the degree of PC confidence. The first attribute reflects the temporal dependencies between the stages of the attack and helps to reduce the number of false positives of the cyber intrusion detection system. The second one characterizes the probability of achieving the goal with the achieved sub-goals. It should be noted that such a prototype of ethical cyber intrusions illustrates attack scenarios, but does not reduce the number of false positives. In [5] A formal definition of information attack trees is given [6] using disjunctive Petri nets. In this model, places correspond to attacks, and transitions often express logical dependencies, thereby simulating the actions of intruders, which extends this model compared to Schneier's attack trees.

The studies carried out have shown that simultaneously with the study of models and methods for synthesizing attack trees, it is advisable to analyze them. This is a prerequisite for optimizing and reducing their visual complexity. The result of the analysis is determined by the purpose of the attack graph. For penetration testing examples, such analysis should find the most likely attack scenarios for the attacker.

Among the many methods for analyzing attack graphs, the following can be distinguished. The authors of paper [7] define the shortest paths to goals using Dijkstra's algorithm. The set of least cost paths is also computed by the Naor-Brutlag algorithm. It is shown the problem of determining numerous effective protection measures (by cost) is NP-hard. The following interactive technique is proposed: the administrator changes the network model in the configuration file in accordance with the adopted security measures, and then recalculates the shortest paths to see if these changes have increased the security level of the network or not. However, the authors of the article created a

© Semenov S., Cao Weilin, Zhang Liqiang, Bulba S., 2021

realistic-sized attack graph based on 10 or 20 patterns, and did not resolve all the problems associated with matching patterns with the attacker's configuration and profile. In addition, the presence of attack patterns and a configuration file can also be another vulnerability. If they fall into the wrong hands, they can be valuable tools for an attacker.

And in paper [8] the author conducts an analysis aimed at finding the minimum critical set of attacks - a set of attacks of the lowest power, the removal of which from the violator's arsenal will make it impossible for him to reach the goal. It is shown that the problem of finding such a set is NP-complete, and a "greedy" heuristic algorithm for solving it of complexity O (*mn*) is proposed, where m is the number of states and edges, n is the number of attacks. At the same time, as the authors themselves note, the presented development does not cover the entire variety of methods for analyzing and optimizing graphs, which presents an opportunity for researchers to further improve.

In [9], to solve the problem of analyzing an attack tree, the authors used the machine learning method. At the same time, *Q* was taken as a basis - training for finding the trajectory of attacks. However, the insignificance of the action space and the sample space reduced the practical value of this development. According to several authors [10], deep reinforcement learning is a useful advancement in attack tree analysis for penetration testing. For example, in paper [11], the task of analyzing and optimizing the attack graph using this intelligent technology is performed. At the same time, the width of the spectrum of possible vulnerabilities, as well as the shortcomings of penetration testing automation methods to ensure the security of computer systems

The aim of the work is an automated penetration testing method using deep machine learning technology. For this, it is necessary to solve a number of particular scientific problems:

1) Explore the factual data collection capabilities of the Shadov system for the design of attack trees, as well as the Mulval platform for generating attack trees.

2) Develop a method for forming a matrix of cyber intrusions using the Mulval tool.

3) Improve the Deep *Q* - Lerning Network method for analyzing cyber intrusion matrices and finding the optimal attack trajectory.

4) Conduct a comparative study of the automated penetration testing method.

The general structure of the method can be represented as a set of methods and tools in Fig. 1. As shown in Figure 1, the structure of the method implies the presence of three components: a set of technologies and means of forming an attack matrix; deep reinforcement learning for processing attack matrix data; tools, platforms and penetration testing tools.

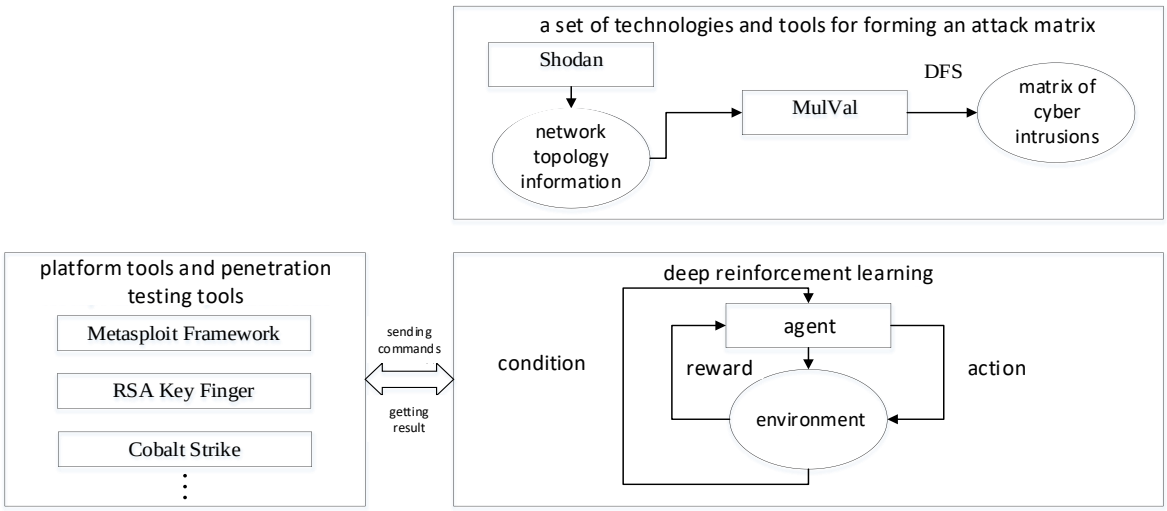


Fig. 1. General structure of the automated penetration testing method

1. Investigation of the capabilities of the Shadov and Mulval platform

It is known that the Shodan system is designed to work with shadow Internet channels. The system is not looking for web resources with content, but physical devices connected to the Internet. These can be printers, webcams, routers, GPS navigators, and even commercial maintenance systems. The basic principle of Shodan is to send requests to all publicly available IP addresses and log their responses. Algorithm for scanning this system:

1) generating a random IP address;

2) selection of a random port number from the list of ports available in Shodan;

3) checking the selected IP-address (port) and getting a banner;

4) repeating step 1.

Thus, the system scans the entire address space at random to ensure even coverage of the Internet and prevent data from shifting at any time. Shodan also supports searching for information about software vulnerabilities [12].

The system also allows you to select several criteria for searching and filtering data to monitor the current state of the IS. The main Shodan filters are: City / country (filtering devices located within the specified city / country, for example city: minsk); Port (output devices with a given open port, for example port: 443);

OS (filtering devices that run on a given operating system, for example os: linux); Geo (exact indication of the coordinates of the device location (longitude, latitude), for example geo: 42.9693,74.1224); Net (search for devices from a given range of IP addresses, for example net: 216.0.0.0/16) [12].

Mulval is a widely used network security analysis tool that uses a vulnerability scanner to find network vulnerabilities and then generates attack graphs for security analysis [6]. The block diagram of the framework is shown in Fig. 2.

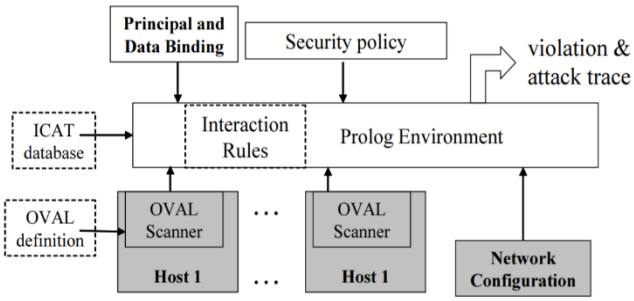


Fig. 2. Block diagram of Mulval framework

2. Development of a method for forming a matrix using the Mulval tool

2.1. A method of forming an attack tree. Having received an informal concept in 1999 in the work of Bruce Schneiter, attack trees, as a methodology for describing security threats, are now widespread. The attack tree is characterized as follows: the root of the tree corresponds to the intruder's goal, and the vertices correspond to the intruder's actions to achieve the goal. Actions are combined using logical AND and OR. Vertices and edges can be assigned different numbers, all values that characterize the probability of success, complexity, cost of the offender's actions. In Fig. 3 shows a graph and a textual representation of each of the possible types of nodes, AND and OR.

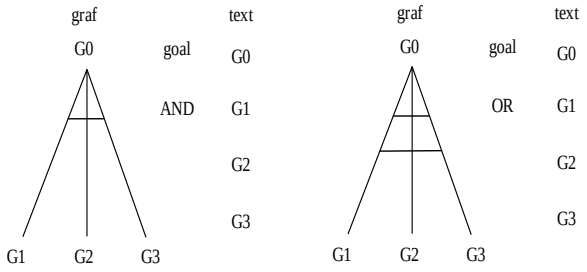


Fig. 3. Graph and text representation of each of the possible node types, AND and OR

Considering the above facts, it should be noted that the first stage - modeling of the attack tree, is very important for the formation of training data. This data, in turn, is extremely important for use in deep learning algorithms. For the formation of input data in the work, it is proposed to perform the following relevant stages.

1) Gathering network information to simulate a network environment using Shodan.

2) Generation of an attack tree corresponding to this network environment using the Mulval platform.

3) Data preprocessing (formation of a matrix of attacks) to adapt to the requirements of deep learning algorithms.

The first step is to generate the necessary practical query in the Shodan system, such as a query for information on real Web servers. An example of data collected through Shodan (excluding IP addresses) is shown in Fig. 4. Based on the data obtained, a profile file is created with the necessary information about the network node. An example of a web server profile is shown in Table 1.

"info": "(CentOS)",
"ip_str": 192.168.1.1,
"isp": HiNet,
"os": null,
"port": 443,
"product": "Apache httpd",
"transport": "tcp",
"version": "2.2.15",
"vulns": {
"CVE-2010-1452",
…
}

Fig. 4. Sample data collected via Shodan

Table 1 – **Example of a web server profile**

Product	Port	Protocol	Vulnerability	OS
Apache	80	https	CVE-2010-1452	CentOS
Nginx	8080	https	CVE-2011-0419	Ubuntu
mt-daapd DAAP	3689	tcp	CVE-2017-9617	FreeBSD

In addition to the dataset presented in Table 1, a vulnerability file is also generated. The data includes:

- identifier number of vulnerabilities CVE, Microsoft, etc.
- component of the basic scoring type
- exploitablityScore fitness score component

Table 2 provides an example of a vulnerability dataset. At the second step of generating the attack tree, it is proposed to use the well-known Mulval platform. The Mulval model is based on logic programming and is described using the DataLog language, which is a dialect and a subset of the Prolog language.

This language is implemented by the IDE XSB. When generating on the basis of Mulval, the following types of objects-vertices of the attack graph are distinguished - inference vertices (inference rule) and fact vertices (rules are predicates that determine the values and type of action prototype). The semantic meaning of the scenario stage lies in the logical following "Conjunct → Fact", which allows you to determine when the selected predicate has the value "true". A conjunct is a logical conclusion.

An example of generating an attack tree using the Mulval tool is shown in Fig. 5.

2.2. Algorithm for transforming an attack tree into a cyber intrusion matrix. The next component of the automated penetration testing method being developed is an algorithm for transforming an attack tree into a cyber intrusion matrix. For the research, the algorithm for transforming the attack tree into the corresponding matrix, developed by the authors [10], was chosen as a prototype. The study of the method carried out on the basis of [10] made it possible to make a choice about the limitations of its use for penetration testing. This is largely due to authors's neglect of inputs such as "file access", "command execution", and focusing only on vulnerabilities.

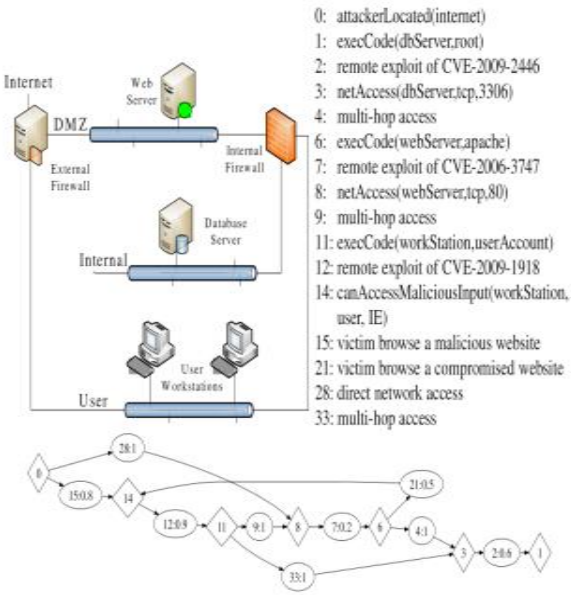


Fig. 5. An example of an attack graph scenario developed using the Mulval tool

Below is a description of the improved algorithm for transforming attack trees into a cyber intrusion matrix. At the first step of the algorithm, all nodes in the attack tree are matched into a matrix form.

At the second step, the complex compares quantitative scoring of security vulnerabilities to the baseline scoring of the corresponding nodes. The baseline score is calculated in accordance with the CVSS (Common Vulnerability Scoring System) structure. According to [13], the scores are calculated using special formulas based on metrics and characterize the ease of deployment of an exploit and its impact on a computer system. As an improvement, it is proposed to superimpose on the base CVSS score some predefined exploitability score, (for example, "file access") in accordance with the expression:

$$ovsc = bsc \times \frac{expsc}{5}, \qquad (1)$$

where $ovsc$ – overall security vulnerability scoring, bsc – baseline security vulnerability scoring, $expsc$ – serviceability scoring.

At this step, instead of embedding the cyber intrusion matrix directly into the deep machine learning algorithm, it is proposed to simplify this matrix using a modified DFS algorithm - Tarjan's algorithm [14]. This algorithm is primarily one of the options for depth-first search. In this case, the vertices are visited from roots to leaves, and the end of their processing is performed on the way back.

This simplification of the complete matrix allows you to select only those nodes that can be used to achieve the target of the attack.

At the end of the execution of the Taryan algorithm, the third step is to form a simplified cyber intrusion matrix, in which the following are written:

- score values for the start node in the first column;

- the values of the total scores characterizing the intermediate stages in the intermediate columns;

- the score values for the end node in the last column.

This data will be used as input to evaluate the reward in the deep machine learning algorithm.

2.3. Deep Reinforcement Learning to Determine the Optimal Attack Trajectory. In the developed method of automatic penetration testing, the method of deep reinforcement learning is used to determine the optimal attack trajectory through continuous learning.

The input data for the method is formed on the basis of a simplified cyber intrusion matrix, and the soft max function, a logistic function for the multidimensional case, will serve as the prototype of the activation function:

$$\nu(z)_i = e^{z_i} \Big/ \sum_{k=1}^{K} e^{z_k}, \qquad (2)$$

where K – is the number of classes.

During training, a deep reinforcement learning (DQL) model agent acts as an ethical hacker, while the targeted system is represented as a simplified cyber intrusion matrix. The agent moves from node to node in the developed matrix until it reaches the desired result - the "victim's server". The bonus factors used in the DQL modeling process correspond to the values of the vulnerability assessment based on the data of the Common Vulnerability Scoring System (CVSS) (1). In CVSS, a baseline assessment interprets the severity of the negative impacts of particular types of vulnerabilities, while an exploitability assessment captures the potential for exploitation of that particular vulnerability. To obtain the most appropriate result from a practical point of view, it is advisable to carry out mathematical weighting of these estimates by multiplying by the appropriate coefficients. The values of the coefficients are determined empirically, taking into account the opinion of experts in the field of cybersecurity.

2.4. Experimental studies of automated penetration testing method. To assess the performance and effectiveness of the developed method of automated software penetration testing, a series of experiments was carried out. In this case, the targeted system was presented in the form of a topological structure of a computer network in Fig. 6.

From the presented diagram, it can be seen that the targeted system is a collection of three different services, including a web server and mail server on one subnet, as well as a file server on another subnet. The client on the first subnet is controlled by Windows 2000, and the client on the second subnet is controlled by Internet Explorer. In the presented diagram, a workstation with Acrobat software is also connected to the same subnet with the file server.

As a means of protecting a computer network from cyber intrusions, a firewall is used in the scheme.

The rules for connecting to this tool are as follows.

1. The agent is located in the external network and has the ability to access the web server through the HTTP protocol and the corresponding HTTP port.

2. There is a dual connection between the web server and workstations on the network.

3. Web server and file server are connected via NFS protocol.

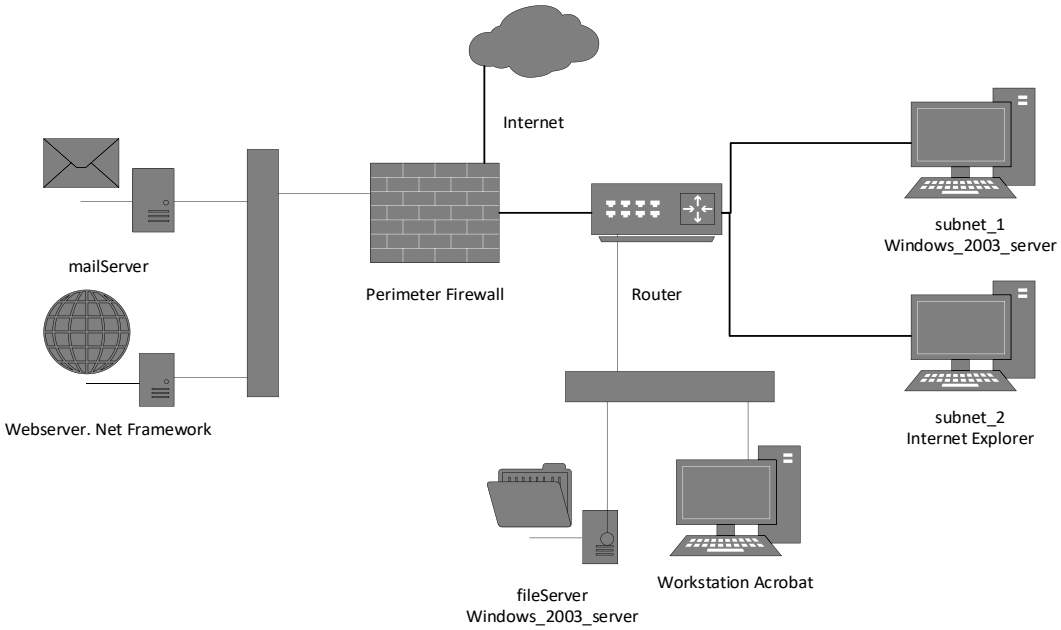


Fig. 6. Topological structure of the investigated computer network

4. The output of the file server of the first and second subnets to the external network is carried out using the HTTP protocol.

5. The file server and workstation are connected via the NFS protocol.

The studies show that this topology is characterized by several software vulnerabilities. For example, according to experts, one of the most dangerous web server vulnerabilities (CVE-2020-1198) is a buffer overflow vulnerability in the mod_uwsgi module. An attacker can cause a denial of service and execute arbitrary code.

Clients on the first subnet could be vulnerable to attack by an attacker due to the CVE -2016-0189 vulnerability in the known Vbscript.dll component. This vulnerability allows a hacker to expose arbitrary code. Clients of the second subnet are susceptible to remote code discovery attacks in the scripting engine supplied with the Internet Explorer browser (vulnerability CVE-2020-1380). The file server contains the CVE-2010-0492 vulnerability, which is associated with Windows 2003 SP 2. In this case, an attacker has the ability of implementation an attack bypassing the limitations of the original IPV4 address. Table 1 shows the indicated vulnerabilities of the system under study.

Table 1 – **Vulnerabilities of the studied system**

Hardware	List of vulnerabilities
Web server	CVE-2020-1198
First subnet	CVE -2016-0189
Second subnet	CVE-2020-1380
File-server	CVE- 2010-0492

Using the Mulval system, we will generate a graph of attacks on the studied computer system. Fig. 7 shows the generated attack graph. As shown Fig. 7 using Mulval, a graph scheme with three different types of vertices is formed. The vertices shown as rectangles characterize the configuration of the system. The diamond vertices represent potential privileges or access that an attacker could gain on the system. Elliptical nodes associate preconditions with postconditions.

The next step in the research was the procedure for simplifying the attack graph. Fig. 8 shows a refined attack graph using algorithms developed by the authors of the research [11].

The graph shown in Fig. 8 can be based on modeling using the method of deep reinforcement learning. In this figure, the location of the agent, vulnerabilities and targets of the attacker agent are represented as vertices, and each edge of the graph illustrates the capabilities of the agent and its actions. It is assumed that an attacker can move between nodes in any direction of the graph until he reaches one of the target states. It should be noted that in the developed automated penetration testing method, the general vulnerability rating system (CVSS) is also used to determine rewards in accordance with expression 1.

If a malicious agent exploits a vulnerability, then the overall score associated with that vulnerability will be considered a reward value. If the agent ultimately achieves the goal, then the reward will be considered the maximum. Additional looped edges are added to the vertices of the target with a reward of 100, since the agent who reaches the malicious target remains there forever. The rewarded DQL model is shown in Fig. 9. As an example, let us simulate a situation when a malicious agent is located at one of the points of a computer network. In Fig. 5. this point is denoted by node 12. This agent has the ability to move to other nodes (13, 21, 25 and 43), while each of his actions receives a bonus in accordance with the metrics of vulnerabilities.

Let the agent perform malicious actions starting from node 43. In this case, there are two options:

- go to node 34, which is the ultimate target of the cyberattack. In this case, the agent receives 100 points;
- return to the starting position and do not receive additional points.

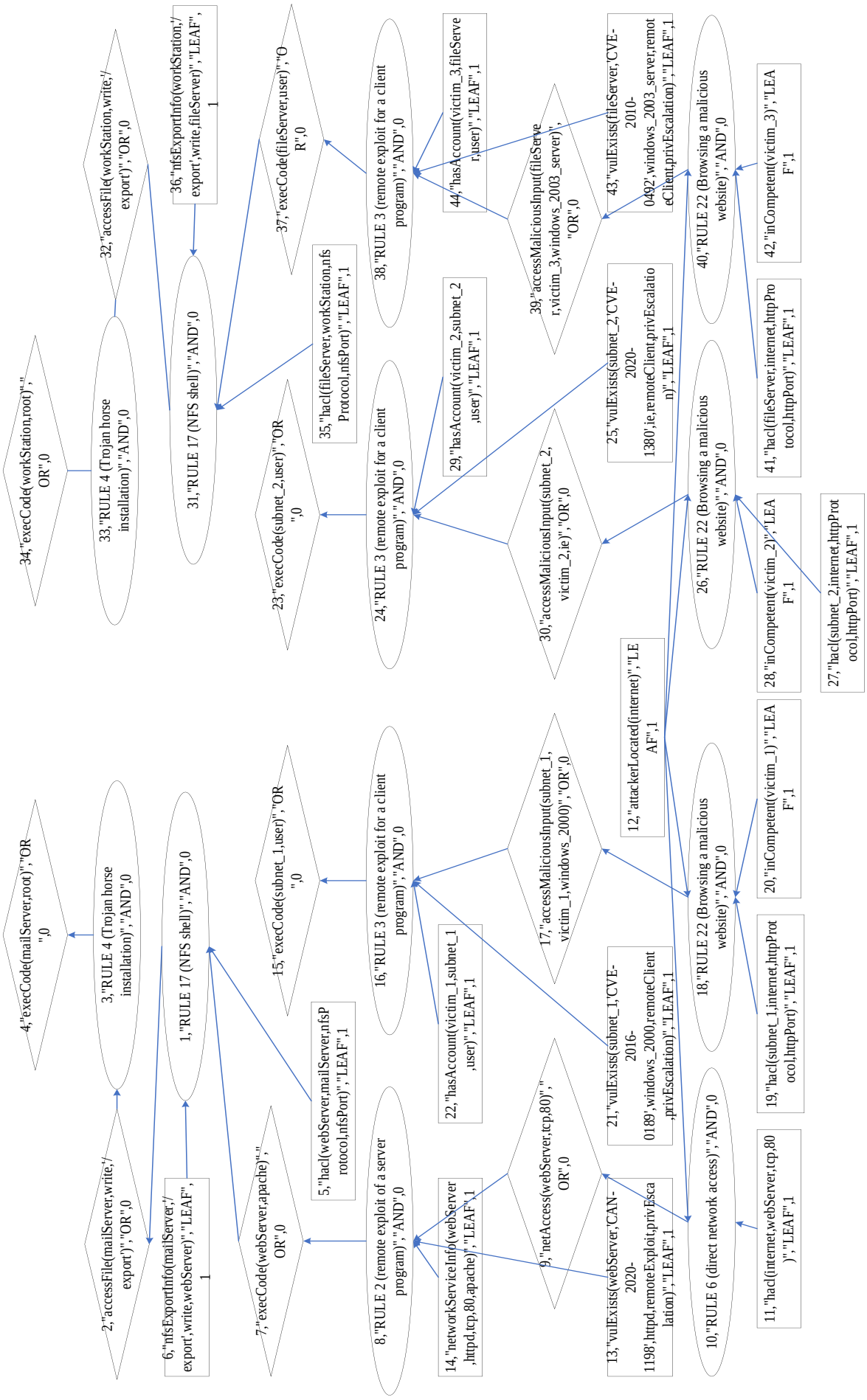


Fig. 7. Attack graph

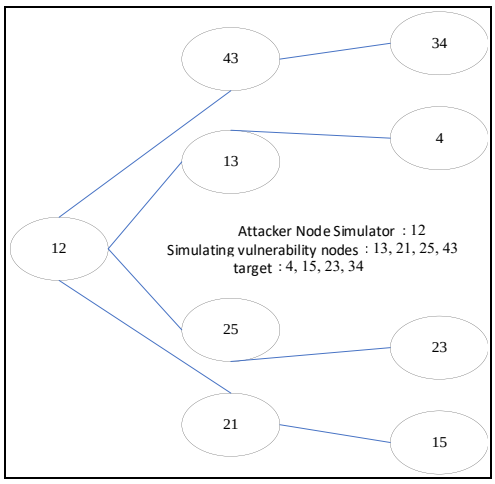


Fig. 8. Refined attack graph

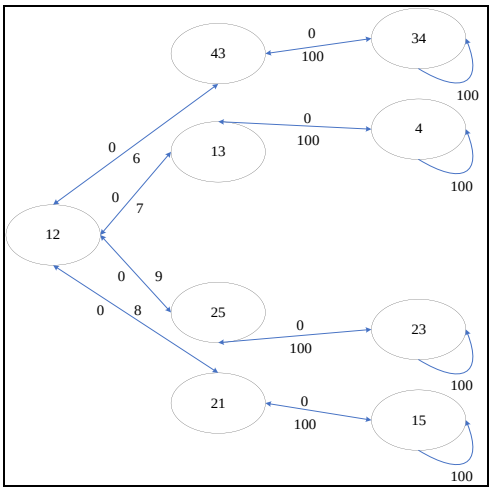


Fig. 9. Rewarded DQL Model

Let's form a generalized matrix of states in the form of a table 2. Table 2 rows represents the state of the system columns - actions. For example, matrix point 12, 43 illustrates the transition of an agent from node 12 to node 43, while receiving bonuses in the amount of 6 points. The algorithm for assessing the attacker's behavior is presented in the form of a flowchart in Fig. 10. It should be noted that the state matrix transition graph is used in this algorithm. For the purpose of practical implementation in accordance with the algorithm in Fig. 10 from the state matrix table 2 a submatrix of state clarifications and additional bonuses to the attacking agent is formed, which can be illustrated in the form of table 3.

Table 2 – **Generalized matrix of states**

	12	**13**	**21**	**25**	**43**	**4**	**15**	**23**	**34**
12	-1	7	8	9	6	-1	-1	-1	-1
13	0	-1	-1	-1	-1	100	-1	-1	-1
21	0	-1	-1	-1	-1	-1	100	-1	-1
25	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100	-1
43	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	100
4	-1	0	-1	-1	-1	100	-1	-1	-1
15	-1	-1	0	-1	-1	-1	100	-1	-1
23	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	100	-1
34	-1	-1	-1	-1	0	-1	-1	-1	100

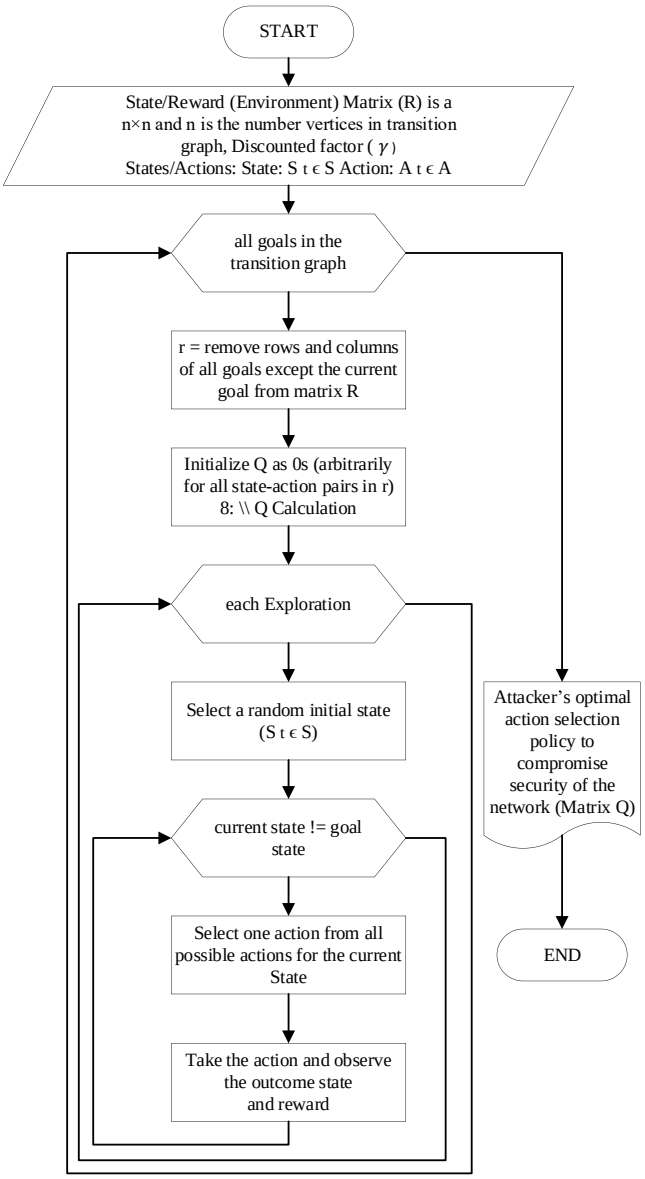


Fig. 10. Flowchart of an algorithm for assessing the behavior of an attacker

Table 3 – **Submatrix of state clarifications and additional bonuses to the attacking agent**

	12	**13**	**21**	**25**	**43**	**4**
12	-1	7	8	9	6	-1
13	0	-1	-1	-1	-1	100
21	0	-1	-1	-1	-1	-1
25	0	-1	-1	-1	-1	-1
43	0	-1	-1	-1	-1	-1
4	-1	0	-1	-1	-1	100

Using this matrix, we will form a diagram of the bonuses of the attacker agent for one of the stated goals. In fig. 11 illustrates a graph of bonuses to an agent when moving to target state 1. As shown in Fig. 11, the transition from state 12 to state 13 gives the maximum reward 408. The transition from state 13 to the state that characterizes the ultimate goal of the attacker is formalized by the maximum bonus 500. The transition 12, 13, 4 is preferable in terms of earned bonuses.

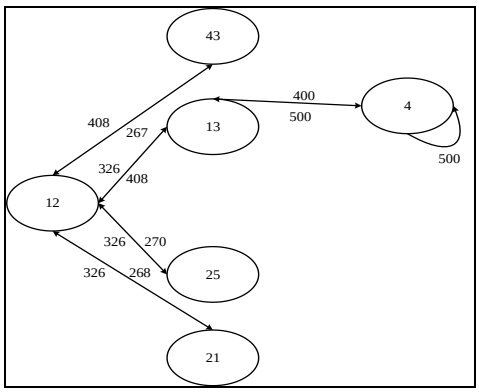


Fig. 11. The graph of bonuses to an agent upon transition to target state 1

A number of other practical examples of the results of using the developed automated penetration testing method for ethically compromising targets in a computer system are presented in Table 4. The presented table demonstrates the tester's capabilities in taking into account the maximum damage. This allows you to rank vulnerabilities in the system and eliminate them depending on their priority. Thereby it increases the efficiency of the testing process.

Table 4 – **Practical examples of the results of using the automated penetration testing method**

Attacker Node Simulator	Target	Maximum reward
12	4	908
12	15	907
12	23	906
12	34	906

To confirm the practical possibility of using the developed method of automated penetration testing, studies of the convergence of the model were carried out. This fact is clearly illustrated in Fig. 12. In fig. 12. shows a graph of the dependence of the reward for each iteration of the test performed on the number of iterations. In the experiment, 1000 iterations were considered. However, as you can see from the graph, it took 350 iterations to converge the model. The maximum reward in this example reaches 908.

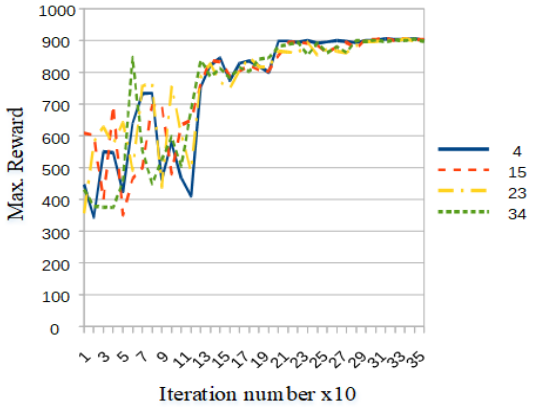


Fig. 12. Graph of the dependence of the reward for each iteration of the test performed on the number of iterations

Conclusions

A method for automatic penetration testing has been developed. A distinctive feature of the method is the integrated use of the Shodan search engine, the MulVal network security analysis platform, and software vulnerability data - CVE to obtain input data and build realistic attack scenarios and validation within the framework of deep reinforcement learning technology. This allowed generating an attack tree for various training procedures and optimizing the corresponding scripts for automated software security testing. In the study, according to the deep reinforcement learning method, the reward scores assigned to each node, according to the CVSS rating, were used. This made it possible to reduce the attack trees and identify the attack with a higher probability of occurrence. To assess the applicability of the method, an experiment was carried out and an attack tree was generated, and a testing and training scenario was also formed. The fact is confirmed that even with a small number of training scenarios, the simulation results reach 0.9 when determining the most rational attack path.

The developed method is an effective solution for software security analysis, since it allows the tester to choose a sound policy of ethical hacking and actions aimed at mitigating the negative factors of possible cyberattacks.

REFERENCES

1. Hoffmann, J. (2011), “The Metric-FF Planning System: Translating ”Ignoring Delete Lists” to Numeric State Variables”, *Journal of Artificial Intelligence Research*, vol. 20, pp. 291–341.
2. Obes, J. L., Sarraute, C. and Richarte, G. G. (1999), “Attack planning in the real world”, *Cryptography and Security*, 2013.
3. Schneier, B. (1999), “Attack trees - modeling security threats” , *Dr.Dobb’s Journal*, vol. 24.
4. Camtepe, S. and Yener, B. (1999), *A Formal Method for Attack Modeling and Detection*, URL: http://cs.rpi.edu/research/pdf.
5. McDermott, J.P. (2001), “Attack Net Penetration Testing”, *New Security Paradigms*, ACM Press, New York, pp. 15–21.
6. Ou, X., Govindavajhala, S. and Appel, A.W. (2005), “MulVAL: A logic-based network security analyzer”, 14th USENIX Security Symposium, Baltimore, MD, USA, URL: http://www.cis.ksu.Edu/~xou/publications/mulval_sec05.pdf.
7. Phillips, C. and Swiler, L. A (1998), “Graph-Based System for Network-Vulnerability Analysis”, *Proceedings of the New Security Paradigms Workshop*, Charlottesville, VA.
8. Sheyner, O. (2004), *Scenario Graphs and Attack Graphs*, Ph.D. diss., Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA.
9. Yousefi, M., Mtetwa, N., Zhang, Y. and Tianfield, H. (2018), “A reinforcement learning approach for attack graph analysis”, *12th IEEE Int. Conf. On Big Data Science And Engineering* (TrustCom/BigDataSE), pp. 212–217.
10. Zhenguo & Beuran, Hu, Razvan & Tan, Yasuo (2020), *Automated Penetration Testing Using Deep Reinforcement Learning*, pp. 2-10, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/EuroSPW51379.2020.00010.
11. Yousefi, Mehdi & Mtetwa, Nhamoinesu & Zhang, Yan & Tianfield, Hua (2017), “A novel approach for analysis of attack graph”, IEEE, DOI: http://dx.doi.org/10.1109/ISI.2017.8004866.
12. Sh. R. Davlatov, P. V. Kuchynski (2020) Extending the basic functionality of MALTEGO based on the canari framework and SHODAN search engine / Journal of the Belarusian state university. Physics. 2020;1:34–40

13. Madelyn, Bacon (2020), CVSS (Common Vulnerability Scoring System), URL: https://searchsecurity.techtarget.com/definition/CVSS-Common-Vulnerability-Scoring-System.
14. Riansanti, O., Ihsan, M. and Suhaimi, D. (2017), "Connectivity algorithm with depth first search (DFS) on simple graphs", *Journal of Physics*: Conf. Series, Vol. 948, ICE-STEM, Jakarta, Indonesia.

Received (Надійшла) 15.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 18.08.2021

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.

Цао Вейлін – викладач інформаційного центру IT, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Китай;
Cao Weilin – teacher, Department of IT information Centre, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: caowl@njtc.edu.cn; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-8230-5235.

Ліцзян Джан – викладач коледжу комп'ютерних наук, Типовий університет Нейцзяна, Нейцзян, Китай;
Zhang Liqiang – teacher, College of Computer Science, Neijiang Normal University, Neijiang, China.
e-mail: zhangiq@njtc.edu.cn; ORCID ID: https://orcid.org/0000- 0003-1278-2209.

Бульба Сергій Сергійович – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Обчислювальна техніка та програмування", Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна;
Serhii Bulba – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: bssserega@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-0358-7516.

Метод автоматизованого тестування на проникнення з використанням технології глибокого машинного навчання

С. Г. Семенов, Цао Вейлін, Чжан Ліцян, С. С. Бульба

Анотація. У статті розроблено метод автоматизованого тестування на проникнення з використанням технології глибокого машинного навчання. Основна мета розробки - підвищення безпеки комп'ютерних систем. Для досягнення поставленої мети було проведено аналіз існуючих методів тестування на проникнення і виявлені їх основні недоліки. В основному вони пов'язані з суб'єктивністю оцінок в разі ручного тестування. У разі автоматизованого тестування більшість авторів підтверджують той факт, що не існує єдиного ефективного вирішення для використовуваних процедур. Це протиріччя вирішується за допомогою інтелектуальних методів аналізу. Пропонується, що розроблений метод був заснований на технології глибокого навчання з підкріпленням. Для досягнення основної мети було проведено дослідження здатності системи Shadov збирати фактичні дані для побудови дерев атак, а також платформи Mulval для генерації дерев атак. Розроблено метод формування матриці кібервторгнень за допомогою інструменту Mulval. Метод Deep Q - Lerning Network був поліпшений для аналізу матриці кібервторгнень і пошуку оптимальної траєкторії атаки. У дослідженні, відповідно до методу глибокого навчання з підкріпленням, використовувалися бали винагороди, дані кожному вузлу відповідно до рейтингу CVSS. Це дозволило зменшити дерева атак і ідентифікувати атаку з більшою ймовірністю. Проведено порівняльне дослідження автоматизованого методу тестування на проникнення. Виявлено практична можливість використання розробленого методу для підвищення безпеки комп'ютерної системи.

Ключові слова: машинне навчання; програмне забезпечення безпеки; автоматизоване тестування на проникнення.

Метод автоматизированного тестирования на проникновения с использованием технологии глубокого машинного обучения

С. Г. Семенов, Цао Вейлин, Чжан Лицян, С. С. Бульба

Аннотация. В статье разработан метод автоматизированного тестирования на проникновение с использованием технологии глубокого машинного обучения. Основная цель разработки – повышение безопасности компьютерных систем. Для достижения поставленной цели был проведен анализ существующих методов тестирования на проникновение и выявлены их основные недостатки. В основном они связаны с субъективностью оценок в случае ручного тестирования. В случае автоматизированного тестирования большинство авторов подтверждают тот факт, что не существует единого эффективного решения для используемых процедур. Это противоречие разрешается с помощью интеллектуальных методов анализа. Предлагается, что разработанный метод был основан на технологии глубокого обучения с подкреплением. Для достижения основной цели было проведено исследование способности системы Shadov собирать фактические данные для построения деревьев атак, а также платформы Mulval для генерации деревьев атак. Разработан метод формирования матрицы кибервторжений с помощью инструмента Mulval. Метод Deep Q - Lerning Network был улучшен для анализа матрицы кибервторжений и поиска оптимальной траектории атаки. В исследовании, в соответствии с методом глубокого обучения с подкреплением, использовались баллы вознаграждения, присвоенные каждому узлу в соответствии с рейтингом CVSS. Это позволило уменьшить деревья атак и идентифицировать атаку с большей вероятностью. Проведено сравнительное исследование автоматизированного метода тестирования на проникновение. Выявлена практическая возможность использования разработанного метода для повышения безопасности компьютерной системы.

Ключевые слова: машинное обучение; программное обеспечение безопасности; автоматизированное тестирование на проникновение.

Applied problems of information systems operation

УДК 519.668:319.66 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.17

В. Ю. Дубницький[1], А. М. Кобилін[1], О. А. Кобилін[2]

[1] ННІ "Каразінський банківський інститут" ХНУ імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна
[2] Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ВИКОНАННЯ НА МОБІЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ АРИФМЕТИЧНИХ ОПЕРАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ АКСІОМ КЛАСИЧНОГО ТА НЕСТАНДАРТНОГО ІНТЕРВАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Анотація. Мета роботи. Розробка програмного забезпечення для виконання на мобільних пристроях арифметичних операцій розрахунків з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу та порівняння їх ефективності. **Результати.** Виконано порівняння результатів виконання арифметичних операцій з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу. Критерієм ефективності обрано величину відносної зміни заключного інтервалу результатів обчислень, виконаних з використанням аксіом нестандартного інтервального аналізу по відношенню до аналогічних обчислень, виконаних з використанням аксіом класичного інтервального аналізу. Для порівняння ефективності обрано нормативні показники, які визначають фінансову безпеку банків. Наведено відомості про особливості програмної системи оперативної оцінки ефективності банківських валютних операцій, призначеної для мобільних пристроїв на операційній системі ANDROID. Результати розрахунків показали, що інтервали, визначені згідно з правилами нестандартної інтервальної математики мають величину інтервалу на 12%–90% менше, ніж обчислення, виконані згідно з вимогами класичної інтервальної математики.

Ключові слова: мобільні пристрої; спеціалізовані програмні калькулятори; інтервальний аналіз; фінансова безпека банків.

Вступ

В умовах мінливого зовнішнього економічного середовища та неперервної зміни внутрішнього стану будь якої організаційної системи особливої актуальності набувають питання, пов'язані з розрахунками показників її економічної безпеки. В процесі розрахунку показників, наприклад, показників фінансового стану банку, виникають дві ситуації. В першому випадку треба визначити ці показники в умовах повної поінформованості про їх значення. В другому випадку, наприклад, при прогнозуванні майбутнього стану банку, відомі лише їх інтервальні значення [1]. Тому в призначених для цього програмних системах необхідно передбачити використання розрахунків з використанням аксіом «звичайної», евклідової арифметики та інтервальної арифметики [2]. Для реалізації такої системи в якості додатку до мобільних пристроїв були створений спеціалізовані програмні калькулятори [3-5].

Аналіз літератури. Інтервальний аналіз як науковий напрямок сформувався відносно недавно. Арифметичні дії з інтервальними числами виконують згідно з правилами класичної інтервальної арифметики, які викладено в роботах [6-8]:

$$\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}=\left[\underline{a};\overline{a}\right]+\left[\underline{b};\overline{b}\right]=\left[\underline{a}+\underline{b};\overline{a}+\overline{b}\right]; \quad (1)$$

$$\boldsymbol{A}-\boldsymbol{B}=\left[\underline{a};\overline{a}\right]-\left[\underline{b};\overline{b}\right]=\left[\underline{a}-\overline{b};\overline{a}-\underline{b}\right]; \quad (2)$$

$$\boldsymbol{A}*\boldsymbol{B}=\left[\underline{a};\overline{a}\right]*\left[\underline{b};\overline{b}\right]=\begin{bmatrix}\min\left\{\underline{a}\cdot\underline{b},\underline{a}\cdot\overline{b},\overline{a}\cdot\underline{b},\overline{a}\cdot\overline{b}\right\},\\ max\left\{\underline{a}\cdot\underline{b},\underline{a}\cdot\overline{b},\overline{a}\cdot\underline{b},\overline{a}\cdot\overline{b}\right\}\end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\boldsymbol{A}/\boldsymbol{B}=\left[\underline{a};\overline{a}\right]/\left[\underline{b};\overline{b}\right]=\left[\underline{a},\overline{a}\right]*\left[1/\overline{b},1/\underline{b}\right];\ 0\notin b. \quad (4)$$

Корисно виписати визначення операції інтервального множення у вигляді так званої таблиці Келі, табл. 1 [9, 10, 13], яка надає можливість подання результату операції в залежності від різних комбінацій значень операндів. Для цього виділимо в *IR* такі підмножини:

$$P=\left\{a\in IR\,\middle|\,\left(\underline{a}\geq 0\right)\&\left(\overline{a}\geq 0\right)\right\} - \quad (5)$$

невід'ємні інтервали;

$$Z=\left\{a\in IR\,\middle|\,\left(\underline{a}\leq 0\right)\&\left(\overline{a}\geq 0\right)\right\} - \quad (6)$$

інтервали, які містять нуль;

$$-P=\left\{a\in IR\,\middle|\,-a\in P\right\} - \quad (7)$$

недодатні інтервали.

Таблиця 1 – **Таблиця Келі для операції інтервального множення**

	$b\in P$	$b\in P$	$b\in -P$
$a\in P$	$\left[\underline{a}\underline{b},\overline{a}\overline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\underline{b},\overline{a}\overline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\underline{b},\underline{a}\overline{b}\right]$
$a\in Z$	$\left[\underline{a}\overline{b},\overline{a}\overline{b}\right]$	$\begin{bmatrix}\min\left\{\underline{a}\overline{b},\underline{a}\underline{b}\right\},\\ \max\left\{\underline{a}\underline{b},\overline{a}\overline{b}\right\}\end{bmatrix}$	$\left[\overline{a}\underline{b},\underline{a}\underline{b}\right]$
$a\in -P$	$\left[\underline{a}\overline{b},\overline{a}\underline{b}\right]$	$\left[\underline{a}\overline{b},\underline{a}\underline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\overline{b},\underline{a}\underline{b}\right]$

В цілому $IR = P \cup Z \cup (-P)$. Тоді операцію інтервального множення можна визначити згідно з

© Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А., 2021

табл. 1. Множення інтервального числа на сталу величину виконують згідно з виразом:

$$\mu \cdot a = \begin{cases} \left[\mu \cdot \underline{a}, \mu \cdot \overline{a}\right], & якщо \mu \geq 0; \\ \left[\mu \cdot \overline{a}, \mu \cdot \underline{a}\right], & якщо \mu < 0. \end{cases} \quad (8)$$

Розширення класичної інтервальної арифметики може бути виконано використовуючи методи абстрактної алгебри. В роботі [11] показано, що з більш загальної точки зору арифметика *IR* є комутативною напівгрупою відносно складання та множення. Відомо, що всяка комутативна напівтрупа для якої справедливий так званий закон скорочення може бути вкладена в групу (або, що еквівалентно, розширена до групи), в якій кожний елемент має обернений. Інтервальна арифметика *IR* є комутативною напівгрупою, що задовольняє закону скорочення щодо додавання, а відносно множення утворює напівгрупу із законом скорочення, тобто утворюють всі інтервали, що не містять нуля [11].

Всі технічні конструкції, необхідні для такого узгодженого розширення інтервальних напівгруп по додаванню і множенню були реалізовані Э. Каухером ще в 70-і роки XX століття. У роботах [10, 11, 12] він побудував систему алгебри, яку ми позначатимемо *KR*, що включає класичну інтервальну арифметику *IR* як власну підмножину. Вона цілком задовольняє нашим вимогам, оскільки є групою по додаванню і майже групою по множенню. Крім того, в *IR* без яких-небудь обмежень можливі операції що до визначення нижньої і верхньої граней, щодо впорядкування інтервалів по включенню, тобто KR має кращі порівняно з класичною арифметикою IR порядкові властивості. Ще однією властивістю повної інтервальної арифметики Каухера є те, що саме вона є мінімаксною інтервальною арифметикою, в якій обчислення мінімаксів може бути здійснене на рівні додавання, віднімання, множення і ділення.

Елементами повної інтервальної арифметики *KR* є пари дійсних чисел $[\eta, \vartheta]$, не обов'язково зв'язаних співвідношенням $\eta \leq \vartheta$. Таким чином, *KR* отримують приєднанням неправильних інтервалів $[\eta, \vartheta]$, $\eta > \vartheta$, до множини $IR = \{[\eta, \vartheta], \eta, \vartheta \in \mathrm{R}, \eta \leq \vartheta\}$ правильних інтервалів і дійсних чисел (які ототожнюють з виродженими інтервалами нульової ширини). Елементи арифметики Каухера і утворювані з них складніші об'єкти (вектори, матриці) ми виділятимемо жирним шрифтом, як і звичайні інтервали. При цьому, якщо $a = [\eta, \vartheta]$, то η називають лівим (або нижнім) кінцем інтервалу $\underline{a}$ або inf *a*, а ϑ називається правим (або верхнім) кінцем інтервалу *a* і позначають символом $\overline{a}$ або sup *a*. Інтервал *a* назвемо врівноваженим, якщо $\underline{a} = -\overline{a}$.

Визначення 1. Абсолютною величиною (модулем) інтервалу *a* називають величину

$$|a| = \max\{|\underline{a}|, |\overline{a}|\} \quad (9)$$

Інтервал *a* називають дуальним, якщо дві границі *KR*, міняються місцями в результаті відображення дуалізації dual : $KR \rightarrow KR$, що міняє місцями (що перевертає) кінці інтервалу, тобто такого що

$$\text{dual } a = \left\lfloor |\underline{a}|, |\overline{a}| \right\rfloor \quad (10)$$

Правильною проекцією інтервалу називають величину:

$$\text{pro } a = \begin{cases} a, \text{ якщо a - правильна проекція;} \\ \text{dual } a, \text{ якщо навпаки.} \end{cases} \quad (11)$$

Аналогічно класичній інтервальній арифметиці *IR* відношення включення одного інтервалу в іншій визначається в *KR* таким чином:

$$a \subseteq b \Leftrightarrow (a \geq b) \& (\overline{a} \leq \overline{b}). \quad (12)$$

Крім теоретико-множинного включення на множині інтервалів *KR* існує ще одне часткове впорядкування, яке узагальнює лінійний порядок на дійсній осі.

Визначення 2. Для інтервалів $a, b \in KR$ умовимося вважати, що *a* не перевершує *b* і писати $a \leq b$ тоді і тільки тоді, коли $\overline{a} \leq \overline{b}$ і $\underline{a} \leq \underline{b}$. Інтервал називається невід'ємним, якщо невід'ємні обидва його кінця. Інтервал називається недодатним, тобто « ≤ 0», якщо недодатні обидва його кінця.

Додавання визначається в *KR* абсолютно так само, як в класичній інтервальній арифметиці:

$$a + b = \left[\underline{a} + \underline{b}, \overline{a} + \overline{b}\right]. \quad (13)$$

Але тепер з факту існування неправильних інтервалів виходить те, що кожен елемент *a* з *KR* має єдиний обернений по додаванню (протилежний) елемент, такий, що позначається через opp *a*, і з рівності *a* + opp *a* = 0 слідує:

$$\text{opp } a := \left\lfloor -\underline{a}, \overline{a} \right\rfloor. \quad (14)$$

Таким чином, щодо складання арифметики *KR* є комутативною групою, яка ізоморфна адитивній групі стандартного лінійного простору R^2. Скорочено ми позначатимемо операцію, обернену додаванню, так зване внутрішнє (алгебраїчне) віднімання в *KR*, символом $\oplus$, так, що

$$a \oplus b = a + \text{opp } b = \left[\underline{a} - \underline{b}, \overline{a} - \overline{b}\right]. \quad (15)$$

Для того, щоб виписати явні формули для додавання в повній інтервальній арифметиці, виділимо в *KR* наступні підмножини:

$$P := \{a \in KR \mid (\underline{a} \geq 0) \& (\overline{a} \geq 0)\} - \quad (16)$$

невід'ємні інтервали;

$$Z := \{a \in KR \mid \underline{a} \leq 0 \leq \overline{a}\} - \quad (17)$$

нуль- інтервали;

$$-P := \{a \in KR \mid -a \in P\} - \quad (18)$$

недодатні інтервали;

$$\text{dual } ZP := \{a \in KR \mid \text{dual} \in Z\} - \quad (19)$$

інтервали, що містять нулі.

В цілому $KR = P \cup Z \cup (-P) \cup (\text{dual } Z)$. Тоді множення в інтервальній арифметиці Каухера може бути визначено табл. 2, яку отримують доповненням табл. 1 ще одним рядком і ще одним стовпцем, відповідному випадку операндів з множини dual *Z*.

Операція множення в арифметиці Каухера допускає існування нетривіальних дільників нуля. Інтервальне множення в арифметиці Каухера є комутативним і асоціативним [10-12], але групу по множенню в *KR* утворюють лише інтервали *a*, для яких $\underline{a}\,\overline{a} > 0$, оскільки закон скорочення не виконується ні на якій більш ширшій підмножині. В табл. 2 наведено таблицю Келі для операції множення в інтервальній арифметиці Каухера.

Таблиця 2 - **Таблиця Келі для операції множення в інтервальній арифметиці Каухера**

	$b \in P$	$b \in P$	$b \in -P$	$b \in$ dual Z
$a \in P$	$\left[\underline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\underline{b}, \underline{a}\overline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\underline{b}, \underline{a}\overline{b}\right]$
$a \in Z$	$\left[\underline{a}\overline{b}, \overline{a}\overline{b}\right]$	$\begin{bmatrix}\min\left\{\underline{a}\overline{b}, \underline{a}\underline{b}\right\}, \\ \max\left\{\underline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\right\}\end{bmatrix}$	$\left[\overline{a}\underline{b}, \underline{a}\underline{b}\right]$	0
$a \in -P$	$\left[\underline{a}\overline{b}, \overline{a}\underline{b}\right]$	$\left[\underline{a}\overline{b}, \underline{a}\underline{b}\right]$	$\left[\overline{a}\overline{b}, \underline{a}\underline{b}\right]$	$\overline{a}\overline{b}, \overline{a}\underline{b}$
$a \in$ dual Z	$\left[\underline{a}\underline{b}, \overline{a}\underline{b}\right]$	0	$\left[\overline{a}\overline{b}, \underline{a}\overline{b}\right]$	$\begin{bmatrix}\max\left\{\underline{a}\underline{b}, \overline{a}\overline{b}\right\}, \\ \min\left\{\underline{a}\overline{b}, \overline{a}\underline{b}\right\}\end{bmatrix}$

Розглянуті методи інтервального аналізу надають можливість для розв'язання багатьох задач, але загальний недолік цих методів – широкі інтервальні оцінки результату, що іноді непридатне не тільки для проведення практичних розрахунків, але і для подальшого аналізу.

В роботах [9, 13] приведена структура, яка отримала назву системи правил нестандартної інтервальної математики. Позначимо

$$\boldsymbol{M} = \left(\boldsymbol{I}(R), +, -, \times, /, +^{-}, -^{-}, \times^{-}, /^{-}\right),$$

де $\boldsymbol{I}(R) = \left\{\left[a^{+}, a^{-}\right] \middle| a^{-} \le a^{+}; a^{-}, a^{+} \in R\right\}$ – множина дійсних інтервалів; $(+, -, \times, /)$ і $\left(+^{-}, -^{-}, \times^{-}, /^{-}\right)$- стандартні і нестандартні інтервальні операції складання, віднімання, множення і ділення відповідно дійсним інтервалам $\boldsymbol{A} = \left[a^{-}, a^{+}\right]; \boldsymbol{B} = \left[b^{-}, b^{+}\right]$.

Для програмної реалізації представимо значення інтервальних чисел $\boldsymbol{A}$ і $\boldsymbol{B}$ в формі центр-радіус:

$$\boldsymbol{A} = \langle a, r_a \rangle; \quad \boldsymbol{B} = \langle b, r_b \rangle,$$

де $a = \frac{\underline{a} + \overline{a}}{2}; r_a = \frac{\underline{a} + \overline{a}}{2}; b = \frac{\underline{b} + \overline{b}}{2}; r_b = \frac{\underline{b} - \overline{b}}{2}$ – (20)

центри і радіуси відповідно інтервалів $\boldsymbol{A}$ і $\boldsymbol{B}$.

Нестандартна інтервально-арифметична операція додавання визначається так:

$$\boldsymbol{A} +^{-} \boldsymbol{B} = \langle a + b, |r_a - r_b| \rangle. \quad (21)$$

Нестандартна інтервально-арифметична операція добутку визначається так:

$$\boldsymbol{A} \times^{-} \boldsymbol{B} = \langle ab - sign(ab) r_a r_b, |ar_b - sign(ab) br_a| \rangle, \quad (22)$$

якщо $|b|/r_b \ge 1; \quad |a|/r_a \ge 1;$ (23)

$$\boldsymbol{A} \times^{-} \boldsymbol{B} = \langle ab - sign(b) ar_b, |br_a - sign(b) r_a r_b| \rangle, \quad (24)$$

якщо $|a|/r_a < 1; \quad |a|/r_a < |b|/r_b;$ (25)

$$\boldsymbol{A} \times^{-} \boldsymbol{B} = \langle ab - sign(a) br_b, |ar_a - sign(a) r_a r_b| \rangle, \quad (26)$$

якщо $|b|/r_b < 1; \quad |a|/r_a \ge 1$ (27)

Нестандартна інтервально-арифметична операція ділення визначається так:

$$\boldsymbol{A} /^{-} \boldsymbol{B} = \frac{\langle ab - sign(ab) r_a r_b, |ar_b - sign(ab) br_a| \rangle}{b^2 - r_b^2}, \quad (28)$$

якщо $|b|/r_b > 1; \quad |a|/r_a \ge 1;$ (29)

$$\boldsymbol{A} /^{-} \boldsymbol{B} = \frac{\langle ab - sign(b) ar_b, |br_a - sign(b) r_a r_b| \rangle}{b^2 - r_b^2}, \quad (30)$$

якщо $|b|/r_b > 1; \quad |a|/r_a < 1;$ (31)

$$\boldsymbol{A} /^{-} \boldsymbol{B} = \frac{\langle ab - sign(a) br_a, |ar_b - sign(a) r_a r_b| \rangle}{b^2 - r_b^2}, \quad (32)$$

якщо $|b|/r_b < 1; \quad |a|/r_a < 1.$ (33)

Постановка задачі. Розробка програмного забезпечення для виконання на мобільних пристроях арифметичних операцій розрахунків з з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу та порівняння їх ефективності.

Отримані результати

Визначимо ширину інтервалу в якому знаходиться результат обчислень у вигляді:

$$\Delta \boldsymbol{A} = \left[\overline{a} - a\right]. \quad (34)$$

Середину інтервалу визначимо у вигляді:

$$m(\boldsymbol{A}) = \left[\overline{a} + \underline{a}\right]/2. \quad (35)$$

Точність інтервалу, визначеного класичним інтервальним аналізом визначимо виразом:

$$\varepsilon = \Delta \boldsymbol{A} / m(a). \quad (36)$$

Точність інтервалу, визначеного нестандартним інтервальним аналізом визначимо виразом:

$$\xi = r_a / a. \quad (37)$$

Ефективність запропонованого методу визначимо виразом:

$$ef = \frac{\varepsilon - \xi}{\varepsilon} \cdot 100\ \%. \quad (38)$$

На рис. 1 наведено результати операції додавання, виконаної з використанням різних систем аксіом.

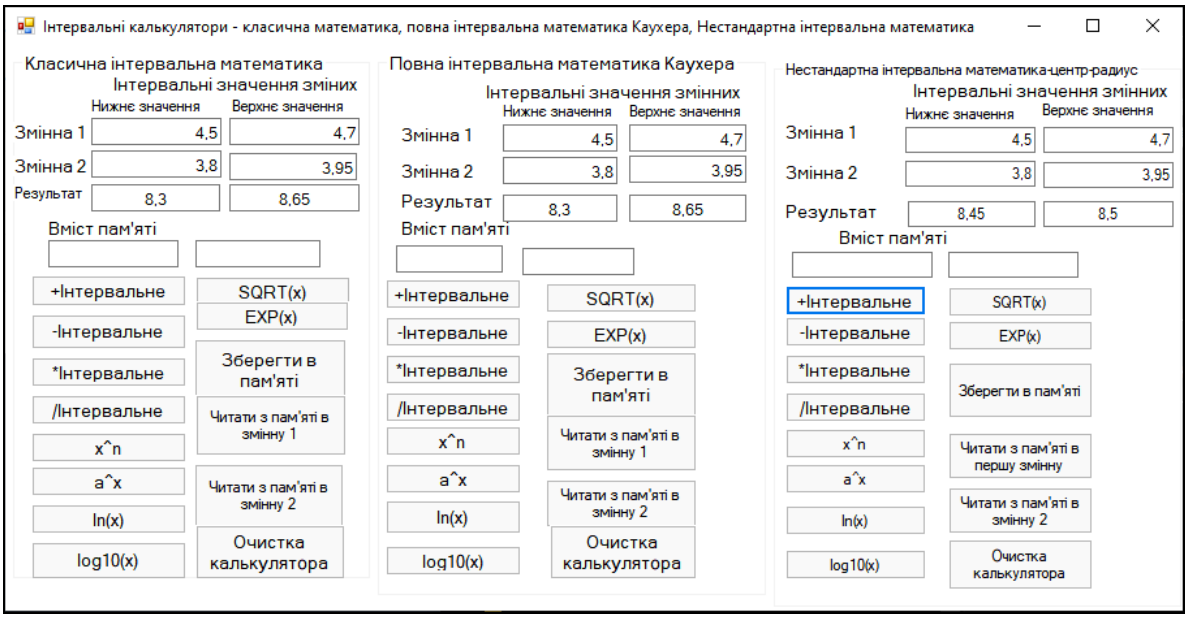


Рис. 1. Порівняльний аналіз арифметичних операцій переліченими методами інтервальної математики
(**Fig. 1**. Comparative analysis of arithmetic operations by the listed methods of interval mathematics)

Дійсно, при використанні методів нестандартного аналізу скоротився з величини 0,35 до величини 0,05 , тобто зменшився в сім разів.

Програмна система розроблена в рамках даної роботи призначена для розрахунку економічних нормативів регулювання банківської діяльності засобами евклідової та інтервальної арифметики з використанням засобів мобільного зв'язку призначена для обчислення економічних нормативів банківської діяльності з використанням засобів мобільного зв'язку та інтервальної арифметики. Програма створена з використанням середовища програмування Visual Studio 2017 Express for Windows Phone.

Особливістю програмної системи є її можливість бути використаною в будь-яких умовах: в процесі бізнесових перемовин, у разі відсутності доступу до комп'ютерів, системи Wi-Fi, таке інше.

Методика визначення показників фінансової безпеки банків. В процесі роботи система обчислює показники банківської діяльності затверджені на час розробки системи Національним банком України. Використання інтервальної арифметики дає можливість аналізувати фінансовий стан банку за будь яких умов поінформованості про їх значення. Перелік показників, які необхідно контролювати та способи їх визначення наведено в нормативних документах [15, 16]. Розроблена програмна система надає можливість визначати наступні показники банківської діяльності.

Норматив регулятивного капіталу банку ($Н1$). Регулятивний капітал банку, не відкоригований на суму перевищення нормативів $Н7$ та $Н9$, розраховується за такою формулою:

$$РК1 = ОК + ДК - В, \qquad (39)$$

де $РК1$ - регулятивний капітал банку, не відкоригований на суму перевищення нормативів $Н7$ та $Н9$; $ОК$ - основний капітал (капітал 1-го рівня); $ДК$ - додатковий капітал (капітал 2-го рівня); $В$ - відвернення.

Регулятивний капітал банку, відкоригований на суму перевищення нормативів $Н7$ та $Н9$, розраховується за такою формулою:

$$РК = РК1 - СпН7(6) - СпН9(7). \qquad (40)$$

$РК$ береться до розрахунку таких нормативів: достатності (адекватності) регулятивного капіталу ($Н2$), співвідношення регулятивного капіталу до сукупних активів ($Н3$), співвідношення регулятивного капіталу до зобов'язань банку ($Н3$-1), великих кредитних ризиків ($Н8$).

Норматив достатності (адекватності) регулятивного капіталу ($Н2$) розраховують за формулою

$$Н2 = \frac{РК}{Ар + Свп} \cdot 100\%; \qquad (41)$$

де $РК$ - регулятивний капітал банку, $Ар$ – активи, зменшені на суму створених відповідних резервів за активними операціями, на суму забезпечення (але не більше ніж сума основного боргу за окремою операцією), кредиту (вкладень у боргові цінні папери), безумовним зобов'язанням або грошовим покриттям у вигляді застави майнових прав. $Свп$ – сукупна сума відкритої валютної позиції банку за всіма іноземними валютами та банківськими металами.

Норматив (коефіцієнт) співвідношення регулятивного капіталу до сукупних активів ($Н3$) розраховують за такою формулою:

$$Н3 = \frac{Рк}{СА} \cdot 100\%, \qquad (42)$$

де $Рк$ - регулятивний капітал; $СА$ - сукупні активи.

Норматив (коефіцієнт) співвідношення регулятивного капіталу до зобов'язань банку ($Н3$-1) розраховують за такою формулою:

$$Н3-1 = \frac{Рк}{З} \cdot 100\%, \qquad (43)$$

де *Рк* - регулятивний капітал банку; *З* - зобов'язання банку без урахування неамортизованих дисконтів та премій доходів майбутніх періодів резервів за виданими зобов'язаннями та за іншими операціями за позабалансовими рахунками валютної позиції, розрахунків між відокремленими підрозділами банку.

Норматив миттєвої ліквідності (*Н*4) розраховують за такою формулою:

$$Н4 = \frac{Ккр + Ка}{Рп + Ск} \cdot 100\%, \quad (44)$$

де *Ккр* - кошти на кореспондентському рахунку; *Ка* – кошти в касі; *Рп* – поточні рахунки для розрахунку нормативу миттєвої ліквідності; *Ск* – строкові кошти суб'єктів господарювання, фізичних осіб і небанківських установ, кінцевий строк погашення яких настав.

Норматив поточної ліквідності (*Н*5) (з кінцевим строком погашення до 31 дня) розраховують за такою формулою:

$$Н5 = \frac{А}{Зп} \cdot 100\%, \quad (45)$$

де *А* - активи банку з кінцевим строком погашення до 31 дня для розрахунку нормативу поточної ліквідності; *Зп* - зобов'язання банку з кінцевим строком погашення до 31дня для розрахунку нормативу поточної ліквідності.

Норматив короткострокової ліквідності (*Н*6), (з кінцевим строком погашення до одного року) розраховують за такою формулою:

$$Н6 = \frac{Ал}{З1} \cdot 100\%, \quad (46)$$

де *Ал* - ліквідні активи з кінцевим строком погашення до одного року для розрахунку нормативу короткострокової ліквідності; *З1* - зобов'язання банку з кінцевим строком погашення до одного року для розрахунку нормативу короткострокової ліквідності.

Норматив максимального розміру кредитного ризику на одного контрагента (або групи пов'язаних контрагентів) (*Н*7)розраховують за формулою

$$Н7 = \frac{Зс}{РК1} \cdot 100\%, \quad (47)$$

де *Зс* - сукупна заборгованість за строковими депозитами, кредитами, факторингом і фінансовим лізингом, векселями, борговими цінними паперами, акціями, дебіторською заборгованістю, простроченими нарахованими доходами, 100 відсотків від суми позабалансових зобов'язань, виданих що до одного контрагента (або групи пов'язаних контрагентів), *РК1* - регулятивний капітал банку.

Норматив великих кредитних ризиків (*Н*8) розраховують за такою формулою:

$$Н8 = \frac{Зв}{РК}, \quad (48)$$

де *Зв* - сукупна заборгованість за строковими депозитами, кредитами, факторингом і фінансовим лізингом, векселями, борговими цінними паперами, акціями, дебіторською заборгованістю, простроченими нарахованими доходами, 100 відсотків від суми позабалансових зобов'язань, що враховуються в банку за великими кредитами за всіма контрагентами (або групою пов'язаних контрагентів); *РК* - регулятивний капітал банку.

Норматив максимального розміру кредитів, гарантій та поручительств, наданих одному інсайдеру (*Н*9) розраховують за такою формулою:

$$Н9 = \frac{Зін}{СТ} \cdot 100\%, \quad (49)$$

де *Зін* - сукупна заборгованість за строковими депозитами, кредитами, факторингом та фінансовим лізингом, векселями, борговими цінними паперами, акціями, дебіторською заборгованістю, простроченими нарахованими доходами, 100 відсотків від суми позабалансових зобов'язань щодо одного інсайдера (або групи пов'язаних інсайдерів), *СТ* - статутний капітал банку.

Норматив максимального сукупного розміру кредитів, гарантій та поручительств, наданих інсайдерам *(Н*10) розраховують за такою формулою:

$$Н10 = \frac{СЗін}{СТ} \cdot 100\%, \quad (50)$$

де *СЗін* - сукупна заборгованість за строковими депозитами, кредитами, факторингом та фінансовим лізингом, векселями, борговими цінними паперами, акціями, дебіторською заборгованістю, простроченими нарахованими доходами, 100 відсотків від суми позабалансових зобов'язань щодо всіх інсайдерів, *СТ* - статутний капітал банку.

Норматив інвестування в цінні папери окремо за кожною установою (*Н*11) розраховують за такою формулою:

$$Н11 = \frac{Кін}{СТ} \cdot 100\%, \quad (51)$$

де *Кін* - кошти банку, що інвестуються на придбання акцій (часток/паїв) окремо за кожною установою, *СТ* - статутний капітал банку.

Норматив загальної суми інвестування (*Н*12) розраховують за такою формулою:

$$Н12 = \frac{Кін1}{СТ} \cdot 100\%; \quad (52)$$

де *Кін1* - кошти банку, що інвестуються з метою придбання акцій (часток/паїв) будь-яких юридичних осіб; *СТ* - статутний капітал банку.

Співвідношення залишків за вкладами фізичних осіб до залишків пасивів банку розраховується за такою формулою:

$$Сп.б. = \frac{Вкл.ф.}{П}; \quad (53)$$

де *Вкл.ф.* - залишки за вкладами фізичних осіб, *П* - пасиви банку без урахування розрахунків між філіями та іншими підвідомчими установами банку.

Співвідношення обсягу операцій довірчого управління та сукупних активів банку розраховується за такою формулою:

$$Сд = \frac{Сдов}{СА} \cdot 100\% ; \qquad (54)$$

де *Сдов* - сукупний обсяг операцій довірчого управління банку; *СА* - сукупні активи (які включаються до розрахунку нормативу *Н*3).

Опис програмної системи. Програмна система розроблена в рамках даної роботи призначена для розрахунку економічних нормативів регулювання банківської діяльності засобами евклідової та інтервальної арифметики з використанням засобів мобільного зв'язку призначена для обчислення економічних нормативів банківської діяльності з використанням засобів мобільного зв'язку та інтервальної арифметики. Програмна система для розрахунку економічних нормативів регулювання банківської діяльності засобами евклідової та інтервальної арифметики з використанням засобів мобільного зв'язку розроблена в програмному середовищі Visual Studio 2017 Express for Windows Phone. Програмна система розроблена в рамках даної роботи призначена для розрахунку економічних нормативів регулювання банківської діяльності засобами евклідової та інтервальної арифметики з використанням засобів мобільного зв'язку призначена для обчислення економічних нормативів банківської діяльності з використанням засобів мобільного зв'язку та інтервальної арифметики.

До складу програмної системи входять інтервальний калькулятор і процедури, які виконують розрахунки економічних нормативів регулювання діяльності банків в Україні. Для запуску програмної системи треба розкрити перелік дзастосунків, які встановлені на телефоні і доторкнутися до імені додатку «Економічні_нормативи_банку». Після цього з'явиться головна сторінка застосунку, загальний вигляд якої наведено на рис. 2, а.

Далі треба вибрати відповідну процедуру і доторкнутися відповідного елемента керування. З'явиться відповідна сторінка з текстовими полями для введення вихідних даних і елемент керування, за допомогою якого виконуються розрахунки для введених даних (поля в останньому рядку не заповнювати – вони призначені для результатів). На рис. 2, б, в наведені приклади відповідних сторінок після введення вихідних даних з отриманими результатами розрахунку.

Треба відзначити, що для сторінок: Нормативи регулятивного капіталу, Нормативи ліквідності; Нормативи кредитних ризиків; Нормативи інвестування; Співвідношення залишків і операцій вибрана розмітка «Panorama» з використанням елементів курування Metro-дизайну. Це означає, що нормативи цих груп розташовуються в зв'язаних сторінках і перехід між ними здійснюються дотиком з переміщенням праворуч або ліворуч. Для розрахунку решти показників використовується стандартна розмітка. На рис. 2, б наведено приклад використання Інтервального калькулятора при вводі початкових даних виконання інтервальних обчислень. На рис. 2, в наведені перелік математичних функцій , які можуть використовуватися при виконанні розрахунків для будь-якого математичного виразу. На рис. 2, г наведений приклад розрахунку регулятивного капіталу банку.

а б в г

Рис. 2. Сторінки програмної системи (**Fig. 2.** Pages of the software system):
а – головна; б – процес введення даних; в – вбудовані функції; г – розрахунок
*РК*1 – регулятивного капіталу банку, невідкорегованого на суму перевищення нормативів *Н*7 та *Н*9

Аналіз структур формул, згідно з якими обчислюють значення цих показників подано в табл. 3.

З аналізу цієї таблиці можна зробити такий висновок. Показники, структура яких співпадає із змінними A, A_1, A_2, A_3, A_5, повністю забезпечують визначення всіх показників, наведених в нормативних документах [14, 15].

Розрахункові формули показників банківської безпеки записані в інтервальні формі мають вигляд, наведений у наступних формулах.

Інтервальне обчислення показника типу A:

$$A = B + C - D \Rightarrow [B] + [C] - [D] = \\ = \left[(b_1, b_2) + (c_1, c_2)\right] - (d_1, d_2). \qquad (55)$$

Таблиця 3 – **Розрахункові формули для обчислення нормативних показників стану банку**

Норма-тив	Структура формули	Норма-тив	Структура формули
*Н*1	$A = B + C - D$	*Н*7	A_3
*Н*1-1	$A_1 = B_1 - C_1 - D_1$	*Н*8	A_3
*Н*2	$A_2 = B_3 / (C_3 + D_3)$	*Н*9	A_3
*Н*3	$A_3 = \frac{B_4}{C_4} \cdot [100]$	*Н*10	A_3
*Н*3-1	A_3	*Н*11	A_3
*Н*4	$A_5 = \frac{B_5 + C_5}{D_5 + E_5}$	*Н*12	A_3
*Н*5	A_3	$C_{пб}$	A_3
*Н*6	A_3	$Cд$	A_3

Інтервальне обчислення показника типу A_1:

$$A_1 = B_1 - C_1 - D_1 \Rightarrow ([B_1] - [C_1]) - [D_1] = \\ = [(b_1, b_2) - (c_1, c_2)] - (d_1, d_2). \quad (56)$$

Інтервальне обчислення показника типу A_2:

$$A_2 = \frac{B_3}{C_3 + D_3} \Rightarrow |[C_3] + [D_3] = [G_3]| = \frac{[B_3]}{[G_3]} = \\ = \left(b_1^{(3)}\right), \left(b_2^{(3)}\right) \cdot \left(1/g_2^{(3)}, 1/g_1^{(3)}\right). \quad (57)$$

Інтервальне обчислення показника типу A_3:

$$A_3 = \frac{B_4}{C_4} \Rightarrow = \frac{[B_4]}{[C_4]} = \left(b_1^{(4)}\right), \left(b_2^{(4)}\right) \cdot \left(1/c_2^{(4)}, 1/c_1^{(4)}\right) \quad (58)$$

Інтервальне обчислення показника типу A_5:

$$A_5 = \frac{B_5 + C_5}{D_5 + E_5} \Rightarrow \frac{[B_5] + [C_5]}{[D_5] + [E_5]} \Rightarrow \frac{[H_5]}{[K_5]}. \quad (59)$$

Подальші дії виконують так, як при обчисленні показника типу A_3.

В табл. 4 наведено приклади обчислення нормативів банківської безпеки засобами класичної та нестандартної математики.

Таблиця 4 – **Порівняння обчислення нормативів банківської безпеки засобами класичної та нестандартної математики**

Назва нормативу	**Назва показників**	**Значення показників**	**Результати обчислення: інтервальна математика**	
			класична	**нестандартна**
Норматив регулятивного капіталу банку (Н1)	ОК ДК В СпН7 СпН9	[123451; 123459] [3451; 3461] [103;109] [0,4435; 0,44873] [2,777; 2,811]	[126798; 126915] [126802; 126919]	[126799; 126903] [126803; 126807]
Норматив достатності (адекватності) регулятивного капіталу (Н2)	РК Ар Свп	[126798; 126915] [571; 579] [652; 657]	[10258,7; 10377,35]	[10309; 10326]
Норматив (коефіцієнт) співвідношення регулятивного капіталу до сукупних активів (Н3)	Рк З	[126798; 126915] [12345; 12349]	[1026,8; 1028,1]	[1027,13; 1027,64]
Норматив миттєвої ліквідності (Н4)	Ккр Ка Рп Ск	[9678; 9699] [12151; 12168] [23788; 23851] [3494; 3499]	[79,813; 80,148]	[79,9; 80,06]
Норматив поточної ліквідності (Н5)	А Зп	[851; 871] [1051; 1072]	[79,384; 82,873]	[80,97; 81,25]
Норматив короткострокової ліквідності (Н6)	Ал Зl	[9069; 9125] [10510; 10720]	[84,598; 86,812]	[85,12; 86,29]
Норматив максимального розміру кредитного ризику на одного контрагента (Н7)	Зс РК1	[563; 569] [126802; 126919]	[0,4435; 0,45873]	[0,44; 0,45]
Норматив великих кредитних ризиків (Н8)	Зв РК	[3485; 3492] [126798; 126915	[0,02745; 0,02753]	[0,027485; 0,027517]
Норматив максимального розміру кредитів, гарантій та порук, наданих одному інсайдеру (Н9)	Зін СТ	[343; 347] [12345; 12349]	[2,777; 2,84]	[2,78; 2,83]
Норматив максимального сукупного розміру кредитів, гарантій та поручительств, наданих інсайдерам (Н10).	СЗін СТ	[3429; 3456] [123451; 123471]	[2,7771703; 2799491]	[2,78; 2,80]
Норматив інвестування в цінні папери окремо за кожною установою (Н11)	Кін СТ	[32457; 32489] [123451; 123471]	[26,2871; 26,317]	[26,29; 26,31]
Норматив загальної суми інвестування (Н12)	Кін1 СТ	[43895; 43916] [123451; 123471]	[32,892; 35,57]	[35,56; 35,57]

Наведені результати розрахунків показали, що інтервали, визначені згідно з правилами нестандартної інтервальної математики мають величину інтервалу на 12%–90% менше, ніж обчислення, виконані згідно з вимогами класичної інтервальної математики.

Висновки

1. Запропоновано програмну система для розрахунку економічних нормативів регулювання банківської діяльності засобами евклідової та інтервальної арифметики з використанням засобів мобільного зв'язку призначена для обчислення економічних нормативів банківської діяльності з використанням засобів мобільного зв'язку та інтервальної арифметики. Програма створена з використанням середовища програмування Microsoft Visual Studio 2010 Express for Windows Phone.

2. В процесі роботи система обчислює показники банківської діяльності затверджені на даний час Національним банком України. Використання інтервальної арифметики дає можливість аналізувати фінансовий стан банку за будь яких умов поінформованості про їх значення.

3. Виконано порівняння результатів виконання арифметичних операцій з використанням аксіом класичного та нестандартного інтервального аналізу.

4. Критерієм ефективності обрано величину відносної зміни заключного інтервалу результатів обчислень, виконаних з використанням аксіом нестандартного інтервального аналізу по відношенню до аналогічних обчислень, виконаних з використанням аксіом класичного інтервального аналізу.

5. Результати розрахунків показали, що інтервали, визначені згідно з правилами нестандартної інтервальної математики мають величину інтервалу на 12%–90% менше, ніж обчислення, виконані згідно з вимогами класичної інтервальної математики.

Список літератури

1. Дубницький В.Ю., Кобилін А.М. Використання нестандартних інтервальних операцій для зменшення невизначеності у процесі виконання фінансових розрахунків. *Вісник університету банківської справи Національного банку України.* 2014. № 1 (19). С. 255-260.
2. Дубницький В.Ю., Кобилін А.М. Порівняльний аналіз результатів планування нормативів банківської безпеки засобами класичної та нестандартної арифметики. *Радіоелектронні і комп'ютерні системи*. 2014. № 5 (69). С. 29-33.
3. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 101306. Комп'ютерна програма «Програмна система оперативної оцінки ефективності банківських валютних операцій, призначена для мобільних пристроїв на операційній системі ANDROID». В.Ю. Дубницький, А.М. Кобилін, О.А. Кобилін / 17. 12. 2020.
4. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50065. Спеціалізований програмний продукт «НІМ». В.Ю. Дубницький, А.М. Кобилін / 08.07.2013.
5. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір № 50747. Спеціалізований програмний продукт «НІМ-2». В.Ю. Дубницький, А.М. Кобилін / 19.08.2013.
6. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. Москва: Мир, 1987. 259 с.
7. Moore R.E. Interval analysis. Eiigle wood Cliffs. N.J.: Prentic-e-llall, 1966. 159 p.
8. Hansen E. Topics in Interval Analysis. London: Oxford University Press, 1969. P. 35- 46.
9. Калмыков С.Л., Шокин Ю.И., Юлдашев З.Х. Методы интервального анализа. Новосибирск: Наука, 1986. 224 с.
10. Kaucher E. Uber metriche und algebraische Eigenschaften einiger beim numersschen Technen auftretender Raume. Karlsruhe: Universitat Karlsruhe, 1973. 108 p.
11. Kaucher E. Algebraische Erweiterungen der Intervallrechnung unter Erhaltung Ordnungsund Verbandsstrukten. *Grandlagen der Computer-Arithmetic* (Computing Supplementum; 1). Albrecht R., Kulisch U., eds. Wien: Springer, 1977. P. 65-79.
12. Kaucher E. Interval analysis in extended interval space IR. *Fundamentals of numerical computation (Computer-oriented numerical analysis)*. Alefeld G., Grigorieff R.D., eds. Wien: Springer, 1980. P. 33-49.
13. Шарый С.В. Конечномерный интервальный анализ. Новосибирск: XYZ, 2008, 726 с.
14. Постанова Правління національного банку України «Про схвалення Методики розрахунку економічних нормативів регулювання діяльності банків в Україні». НАЦІОНАЛЬНИЙ БАНК; Постанова, Методика від 02.06.2009 № 315.
15. Стельмах В.С., Єпіфанов А.О., Сало І.В., Єпіфанова М.А. Контроль: інспектування, аудит, банківський нагляд: монографія. Суми: ВТД «Університетська книга», 2006. 432 с.

References

1. Dubnytsky, V.Yu. and Kobylin, A.M. (2014), "Use of non-standard interval operations to reduce uncertainty in the process of performing financial calculations", *Bulletin of the University of Banking of the National Bank of Ukraine*, No. 19, pp. 255-260 (ukr.).
2. Dubnytsky, V.Yu. and Kobylin, A.M, (2014), "Comparative analysis of the results of planning the standards of banking security by means of classical and non-standard arithmetic", *Radio electronic and computer systems*, No. 5 (69), pp. 29-33 (ukr.).
3. Dubnytskyi, V.Yu., Kobylin, A.M. and Kobylin, O.A, (2020), *Software system for operational evaluation of the effectiveness of banking foreign exchange transactions, designed for mobile devices on the operating system ANDROID*, Computer program, Certificate of registration of copyright to the work No. 101306, 17.12.2020 (ukr.).
4. Dubnytskyi, V.Yu., and Kobylin, A.M. (2013), *Specialized software product «NIM»*, Certificate of registration of copyright to the work No. 50065, 08.07.2013 (ukr.).
5. Dubnytskyi, V.Yu., and Kobylin, A.M. (2013), *Specialized software product «NIM-2»*, Certificate of registration of copyright to the work No. 50747, 19.08.2013 (ukr.).
6. Alefeld, H. and Khertsberher, Yu. (1967), *Introduction to interval computation*, ACADEMIC PRESS, Paris, 360 p. (rus.).
7. Moore, R.E. (1966), *Interval analysis*, Eiigle wood Cliffs, N.J., Prentic-e-llall, 159 p.
8. Hansen, E. (1969), *Topics in Interval Analysis*, Oxford University Press, London, pp. 35- 46.
9. Kalmykov, S.L., Shokin, Ju.I. and Juldashev, Z.H. (1986), *Methods of interval analysis*, NAUKA, Novosibirsk, 224 p. (rus.)

10. Kaucher, E. (1973), *About the metric and algebraic properties of some of the spaces appearing in Numersian technology*, Universitat Karlsruhe, Karlsruhe, 108 p. (Ger.).
11. Kaucher, E. (1977), "Algebraic extensions of the interval calculation while preserving order and association structures", *Grandlagen der Computer-Arithmetic, (Computing Supplementum;1)*, Springer, Wien, pp. 65-79 (Ger.).
12. Kaucher, E. (1980), "Interval analysis in extended interval space IR", *Fundamentals of numerical computation (Computer-oriented numerical analysis)*, Springer, Wien, pp. 33-49.
13. Sharyj, S.P. (2010), Finite-dimensional interval analysis, XYZ, Novosibirsk, 601 p. (rus.)
14. (2009), *On approval of the Methodology for calculating economic standards for regulating the activities of banks in Ukraine*, Resolution of the Board of the National Bank of Ukraine, 02.06.2009, No. 315, NBU (ukr.).
15. Steljmakh, V.S., Jepifanov, A.O., Salo, I.V. and Jepifanova, M.A. (2006), "*Control: inspection, audit, banking supervision*, Universytetsjka knygha, Sumy, 432 p. (ukr.).

Received (Надійшла) 21.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Дубницький Валерій Юрійович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, старший науковий співробітник ННІ "Каразінський банківський інститут" ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Valeriy Dubnitskiy – Candidate of Technical Sciences, Senior Research, Senior Research of "Karazin Banking Institute" of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: dubnitskiy@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-1924-4104.

Кобилін Анатолій Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та математичного моделювання, ННІ "Каразінський банківський інститут" ХНУ ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна;
Anatolii Kobylin – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of "Karazin Banking Institute" of V.N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: anatoliy_kam@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-8083-0762.

Кобилін Олег Анатолійович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Oleg Kobylin – Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Head of the Department of Informatics, Kharkiv National University of RadioElectronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: leg.kobylin@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0003-0834-0475.

Выполнение на мобильных устройствах арифметических операций с использованием аксиом классического и нестандартного интервального анализа

В. Ю. Дубницкий, А. М. Кобылин, О. А. Кобылин

Аннотация. Цель работы. Разработка программного обеспечения для выполнения на мобильных устройствах арифметических операций расчетов с использованием аксиом классического и нестандартного интервального анализа и сравнения их эффективности. **Результаты.** Проведено сравнение результатов выполнения арифметических операций с использованием аксиом классического и нестандартного интервального анализа. Критерием эффективности избрана величина относительного изменения заключительного интервала результатов вычислений, выполненных с использованием аксиом нестандартного интервального анализа по отношению к аналогичным вычислениям, выполненным с использованием аксиом классического интервального анализа. Для сравнения эффективности вычислительного процесса избраны нормативные показатели, которые определяют финансовую безопасность банков. Приведены сведения об особенностях программной системы оперативной оценки эффективности банковских валютных операций, предназначенной для мобильных устройств на операционной системе ANDROID. Результаты расчетов показали, что интервалы, определенные согласно с правилами нестандартной интервальной математики имеют величину интервала на 12%–90% меньше, чем вычисления, выполненные согласно с требованиями классической интервальной математики.

Ключевые слова: мобильные устройства; специализированные программные калькуляторы; интервальный анализ; финансовая безопасность банков.

Performance of arithmetical operations on mobile gadgets using axioms of classical and nonstandard interval analysis

Valeriy Dubnitskiy, Anatolii Kobylin, Oleg Kobylin

Abstract. We propose a programming system for calculation of economical standards of regulating banking activity by means of Euclidian and interval arithmetic using mobile gadgets. The program was created by means of Microsoft Visual Studio 2017 Express for Windows Phone using C#. The feature of this programming system is the possibility to be used anywhere: during business negotiations, in the absence of PCs and WiFi, etc. For its application, one needs a smartphone with Android operation system. The smartphone needs to have a capacitive screen with multi-touch input with the possibility of more than four touches at once. The size of the screen can vary, but the resolution must be 480*480 pixels. During the progress, the system calculates the indicators of banking activity approved by National bank of Ukraine. Using of the interval arithmetic gives the possibility to analyse the financial status of the bank under any conditions. The comparison of the results of arithmetical operations by using the axioms of classical and nonstandard interval analysis was carried out. The criterion of the efficiency is the value of the relative change of the final interval of the calculations that were carried out using the axioms of the nonstandard interval analysis related to the same calculations that were carried out using the axioms of the classical interval analysis. For efficiency comparison we choose standard indicators that define the financial safety of the bank. The results of the calculations show that the intervals defined according to the rules of the nonstandard interval mathematics have the size of the interval 12-90% less than the intervals calculated according to the rules of the classical interval mathematics.

Keywords: mobile gadgets; special programming calculators; interval analysis; financial safety of the bank.

УДК 534.01:621.08 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.18

Є. І. Калінін[1], І. А. Лебедєва[2], Д. О. Лисиця[1]

[1] Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна
[2] Харківська філія УкрНДІПВТ імені Л. Погорілого, Харків, Україна

ДИНАМІЧНІ ЕФЕКТИ В БАГАТОМАСОВИХ РЕОНОМНИХ СИСТЕМАХ ПРИ ВИСОКОЧАСТОТНІЙ ПУЛЬСАЦІЇ «ФОРМ» КОЛИВАНЬ

Анотація. Предметом досліджень статті є виродження першої форми при моногармонійній зміні коефіцієнта форми та за умови, коли частота пульсації «форм» коливань досягає другої парціальної частоти. Метою є оцінка можливості виродження i-ої форми коливань при різних законах зміни збуджуючого впливу та аналіз даного явища. Завдання дослідження полягають у побудові принципів оцінки впливу високочастотних пульсацій параметрів системи на вільні коливання останньої. Застосовувані методи: описання динамічних моделей диференційними рівняннями; частотний аналіз; формування амплітудно-частотних характеристик. Отримані результати: для динамічної моделі з певними показниками приводу та веденої ланки визначено, що при гармонійній зміні функції руху з частотою пульсації, що перевищує одиницю при співвідношенні коефіцієнтів демпфування більше одиниці спостерігається ефект виродження першої форми коливань, в результаті чого частота коливань веденої ланки практично відповідає другій формі. Практична значущість роботи полягає у побудові моделі формування частотних характеристик динамічної моделі при високочастотній пульсації параметрів останньої. Для виявлення цих ефектів доводиться відмовлятися від традиційних уявлень про малість інерційних складових, викликаних нестаціонарністю форм коливань.

Ключові слова: механічна система; багатомасова реономна система; високочастотні пульсації; резонансний режим, амплітудно-частотна характеристика, форми коливань.

Вступ

Широкий клас механічних систем, що включає приводи багатьох технологічних машин, механізми з нелінійною функцією розташування, інерційно-імпульсні механізми і інші, при схематизації описується динамічними моделями з параметрами, що змінюються в часі.

При динамічному дослідженні подібних систем дуже важливим фактором є інтенсивність зміни параметрів системи [1 – 5]. Для багатомасових реономних коливальних систем має велике значення також характер зміни нестаціонарних коефіцієнтів «форми» [6 – 8], причому, як буде показано нижче, з пульсацією цих функцій пов'язані деякі специфічні динамічні ефекти, що істотно змінюють відгук системи на силові і параметричні збурення.

Для виявлення цих ефектів доводиться відмовлятися від традиційних уявлень про малість інерційних складових, викликаних нестаціонарністю форм коливань.

Мета роботи – оцінка можливості виродження i-ої форми коливань при різних законах зміни збуджуючого впливу та аналіз даного явища.

Завдання дослідження полягають у побудові принципів оцінки впливу високочастотних пульсацій параметрів системи на вільні коливання останньої.

Теоретичні дослідження

Розглянемо систему диференціальних рівнянь, що описують динамічні моделі зазначеного класу:

$$\left|a_{ij}(t)\right|\{\ddot{y}_i\}+\left|c_{ij}(t)\right|\{y_i\}=\{\varepsilon Q_i\}, \qquad (1)$$

де $\left|a_{ij}(t)\right|$ та $\left|c_{ij}(t)\right|$ – матриці інерційних і квазіпружних коефіцієнтів; $\{y_i\}$ – вектор-функція узагальнених координат; $\{\varepsilon Q_i\}$ – вектор-функція узагальнених сил; ε – малий параметр.

Розв'язок однорідної системи, що відповідає (1), представлено у формі:

$$y_i=\sum_{r=1}^{H} y_{ir}=\sum_{r=1} B_{ir}(t)\cos\Phi_r(t), \qquad (2)$$

де H – число ступенів свободи.

Функції $B_{ir}(t)$ і $\Phi_r(t)$ можна трактувати як змінні амплітуди і фази коливань, причому індекс i відповідає номеру координати, а індекс r – номеру даної «форми» коливань.

Оскільки власні частоти і форми коливань, що їм відповідають, в системах зі змінними параметрами мають до певної міри умовний сенс, тому що залежать від виду прийнятого наближеного розв'язку, то ці терміни в подібних випадках будемо використовувати у лапках.

Ці функції можуть бути підпорядковані H додатковим умовам у вигляді:

$$2\frac{dB_{rr}}{dt}\Omega_r+B_{rr}\frac{d\Omega_r}{dt}=0,\ r=\overline{1,H}, \qquad (3)$$

де

$$\Omega_r=\frac{d\Phi_r}{dt}. \qquad (4)$$

Умови відносно B_{rr} і Ω_r являють собою диференціальні рівняння зі змінними, розв'язки яких можуть бути записані таким чином:

$$B_{rr}=A_{rr}\sqrt{\frac{\Omega_r(0)}{\Omega_r(t)}}. \qquad (5)$$

При цьому A_{rr} – постійні інтегрування

© Калінін Є. І., Лебедєва І. А., Лисиця Д. О., 2021

$$\ddot{y}_{rr} = -A_{rr}\, p_r^2(t)\cos\Phi_r(t)\,, \qquad (6)$$

де
$$p_r^2(t) = \Omega_r^2 - \frac{\ddot{B}_{rr}}{B_{rr}}\,. \qquad (7)$$

На підставі зіставлення $\ddot{y}_{rr}(t)$ з аналогічним виразом в системах з постійними параметрами функція $p_r(t)$ може розглядатися як змінна «власна» частота.

Далі введемо в розгляд деякі функції $\alpha_{ir}(t)$, які можна кваліфікувати як нестаціонарні коефіцієнти форми:

$$\alpha_{ir}(t) = \frac{B_{ir}}{B_{rr}}\,,\ B_{rr} \neq 0\,. \qquad (8)$$

При врахуванні (2) та (8), отримаємо:

$$\ddot{y}_{ir} = -\alpha_{ir}\, p_r^2 \left[\begin{array}{c} \left(1 - \dfrac{\ddot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}\, p_r^2}\right) B_{rr}\cos\Phi_r + \\ +2\dfrac{\dot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}} \cdot \dfrac{B_{rr}}{p_r^2}\sin\Phi_r \end{array} \right]. \qquad (9)$$

У системах з періодично змінними параметрами функція $\alpha_{ir}(t)$ при $i \neq r$ також виявляється періодичною.

Приймемо, що період цієї функції

$$\tau = 2\pi / \omega\,.$$

Далі проведемо усереднення функцій $\ddot{\alpha}_{ir} / \alpha_{ir}$ та $\dot{\alpha}_{ir} / \alpha_{ir}$ на періоді τ.

При цьому можна показати, що для розглянутого класу систем

$$\left(\frac{\dot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}}\right)_{cep} = \frac{1}{\tau}\int_0^{\tau} \frac{\dot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}}\, dt = 0\,. \qquad (10)$$

Введемо позначення

$$v_{ir}^2 = \left|\frac{\ddot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}}\right|_{cep} = \frac{1}{\tau}\left|\int_0^{\tau} \frac{\ddot{\alpha}_{ir}}{\alpha_{ir}}\, dt\right|. \qquad (11)$$

Після підстановки (2), (9) в систему однорідних рівнянь, що відповідає (1), та з урахуванням залежностей (10) і (11) отримуємо для кожного r своє формальне частотне рівняння у вигляді:

$$\det\left|c_{ij}^{(r)}(t) - p_r^2(t)\, a_{ij}(t)\right| = 0\,, \qquad (12)$$

де
$$c_{ij}^{(r)} = c_{ij} - v_{ir}^2 a_{ij}\,. \qquad (13)$$

При повільній зміні «форм» коливань $v_{ir}^2 / p_r^2 << 1$, тому в даному випадку формальне частотне рівняння виду (12) стає практично незалежним від r і, отже, загальним для всіх r.

Підкреслимо, що така ситуація не зумовлює повільність зміни параметрів системи і «власної» частоти p_r.

Представимо нестаціонарний коефіцієнт форми α_{ir} у вигляді ряду Фур'є:

$$\alpha_{ir} = b_0 + \sum_{j=1}^{\infty} b_j \cos(j\omega t + \beta_j)\,, \qquad (14)$$

де при параметрах b_0, b_j, β_j індекси i та r всюди опущені.

Тоді на підставі (8), (11), (14), отримаємо:

$$v_{ir}^2 = \frac{\omega^2}{\tau}\left|\int_0^{\tau} \frac{\sum\limits_{j=1}^{\infty} b_{jj}^2 \cos(j\omega t + \beta_j)}{b_0 + \sum\limits_{j=1}^{\infty} b_j^2 \cos(j\omega t + \beta_j)}\, dt\right|. \qquad (15)$$

При $b_0 >> j^2 b_j$ $v_{ir}^2 / \omega^2 << 1$, а в разі, якщо $\alpha_{ir} \approx b_0 + b_j \cos(j\omega t + \beta_j)$, то

$$v_{ir}^2 = j^2\left[1 - 1\Big/\sqrt{1 - (b_j / b_0)^2}\right]. \qquad (16)$$

Якщо коефіцієнт форми можна вважати моногармонічною функцією ($b_0 << b_j$), то $v_{ir}^2 = j^2\omega^2$. Нарешті, в поширеному випадку, коли

$$\alpha_{ir} \approx b_1 \cos\omega t + b_3 \cos 3\omega t\,,$$

на підставі (15), отримаємо:

$$v_{ir}^2 = 9 - 8\Big/\sqrt{\left(1 + b_3/b_1\right)^2 - 4\left(b_3/b_1\right)^2}\,. \qquad (17)$$

Конкретизуємо отриманий результат для динамічної моделі циклового механізму при врахуванні піддатливості приводу і веденої ланки (рис. 1), в якій: I_1 та I_2 – моменти інерції приводу механізму і веденої ланки; c_I та c_{II} – крутильна жорсткість в контурах I і II; ψ_I та ψ_{II} – коефіцієнти поглинання в контурах I і II; q_1 та q_2 – деформації в контурах I і II; III – функція положення $\pi(\varphi)$; M_∂ – момент двигуна; M_o – момент технологічного опору; ω – кутова швидкість.

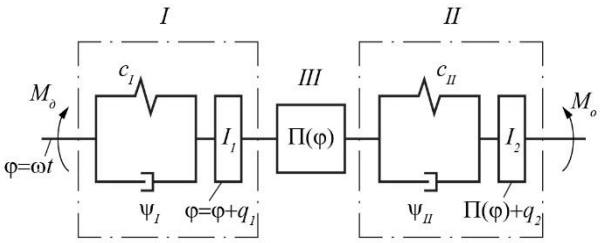


Рис. 1. Динамічна модель

Після лінеаризації функції розташування і її похідної в околі поточного значення фазового кута для визначення «власних» частот p_r може бути записана система рівнянь виду:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1 + k_1^2 q_1 - \dfrac{f}{\rho} k_2^2 q_2 = 0; \\ \ddot{q}_2 - f k_1^2 \rho q_1 + k_2^2 (1 + f^2) q_2 = -\omega^2 \dfrac{d^2\Pi}{d\varphi^2} - W, \end{cases} \qquad (18)$$

де $k_i = \sqrt{\frac{c_i}{I_i}}$; $\rho = \sqrt{\frac{I_1}{I_2}}$; $f = \frac{1}{\rho}\frac{d\Pi}{d\varphi}$; $W = \frac{M_o}{I_2}$.

Таким чином, коефіцієнти a_{ij} і c_{ij} приймають такі значення:

$$a_{11} = 1;\ a_{12} = 0;\ a_{21} = 0;\ a_{22} = 1;$$

$$c_{11} = k_1^2;\ c_{12} = -\frac{f}{\rho}k_2^2;$$

$$c_{21} = -f\rho k_1^2;\ c_{22} = k_2^2(1+f^2).$$

При цьому, оскільки

$$v_{11} = 0,\ v_{22} = 0\ (\alpha_{rr} = const = 1),$$

будемо мати

$$c_{11}^{(1)} = c_{11} \text{ та } c_{22}^{(2)} = c_{22},$$

а в силу

$$a_{12} = a_{21} = 0,\ c_{12}^{(1)} = c_{12} \text{ та } c_{21}^{(1)} = c_{21} \text{ і } c_{21}^{(2)} = c_{21}.$$

Нарешті,

$$c_{11}^{(2)} = c_{11} + v_{12}^2 a_{11};$$

$$c_{22}^{(1)} = c_{22} + v_{21}^2 a_{22}.$$

Розв'язуючи рівняння (12), знаходимо:

$$\begin{cases} \tilde{p}_1^2 = 0{,}5\left\{\sigma^2(1+f^2)+1-\xi_1^2 - \sqrt{\left[\sigma^2(1+f^2)+1-\xi_1^2\right]^2 - 4\left(\sigma^2-\xi_1^2\right)}\right\}; \\ p_2^2 = 0{,}5\left\{\sigma^2(1+f^2)+1-\xi_2^2 + \sqrt{\left[\sigma^2\left(1+f^2\right)+1+\xi_1^2\right]^2 - 4\sigma^2\left[1-\xi_2^2\left(\left(1+f^2\right)\right)\right]}\right\}, \end{cases} \quad (19)$$

де $\tilde{p}_r = \frac{p_r}{k_1}$; $\sigma = \frac{k_2}{k_1}$; $\xi = \frac{v_{ir}}{k_1}$ $(i \neq r)$.

Індексація частот p_r проведена таким чином, щоб

$$\lim_{f\to 0} p_r = k_r.$$

При цьому

$$\alpha_{21} = \frac{1-\tilde{p}_1^2}{\sigma^2 f}\rho;\ \alpha_{12} = \frac{\sigma^2(1+f^2)-\tilde{p}_2^2}{f\rho}. \quad (20)$$

На рис. 2 наведені деякі графіки функції $\tilde{p}_r(f)$, що визначені за формулами (19) при різних значеннях безрозмірних параметрів σ і ξ.

В ході аналізу залежностей (19) виявляється цікавий ефект виродження першої форми коливань при певному значенні параметра ξ.

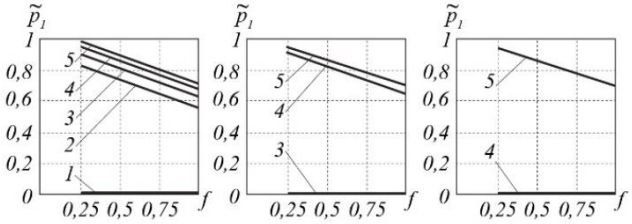


Рис. 2. Безрозмірні частотні характеристики $\tilde{p}_1(f)$:
а – $\xi = 1$; б – $\xi = 2$; в – $\xi = 4$
1 – $\sigma = 1$; 2 – $\sigma = 1{,}5$; 3 – $\sigma = 2$;
4 – $\sigma = 4$; 5 – $\sigma = 10$

Умові $\tilde{p}_1^2 \le 0$ при $\sigma > 1$ відповідає $\xi \ge \sigma$ і $\xi \ge 1$ – при $\sigma < 1$. З урахуванням формул (14) – (17) це, зокрема, означає, що, при моногармонічній зміні коефіцієнта форми, перша форма вироджується, коли частота пульсації досягає другої парціальної частоти. Ефект виродження першої форми коливань наочно проілюстрований на рис. 2.

Для кращого з'ясування фізичного прояву виявленого ефекту за допомогою системи MathLab був проведений аналіз динамічної моделі, показаної на рис. 1. Деякі з найбільш характерних режимів проаналізовані нижче. На рис. 3 представлені записи трьох режимів вільних коливань системи.

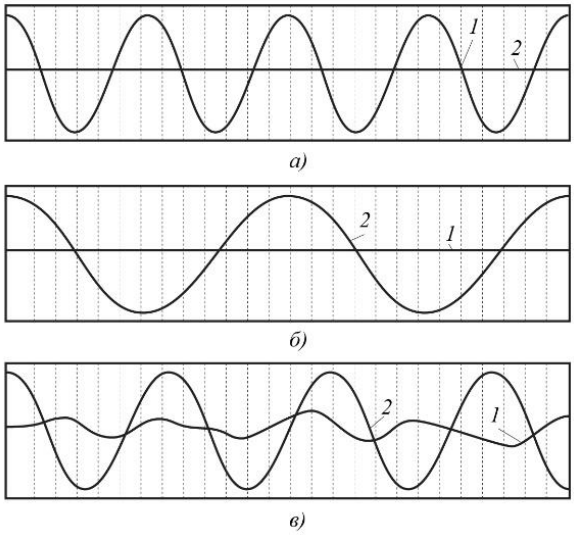


Рис. 3. Вплив високочастотної пульсації параметрів на вільні коливання:
а – $q_1(0) = 1$; $q_2(0) = 0$; $\sigma = 0{,}5$; $f = 0$;
б – $q_1(0) = 0$; $q_2(0) = 1$; $\sigma = 0{,}5$; $f = 0$;
в – $q_1(0) = 0$; $q_2(0) = 1$; $\sigma = 0{,}5$; $f_{\max} = 0{,}6$; $\xi = 3{,}5$;
1 – $q_1(t)$; 2 – $q_2(t)$

На першій з осцилограм показано запис крутильних коливань приводу, на другій – запис коливань веденої ланки, що відповідають моменту вистою, коли система розпадається на два незв'язаних коливальних контури.

Порівнюючи третій запис з першими двома, переконуємося, що при гармонійній зміні функції f

з частотою пульсації $\xi > 1$ при $\sigma < 1$ спостерігається ефект виродження першої форми коливань, в результаті чого частота коливань веденої ланки практично відповідає другій формі. Такий же результат отримано для значень $\xi \geq \sigma$ при $\sigma > 1$.

Висновки

В режимі вільних коливань досліджувалась поведінка системи в умовах порушення параметричного резонансу. Виявилося, що параметричний резонанс в системі порушується тільки за вищої «власної» частоті в зоні ξ, що близька до значення k_1. Тут слід взяти до уваги, що пульсація функцій p_r відповідає подвоєній частоті пульсації функцій *f*. Ефект виродження першої форми коливань спостерігався й в режимі вимушених коливань при різних законах зміни збурюючого впливу W.

На рис. 4 представлені осцилограми режиму вимушених коливань в умовах силового резонансу. Їх аналіз показує, що силовий резонанс при високочастотній пульсації «форм» коливань порушується тільки за другою формою (рис. 4, а), коли частота збурення $\omega_в$ близька до p_2. Побудована за результатами моделювання амплітудно-частотна характеристика (рис. 5) наочно ілюструє відгук системи на силове збурення при $\xi = 3{,}5$. Силовий резонанс по першій формі коливань, що має місце при повільній зміні першої передавальної функції, в цьому режимі не спостерігається.

Наукову новизну проведеного дослідження складає виявлене явище виродження першої форми при моногармонійній зміні коефіцієнта форми та за умови, коли частота пульсації «форм» коливань досягає другої парціальної частоти. Практична значущість роботи полягає у побудові моделі формування частотних характеристик динамічної моделі при високочастотній пульсації параметрів останньої.

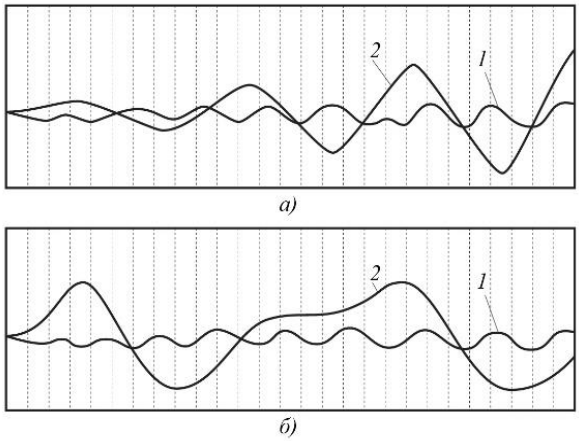


Рис. 4. Вплив високочастотної пульсації параметрів на резонансні режими
($q_1(0) = q_2(0) = 0$; $f_{\max} = 0{,}8$; $\xi = 3{,}5$;
$W_{\max} = 0{,}8\ \text{с}^{-2}$; $k_1 = 1$ рад/с; $k_2 = 0{,}5$ рад/с):
а – $\omega_в = 1$ рад/с; б – $\omega_в = 0{,}5$ рад/с;
1 – $q_1(t)$; 2 – $q_2(t)$

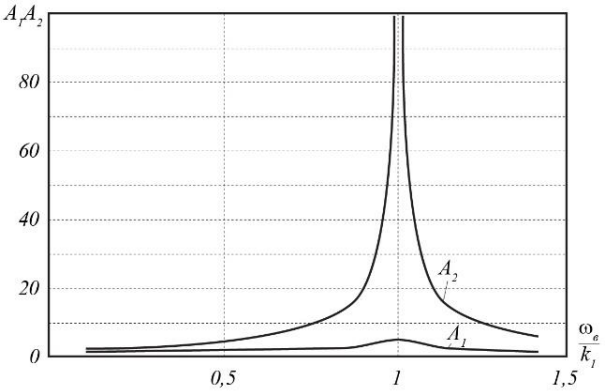


Рис. 5. Амплітудно-частотна характеристика (A_1 та A_2 – безрозмірні амплітуди коливань в контурах I та II)

REFERENCES

1. Shoshani O., Shaw S.W. & Dykman M.I. (2017) *Anomalous Decay of Nanomechanical Modes Going Through Nonlinear Resonance*. Sci Rep 7, pp. 189-197, DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-017-17184-6
2. Arnold V. I. (1989) *Mathematical Methods of Classical Mechanics*, Springer, New York.
3. Bernardo M., Budd C.J., Champneys A.R., Kowalczyk P. (2008) *Piecewise-Smooth Dynamical Systems: Theory and Applications, Springer-Verlag*, London.
4. Bernardo M., Budd C.J., Champneys A.R., Kowalczyk P., Nordmark A., Tost G., Piiroinen P. (2008) "Bifurcations in non-smooth dynamical systems", *SIAM Rev.*, 50, pp. 629-701, DOI: https://doi.org/10.1137/050625060
5. Buzzi C., Pessoa C., Torregrosa J. (2013) "Piecewise linear perturbations of a linear center", *Discrete Contin. Dyn. Syst.*, 33, pp. 3915-3936, DOI: https://doi.org/10.3934/dcds.2013.33.3915
6. Galvanetto U., Bishop S.R. (1999) "Dynamics of a simple damped oscillator undergoing stick-slip vibrations", *Meccanica*, 34, pp. 337-347, DOI: https://doi.org/10.1023/A:1004741715733
7. Giannakopoulos F., Pliete K. (2001) "Planar system of piecewise linear differential equations with a line of discontinuity", *Nonlinearity*, 14, pp. 1611-1632, DOI: https://doi.org/10.1088/0951-7715/14/6/311
8. Guardia M., Hogan S.J., Seara T.M. (2010) "An analytical approach to codimension-2 sliding bifurcations in the dry-friction oscillator", *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.*, 9, pp. 769-798, DOI: https://doi.org/10.1137/090766826
9. Oestreich M., Hinrichs N., and Popp K. (1995) "Dynamical behaviour of friction oscillators with simultaneous self and external excitation". *Sadhana (Indian Academy of Sciences)*, 20, pp. 627-654
10. Guardia M., Seara T.M., Teixera M.A. (2011) "Generic bifurcations of low codimension of planar Filippov systems", *J. Differential Equations*, 250, pp. 1967-2023, DOI: https://doi.org/10.1016/j.jde.2010.11.016
11. Kowalczyk P., Bernardo M., Champneys A.R., Hogan S.J., Homer M., Piiroinen P.T., Kuznetsov Yu.A., Nordmark A. (2006) "Two parameter discontinuity-induced bifurcations of limit cycles: classification and open problems", *Internat. J. Bifur. Chaos Appl.Sci. Engrg.*, 16 (3), pp. 601-629, DOI: https://doi.org/10.1142/S0218127406015015

12. Llibre J. and Zhang X. (2002) “Polynomial first integrals for quasihomogeneous polynomial differential systems”, *Nonlinearity*, 15, pp. 1269-1280, DOI: https://doi.org/10.1088/0951-7715/15/4/313
13. Makarenkov O. and Lamb J. S. W. (2012) “Dynamics and bifurcations of nonsmooth systems: A survey”, *Physica D*, 241, pp. 1826-1844, DOI: https://doi.org/10.1016/j.physd.2012.08.002
14. Reyn J. (2007) *Phase Portraits of Planar Quadratic Systems. Mathematics and Its Applications*, 583, Springer, New York

Received (Надійшла) 24.08.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.09.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Калінін Євген Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювальної техніки та програмування, Харківський національний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;
Yevhen Kalinin – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: kalininhntusg@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-6191-8446.

Лебедєва Ірина Анатоліївна – старший науковий співробітник, Харківська філія Українського НДІ прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імю Леоніда Погорілого, Харків, Україна;
Irina Lebedeva – Senior Researcher, Kharkiv Branch of the Leonid Pogorily Ukrainian Research Institute for Forecasting and Testing of Machinery and Technologies for Agricultural Production, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: hfukrndipvt@gmail.com; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-1349-0702.

Лисиця Дмитро Олександрович – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри обчислювальної техніки та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»**,** Харків, Україна;
Dmytro Lysytsia– Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer of Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine;
e-mail: lysytsia-mail@ukr.net; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-1778-4676.

Динамические эффекты в многомассовых реономных системах при высокочастотной пульсации «форм» колебаний

Е. И. Калинин, И. А. Лебедева, Д. А. Лисица

Аннотация. Предметом исследований статьи является вырождение первой формы при моногармоническом изменении коэффициента формы и при условии, что частота пульсации «форм» колебаний достигает второй парциальной частоты. **Целью** является оценка возможности вырождения *i*-й формы колебаний при различных законах изменения возбуждающего воздействия и анализ данного явления. Задачи исследования заключаются в построении принципов оценки воздействия высокочастотных пульсаций параметров системы на свободные колебания последней. **Применяемые методы**: описание динамических моделей дифференциальными уравнениями; частотный анализ; формирование амплитудно-частотных характеристик. **Полученные результаты:** для динамической модели с определенными показателями ведущего и ведомого звена определено, что при гармоничном изменении функции движения с частотой пульсации, которая превышает единицу, при соотношении коэффициентов демпфирования больше единицы, наблюдается эффект вырождения первой формы колебаний, в результате чего частота колебаний ведомого звена практически соответствует второй форме. **Практическая значимость работы** заключается в построении модели формирования частотных характеристик динамической модели при высокочастотной пульсации параметров последней. Для выявления этих эффектов приходится отказываться от традиционных представлений о малости инерционных составляющих, вызванных нестационарностью форм колебаний.

Ключевые слова: механическая система; многомассовая реономная система; высокочастотные пульсации; резонансный режим, амплитудно-частотная характеристика, формы колебаний.

Dynamic effects in multi-mass rheonomic systems at high-frequency ripple of "forms" of oscillations

Yevhen Kalinin, Irina Lebedeva, Dmytro Lysytsia

Abstract. **The subject of research** in the article is the degeneration of the first form with a monoharmonic change in the form factor and provided that the pulsation frequency of the "forms" of oscillations reaches the second partial frequency. **The goal** is to assess the possibility of degeneration of the *i*-th form of oscillations under various laws of change in the exciting effect and to analyze this phenomenon. The objectives of the study are to build principles for assessing the impact of high-frequency pulsations of system parameters on the free oscillations of the latter. **Applied methods:** description of dynamic models by differential equations; frequency analysis; formation of amplitude-frequency characteristics. **The obtained results**: for a dynamic model with certain indicators of the leading and driven links, it was determined that with a harmonious change in the motion function with a pulsation frequency that exceeds one, when the ratio of the damping coefficients is greater than one, the effect of degeneration of the first mode of vibration is observed, as a result of which the oscillation frequency of the driven link practically corresponds to the second form. **The practical significance of the work** lies in the construction of a model for the formation of frequency characteristics of a dynamic model with a high-frequency pulsation of the parameters of the latter. To identify these effects, one has to abandon the traditional ideas about the smallness of inertial components caused by the nonstationarity of vibration modes.

Keywords: mechanical system; multi-mass rheonomic system; high-frequency pulsations; resonance mode, amplitude-frequency characteristic, vibration modes.

UDC 378.4: 658.012 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.19

Valentyn Kozlov [1], Yury Kozlov [2], Inna Moshchenko [2], Olena Novykova [1], Victor Olenchenko [1]

[1] National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine
[2] Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

IMPLEMENTATION INFORMATION TECHNOLOGY OF COMPETENCY ASSESSMENT METHOD OF PROFESSIONAL ACTIVITY OF THE EDUCATIONAL SYSTEM EMPLOYEE

Abstract. Consistent and gradual spread in the West of the concept of "competence" in the practice of postgraduate education, professional development and retraining of professional personnel has led to the emergence in the education system of the concept of the so-called competency approach. Based on this concept, the International Labor Association introduces the concept of "key competencies", which include subject and social components, in the qualification requirements for professionals. The accumulated experience of implementing the competency approach in the education system has shown the presence of a number of problems due to the complexity of assessing the process and results of professional activities of educators. This problem has caused a flow of publications, varying in type, volume and content, from reputable and titular scholars to primary school teachers, the number of links to which there are millions on the Internet. The presence of many publications encourages the search for ways to solve the problem using the methods of qualimetry and information technology. In the article the information technology of the decision of problems of an assessment of professional activity of the educational system employee based on the competency approach is considered and offered for practical application. The essence of the method: a group of experts makes an information model (professiograms) of the educational system' employee – lists (thesaurus and alphabetical index) of the evaluated features – the range of powers (competencies in the sense of professional capacity), as well as the set of knowledge, skills and personal characteristics (competencies in the sense of expertise); each assessment object the experts compare for each of the features and assign a point on a four-point scale of the order that characterizes the degree of compliance of the assessment object to a particular feature; the obtained sets of assessments (personograms) are processed accordingly; the processing result (ranked list) is submitted to the decision maker. As an example of application of the method, the procedure of assessment the professional activity of a group of beginning teachers of a higher education institution is considered.

Keywords: competency; competence; expert method; information technology; decision making.

Introduction

The concept of competency approach as a method of assessment the professional activity of specialists is widespread in the West education system. Based on this concept, the International Labor Association introduces the concept of "key competencies", which include subject and social components, in the qualification requirements for specialists [1].

Problem formulation. The accumulated experience of applying the concepts of "competence" (from Ukrainian "компетенція", in the sense of professional capacity) and "competency" (from Ukrainian "компетентність", in the sense of expertise) in the practice of postgraduate education, professional development and retraining of professional personnel has shown that there is a problem related to the assessment of process and result professional activity in any area of human activity. The scientific approach to solving this issue is based on the application of qualimetry methods, which studies and implements procedures for quantitative assessment of product quality (product, process, service, etc.) [2, 3]. Thus, one of the ways to solve the problem of assessment the professional activity of a specialist in any area is to develop a suitable for practical application of appropriate information technology based on a competency approach.

Analysis of information sources. The experience of the authors in higher education institutions shows that the use of not very accurate and ambiguous terms makes it difficult to understand some provisions in scientific and educational activities. This maxim can be extended to any area of human activity.

In the search engines Google, Bing, Meta and Yandex on the retrieval query "terms" (from Ukrainian "терміни", in the sense of the concept, definition) found 17.1; 1.3; 13.4 and 21.9 million links respectively; on the retrieval query "competency approach" (from Ukrainian "компетентнісний підхід") – 2.93; 0.04; 1.80; 6.00 million links respectively; and on the retrieval query "competency approach in education" (from Ukrainian "компетентнісний підхід в освіті") – 3.94; 0.22; 2.70; 7.00 million links respectively. A Google search for "competence method" returned approximately 121 million results.

Obviously, there is an excess of information – a source of uncertainty, as opposed to lack of information. Since scientific activity is aimed at reducing uncertainty in a particular subject area, we define the object of research – the process of human activity in a particular field, and the subject of research – information technology for implementation of the competency method of assessment the professional activity of the educational system employee.

In this sense, we briefly analyze the state of the competency method as a subject area.

Among the English-language electronic sources, the first in terms of relevance in the search engine, we note a excursus [4] given in Wikipedia on the history of its origin in 1959 and the improvement of the concept of "competency" (from Ukrainian "компетентність") to

© Kozlov V., Kozlov Yu., Moshchenko I., Novykova O., Olenchenko V., 2021

our time. Note that competency researchers did not agree on a single term of this definition. In our opinion, the so-called model of competency [5] can be considered acceptable, which will be given in translation and in the language of the original:

"Компетентність – це низка знань, умінь, навичок, досвіду та поведінки, що призводить до ефективного виконання індивідуальної діяльності. Компетентність вимірюється і може бути розвинена шляхом навчання. Її також можна розбити на менші критерії. (Competency is a series of knowledge, abilities, skills, experiences and behaviors, which leads to the effective performance of individual's activities. Competency is measurable and could be developed through training. It is also breakable into the smaller criteria)".

Principled in this definition is the possibility of measuring each of the components – knowledge, skills, etc. – that is, a list of what needs to be assessing.

Issues and problems of competence-based learning are considered in a large number of publications related to the formation and assessment of competencies in specific most popular subject areas (such as electronic [6] or communication [7]), as well as current trends in education in the West [8, 9]. A glossary of educational reform [9] can be considered a generalization, which highlights their content and meaning.

Competency assessment methods, which are described in sufficient detail in [10], calls for the availability of assessors, a list of competencies and criteria for their assessment, a description (algorithm) of the assessment process, as well as, preferably, the appropriate software.

In the fundamental work [11] the historical and social reasons of the problem of competency/ incompetency, which arose at the end of the sixties of the last century are considered.

Analysis of the development of education in the West [12] shows the trends of implementation and the main advantages of the competency approach in comparison with the so-called "knowledge" (from Russian "знаниевый"), the direction of restructuring the pedagogical process of modern education.

The paper [13] considers the purpose and objectives of modern education – the formation of key competencies, and competency is interpreted as knowledge-based, intellectually and personally conditioned experience, recorded in the form of competencies, including attitudes toward themselves as individuals, to interact with others, to activities in its various types and forms.

The essence of the work [14] is the possibility of combining in education the attitude to the development of the personality of the subject of study and practice-oriented formation of competencies based on the competency approach.

The book [15] provides a classification of competencies on key, universal, meta-subject, subject. The approach to diagnostics and assessment of competences of subjects of training, typology of competences as a basis for changes of educational environment is offered.

The study [16] provides a multi-level definition and characteristics of competency, it is emphasized that you can become competent by mastering certain competencies and implementing them in the experience of a particular activity.

From the many different by types, volumes and content of publications related to the research issue, authored by reputable and titular scholars to primary school teachers, it follows that different interpretations of the competency approach and its components do not determine what should be assessing and do not establish clear criteria and methods for processing the results of the relevant assessment.

In addition, in the interpretation of the competency approach there is confusion associated with the understanding of some authors of the concepts' synonymy (as in English) of "competence" (from Ukrainian "компетенція") and "competency" (from Ukrainian "компетентність"), and when they are distinguished – in understanding the process leading to receipt the competency, – formation of key competencies or acquisition of competence through the formation of competencies. It follows that competence cannot be considered as a component of competency and vice versa.

We emphasize that when developing terms in any area of human activity, special requirements are taken into account [17], [18], and the limits of terms are set by legislative, regulatory, administrative, administrative and/or other documents.

We quote several related legally established terms [19]:

"… Quality of higher education – a set of qualities of a person with higher education, which reflects his professional competency… (… Якість вищої освіти – сукупність якостей особи з вищою освітою, що відображає її професійну компетентність…)".

"… Competency – a dynamic combination of knowledge, skills and practical skills, ways of thinking, professional, ideological and civic qualities, moral and ethical values, which determines a person's ability to successfully carry out professional and further educational activities and is the result of training at a certain level of higher education (Article 1, Part 1, item 4); … Educational (educational-professional, educational-scientific or educational-creative) program - a system of educational components…, as well as the expected learning outcomes (competencies), which must be mastered by the applicant for a relevant higher education degree (Article 1, Part 1, item 17); … Learning outcomes – knowledge, skills, abilities, ways of thinking, views, values, other personal qualities that can be identified, planned, assessed and measured and which a person is able to demonstrate after completing the educational program or individual educational components (Article 1, Part 1 , item 19)" (… Компетентність – динамічна комбінація знань, вмінь і практичних навичок, способів мислення, професійних, світоглядних і громадянських якостей, морально-етичних цінностей, яка визначає здатність особи успішно здійснювати професійну та подальшу навчальну діяльність і є результатом навчання на

певному рівні вищої освіти (ст. 1, ч. 1, п. 4); … Освітня (освітньо-професійна, освітньо-наукова чи освітньо-творча) програма – система освітніх компонентів …, а також очікувані результати навчання (компетентності), якими повинен оволодіти здобувач відповідного ступеня вищої освіти (ст. 1, ч. 1, п. 17); … Результати навчання – знання, уміння, навички, способи мислення, погляди, цінності, інші особисті якості, які можна ідентифікувати, спланувати, оцінити і виміряти та які особа здатна продемонструвати після завершення освітньої програми або окремих освітніх компонентів (ст. 1, ч. 1, п. 19)".

By the way, the General Conference of the International Labor Organization recommends [1] to define "competency" as a term that encompasses knowledge, skills and work experience applied and improved in specific conditions.

The above allows us to offer compiled from sources [1, 11, 16, 19, 20, 21, [22], generalized definitions that meet the requirements of [17, 18]:

- competence – the range of powers (rights and responsibilities) granted by law, charter or other act to a specific body, official or employee;

- competency – awareness – knowledge and experience (skills and abilities) - in a particular subject area or in a particular issue, as well as personal characteristics;

- qualification – an official reflection of the degree of technical or professional skills of the employee, recognized at the international, national or sectoral level.

These terms imply the presence of assessment methods: firstly, competencies as a result of upbringing and training (learning) for professional activities in any area, in fact – the quality of human education (indirect indicator of the quality of educational activities of the employee of the educational system); secondly, competencies as a result of professional activity of the individual.

In other words, for a specialist of a certain level of qualification there should be a model that determines the level of his competency – education (and upbringing) – on the one hand, and on the other – a subjective characteristic that reflects the quality of his professional activity and, as a consequence, the person's suitability for the position, that is his qualification level.

Next, we will distinguish between the competency approach as the joint development of personality and the formation of competencies of the subject (very similar to the so-called educational process) and the competency method as a method of assessment the degree of individual' preparedness for a particular type of professional activity.

Thus, the above determines the relevance and **purpose of the publication**, annotated in the title – to develop and propose for practical application of information technology to solve the problem of assessment the professional activity of an employee of the education system, based on a competency approach.

Research results

The purpose and tasks of the research. The purpose of the study is to develop and propose for practical application a single method for solving the problems of assessment the results of professional activity of an educational system' employee (ESE) on the basis of a competency approach, suitable for implementation using information technology.

Research tasks:

- to determine the method of developing models of specialists, to formulate clear criteria for assessment the professional activity' results;

- to develop a model of an ESE;

- to determine the method of processing the results of the assessment the professional activity of an ESE;

- to develop information technology for solving problems of assessment the professional activity of an ESE by the competency method and to check the possibility of its application in practice.

The choice of method of solving problems of assessment of a specialist' professional activity. The task of assessment the professional activity of specialists is solved in conditions of uncertainty due to lack of information about specialists – comparison objects (CO), inaccuracy of the CO' features (properties) description, imperfection of methods of assessment of CO' features, etc. The scientific and methodological approach to solving such problems is considered in sufficient detail in electronic and literary sources, which allows us to believe that most of these problems are solved using expert methods [23].

The veracity of the decisions (recommendations) on the comparison objects depends on the completeness and adequacy of their models.

Method of developing models of specialists. The information model of a specialist in any area of human activity – a professiogram – should be presented as a set of several components, such as competencies (from Ukrainian "компетенція") and competencies (from Ukrainian "компетентність").

Competences are set by laws, regulations, charters, departmental instructions and other administrative documents. The list of competencies (rights and responsibilities) is actually a subjective component of the model of a specialist (official) of a certain level of qualification.

Lists of relevant competencies are lists of individual' general properties and personality traits (features of upbringing) and education (preparedness for professional activity) – components that reflect the results of direct and indirect activities of the family and society in relation to the individual.

The method of developing an information model is considered in [24]. The development process involves the customer, developer and users, whose task is to choose terms that describe the relevant features (properties, characteristics, parameters, etc.), which have encyclopedic definitions or are given in explanatory dictionaries, and which can be considered standardized. Linguistic processing of terms and definitions by two main groups of synonyms -

conceptual (ideographic) and stylistic – is in progress. Thus ideographic synonyms, and also antonyms of concepts are includes in the final list.

The complexity of the tasks of assessment the professional activity of specialists necessitates the use of a decision support system, the purpose of which is determined by the content of its knowledge base [23]. The heuristic method of presenting knowledge in the form of a frame (Fig. 1) involves the presence of a thesaurus to describe the subject area; an alphabetical index of concepts, terms and definitions is used as a linguistic means of data manipulation.

Together, they compile an out-of-machine knowledge base for experts and a knowledge base (frame and slot names) used directly by the computer in computational procedures.

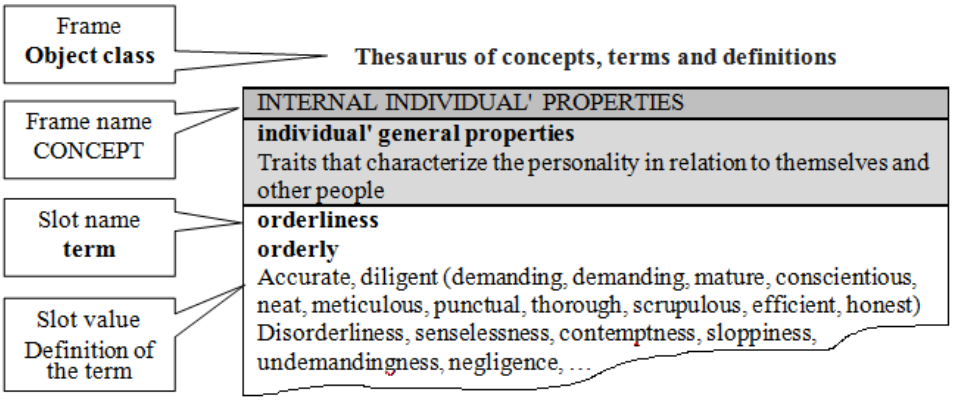


Fig. 1. Graphic representation of the fragment frame description of the model

The procedure for developing a professiogram using the expert method of assigning points on a four-point scale is considered in [25]: each of the set of features is assessed by each of the experts according to the rules (Table 1) as an answer (judgment) to questions (statements) such as "Does a particular feature describe a specialist as an comparison object?"; for each of the features, the assessments of experts are averaged and presented in the values of the improved four-point scale (IFPS) [26].

Table 1 – **Correspondence of judgments to scores of the rating scale**

Rule	Point
Yes	5
More likely yes than no	4
More likely no than yes	3
No	2

Note that the use of arithmetic mean to assessing the results obtained by non-numerical nature data does not contradict the theory for narrow scales [27], which is confirmed by the results of calculations [28].

Method of processing the results of assessment of professional activity. The results of professional activity of any comparison object are assessing according to the appropriate professiogram – the model of the specialist.

Both quantitative scales and order scales are often used when assessing professiogram features [2]. It is difficult to get directly some generalized indicator that characterizes the quality of CO in general. If the results of instrumental measurements are translated into order scales, the problem is solved, and the generalized indicator can be given in the order scale. In this case, the measurement of the properties (features) of the CO by the expert method of assigning points is performed, using the decision on the assessment result as an answer to the question "Does a particular feature inherent to this comparison object?" (Table 1). This procedure is quite similar to that used in compiling the professiogram and discussed above.

Assume that the professiogram includes the competencies of upbringing, education, especially important in the initial selection, and the competencies of professional activities that can serve to monitor the formation of the specialist and his experience.

Competency of upbringing implies the presence of a list of general personality traits (in alphabetical order) – accuracy, altruism, demanding, ingenuity, responsibility, etc. [29].

Competency of education may include in the set of characteristics the average scores in the profile disciplines of professional activity, preparedness of the previous level, the results of Eysenck tests and special tests, and so on.

Competences in the form of a list of powers (rights and responsibilities) of a specialist or official define the subjective component of the professiogram, which determines the professional suitability or compliance with the position of the assessment (comparison) object. These may be signs of the responsibilities of the delineated boundaries of the field of professional activity, such as methodological, educational components, etc.

These competencies are assessed by experts (managers, colleagues or employees, subordinates, consumers of the results of professional activities of the CO) on a four-point scale (Table 1) as response to questions such as "Does the comparison object cope with their responsibilities?" or any other question that allows to determine the degree of implementation of the

CO of their powers in practice based on the results of processing expert assessments. To this list can be added assessments of the results of scientific work of the teacher, similar to the indicators of activity of higher education institutions teachers, listed in the License Terms [30] (item 6), determined on an absolute scale and transferred to IFPS.

Thus, the method of processing personograms as a result of assessment the professional activity involves the calculation of either the coefficient of conformity K_c, or a modified coefficient of concordance (MCC) [31]. The latter should be used as a means of rapid analysis, and K_c allows you to present the results of calculations in the form of a petal diagram. Its form can determine some features of the specialist as assessment object, but this issue needs to be discussed separately. Based on the results of the calculations, a ranked list is compiled and submitted to the decision-maker.

Practical application of research results. Consider an example of the application of the competency method of assessment the results of selection and professional activity of a group of beginning teachers of higher education institution (as the closest to the authors of the field), conventionally named as A, B, C and D.

In Fig. 2 shows the estimates of the general properties of the comparison object A, presented by eleven experts, and their average values by experts; the original data is real. Similar data were obtained for other CO.

In Fig. 3 shows the processed results of assessing the upbringing and education competencies of all four comparison objects.

In Fig. 4 shows the visualized components of the personogram of comparison object A in the form of petal diagrams for 25 features of upbringing competency (Fig. 4, a), which reflect the quality of assimilation of moral norms in accordance with the requirements [32], 18 elements of education competency (knowledge, skills and abilities) general and professional orientation (Fig. 4, b) and 13 competencies of professional activity (Fig. 4, c).

A	1	2	3	…	10	11	Average Value
1	5	4	5		4	4	4.35
2	5	5	4		4	5	4.46
…							
24	4	5	5		4	4	4.52
25	4	5	5		4	4	4.40

Fig. 2. A fragment of the results of expert assessment of the upbringing competency of the comparison object A

Upbringing	A	B	C	D
1	4.35	4.57	4.33	4.48
2	4.46	4.48	4.33	4.48
…				
24	4.52	4.57	4.62	4.62
25	4.40	4.43	4.57	4.29

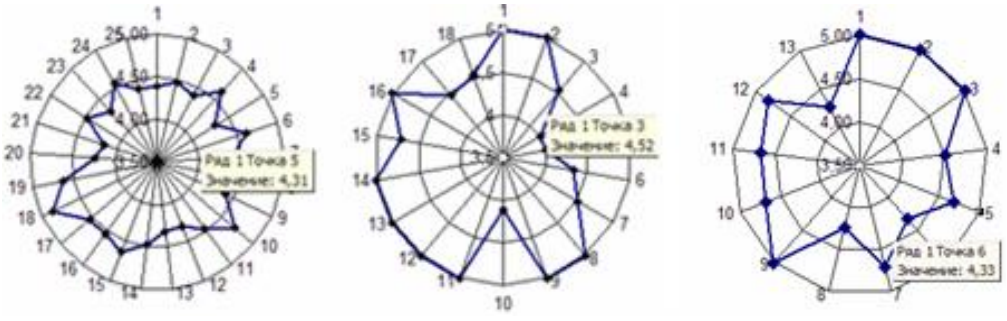
а

Education	A	B	C	D
1	4.35	4.57	4.33	4.48
2	4.46	4.48	4.33	4.48
…				
24	4.52	4.57	4.62	4.62
25	4.40	4.43	4.57	4.29

б

Fig. 3. A fragment of the processed results of expert assessment of upbringing and education competencies of the comparison objects

Assessments of the components personograms of comparison objects A, B, C and D for the competency method are given in tables 2 and 3 for the coefficients of conformity and the modified concordance coefficient.



a b c

Fig. 4. Components of the personogram of the comparison object A

Table 2 – **The results of calculations of CO indicators for** K_c

Personogram components	Comparison objects			
	A	B	C	D
Education	0.8757	0.8992	0.7963	0.8198
Upbringing	0.7941	0.8109	0.8145	0.8014
Professional activity	0.8020	0.8148	0.8264	0.8118
Generalized compliance indicator	0.8239	0.8416	0.8124	0.8111
Rank	2	1	3	4

Table 3 – **The results of calculations of CO indicators for MCC**

Personogram components	Comparison objects			
	A	B	C	D
Education	0.8913	0.9150	0.8194	0.8439
Upbringing	0.8185	0.8343	0.8379	0.8256
Professional activity	0.8262	0.8386	0.8490	0.8348
Generalized compliance indicator	0.8453	0.8626	0,8354	0.8347
Rank	2	1	3	4

For comparison in tables 4 and 5 show the results of calculations for the arithmetical average values of the comparison objects, as well as the results of processing the median values of assessments by the methodic, which involves the calculating Euclidean distances R_E and ranking by the criterion of increasing these distances [33].

Table 4 – **The results of calculations of CO indicators for average values of assessments**

Personogram components	Comparison objects			
	A	B	C	D
Education	4.69	4.76	4.43	4.50
Upbringing	4.46	4.50	4.51	4.48
Professional activity	4.48	4.52	4.55	4.50
Generalized compliance indicator	4.54	4.59	4.50	4.49
Rank	2	1	3	4

Table 5 – **The results of calculations of CO indicators for median values of assessments**

Personogram components	Comparison objects			
	A	B	C	D
Education	4.86	5.00	4.43	4.52
Upbringing	4.46	4.50	4.55	4.45
Professional activity	4.46	4.43	4.54	4.49
Generalized compliance indicator	4.59	4.64	4.51	4.50
Rank	2	1	3	4
R_E	0.3615	0.0000	0.4217	0.5213
Rank on R_E	2	1	3	4

The generalized indicator of conformity is defined as the arithmetical average values of the components of education, upbringing and professional activity. It can also be calculated using the weight of each of the components determined by the expert method of ranks by the weight method [2].

Comparison of the contents of tables 2 - 5 shows a complete coincidence of ranking results, which indicates the adequacy of the implemented processing method to known ranking methods, as well as the compliance of the concept of stability, according to which "the results of data processing, which are invariant with respect to the processing method, correspond to reality, and the results, which depend on the processing method, reflect the subjectivity of the researcher, not objective relations" [2].

Conclusion on the results of the application of the competency method of assessing the professional activity of a group of beginning teachers of higher education institution: the order of alignment of comparison objects – B, A, C and D.

This conclusion can be used to solve a staffing issues.

Discussion of research results. The advantage of this method is its implementation in accordance with the general scheme of information technology of decision support, a simplified block diagram of which in the notation IDEF0 [34], is shown in Fig. 5.

The area of application of this information technology is determined by filling the knowledge base of the software with information about the properties of the comparison object, and the database – the results of assessing its properties (in the case of solving the tasks of assessing the professional activity of ESE – these are the relevant professiograms and personograms).

In order to ensure the use of proposed information technology to solve personnel issues in higher education institutions, a certain range of authorized persons of the educational and methodical department, personnel department, postgraduate and doctoral departments, as well as heads of departments and leading teachers, independent experts, etc. are involved.

Information technology procedures are performed in any sequence using tools and software. Output is a rating list of CO, which is provided to the decision maker.

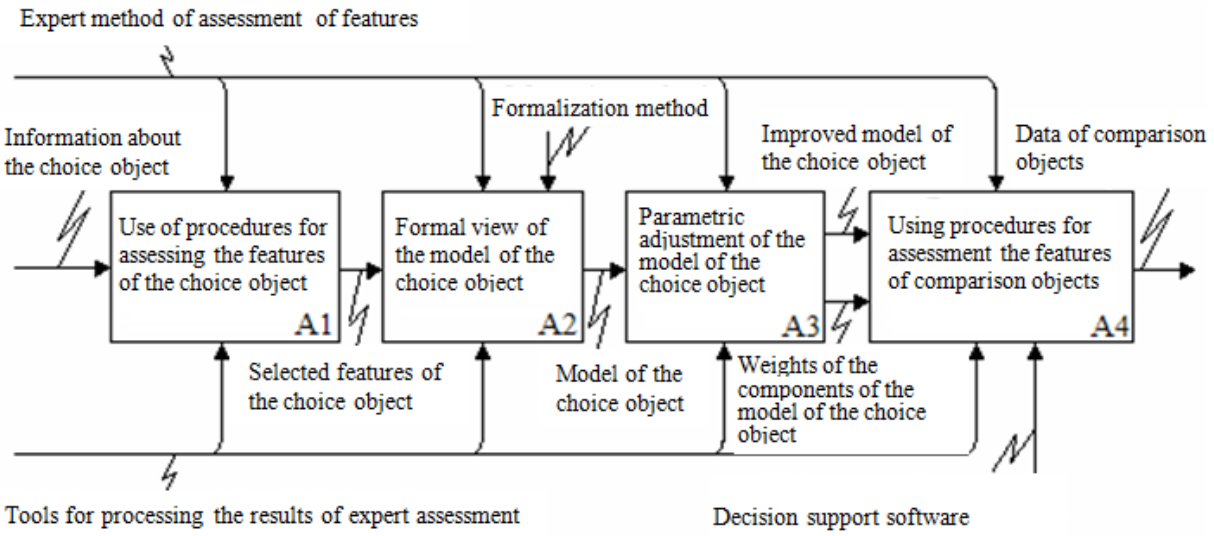


Fig. 5. Information technology to support decision making

Filling the database and knowledge base with data on the properties of the comparison object of any nature can support the decision of the choice task in other areas of human activity, but the software that implements the developed technology is virtually untested in areas other than pedagogical qualimetry, which can be considered a disadvantage of the research.

Conclusions and prospects for further research

The information technology of solving the tasks of assessment the professional activity of an education system employee brought to realization in the form of a software product is offered.

The information technology based on the competency method is allows to solving the following tasks: development of a professiogram - information model of a specialist – teacher, assessment of the results of his professional activity according to the professiogram (obtaining a personogram) and processing the assessed results on a personal computer.

For the first task, the initial data is a list of competencies (required knowledge, skills and abilities) and a list of competencies (range of functional responsibilities and powers); for the second task – the results of assessment (measurement) of the features of the professiogram on scales of order, intervals, relations and absolute scale, reduced to an improved four-point scale of order. Both tasks are solved by the expert method, and the main requirement for experts is impartiality and competence in a certain field of activity.

Further research should be aimed at solving problems of assessment of cognitive competency (knowledge of methodological, didactic-methodical, subject-professional, organizational-technological techniques and ability to apply them in everyday professional activities), information-communicative competency (knowledge, skills and abilities in the field of information – telecommunication technologies of a certain level of professional activity), competency of self-improvement (certain knowledge, skills and abilities in the field of learning technology – psychophysiology of mental work, organization of self-study, rational reading, etc.).

One of the areas of research can be considered the check of possibility of using the proposed information technology to solve the problem of comprehensive assessment of higher education institutions and its comparison with the known method based on the calculation of the generalized volume of m-simplex [35].

References

1. (2016), -Recommendation 195. Recommendation on Human Resource Development: Education, Training and Continuing Learning. Avaitable: http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/ed_norm/normes/documents/normativeinstrument/wcms_r195_ru.htm.
2. Shishkin, I. F. (1990), *Metrology, standardization and quality management*, Publishing house of standards, Moscow, 343 p.
3. Krylova, G. D. (2002), *Basics of standardization, certification and metrology*, YUNITI-DANA, Moscow, 711 p.
4. (2020), Competence (human resources). From Wikipedia, the free encyclopedia, avaitable: https://en.wikipedia.org/wiki/Competence_(human_resources).
5. Maaleki, A. (2018), *The ARZESH Competency Model : Appraisal & Development Manager's Competency Model*. Lambert Academic Publishing, 112 p., avaitable: https://www.researchgate.net/publication/324835915.
6. (2020), *Methodology European e-Competence Framework*, avaitable: https://www.ecompetences.eu/methodology.
7. (2020), *Methodology of a system of professional competence*, avaitable: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1229545014000187.
8. (2020), *Great Schools Partnership*, Increasing the Racial, Ethnic, and Linguistic Diversity of the Educator Workforce, avaitable: https://www.greatschoolspartnership.org.

9. (2014), *The Glossary of education reform*, available: https://www.edglossary.org/competency-based-learning.
10. (2019), *Competency-Assessment-Methods, Who should assess competencies*, available: https://www.cognology.com.au/learning_center/competency-assessment-methods.
11. Raven, J. (2002), *Competence in modern society: identification, development and implementation*, Kogito-Center, Moscow, 396 p.
12. Ogurtsov, A. P. and Platonov, V. V. (2004), *Images of education. Western philosophy of education. XX century*, RHGI, St. Petersburg, 520 p.
13. Zimnyaya, I. A. (2004), *Key competences as a result-based basis of the competence approach in education. Author's version*, Research Center for the Problems of the Quality of Training of Specialists, Moscow, 42 p.
14. Verbytskyy, A. A. and Laryonova, O. H. (2009), *Personality and competence approaches in education. Problems of integration*, Logos, Moscow, 336 p.
15. Khutorskoy, A. V. (2013), *Competency approach in training*, Scientific and methodological manual, New Standards Series, Éydos, Institute of Human Education Publishing, Moscow, 73 p.
16. Holovan, M. S. (2008), "Competence and competence: experience of theory, theory of experience", *Higher education in Ukraine*, No. 3, pp. 23-30.
17. Dyakov, A .S., Kiyak, T. R. and Kudel'ko, Z .B. (2000), *The basics of term-building. Semantic and sociolinguistic aspects*, KM Akademia, Kyiv, 218 p.
18. (2020), *Terms as a language of science*, available: http://www.vko.ru/koncepcii/terminy-kak-yazyk-nauki.
19. (2021), *On Higher Education*, Law of Ukraine, available at: http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1556-18.
20. (2000), *Great Encyclopedia of Cyril and Methodius-2000*, Modern University of the Russian Encyclopedia, Moscow, 1 CD-ROM.
21. Ozhegov, S. I. (1987), *Dictionary of the Russian language*, Russian language, Moscow, 797 p.
22. Great Soviet Encyclopedia (2005), *Great Russian Encyclopedia*, Moscow, 1 CD-ROM.
23. Gavrilova, T. A. and Khoroshevsky, V. F. (2002), *Knowledge Bases of Intelligent Systems*, Piter, St. Petersburg, 384 p.
24. Kozlov, V. E., Kozlov, Yu. V., Novykova, O. O. and Olenchenko, V. T. (2019), "Method of Developing a Knowledge Submission Model for the Knowledge Base", *Proceedings of the XIV International Scientific and Practical Conference "International Trends in Science and Technology"*, Vol. 1, June 30, 2019, Warsaw, Poland, pp. 20-22.
25. Kozlov, V. E., Kozlov, Yu. V., Novykova, O. O. and Olenchenko, V. T. (2016), "Application of scientific and methodological apparatus of professional selection for personnel management", *Navigation and communication control systems*, No. 1 (37), pp. 80–82.
26. Kozlov, V. E., Olenchenko, V. T. and Yuzkov, I. O. (2009), "Model of presentation of teacher's evaluative functions", *Information processing systems*, Vol. 6 (80), p. 233-236.
27. Orlov, A. I. (2009), *Econometrics*, Feniks, Rostov-na-Donu, 572 p.
28. Gorelishev, S. A., Yokhov, O. Yu. and Novykova, O. O. (2011), "Theoretical-multiple method of professional selection", *Information processing systems*, Vol. 2 (92), pp. 188-190.
29. Kozlov, V. E., Olenchenko, V. T. and Yuzkov, I. O. (2008), "Extra-machine information base of the personnel system of higher education institution of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine", *Information processing systems*, Vol. 6 (73), pp. 180-183.
30. (2015), *On approval of the Licensing Conditions for conducting educational activities of educational institutions*, Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine, 30.12.2015, No. 1187, available: http://zakon3.rada.gov.ua/laws/show/1187-205-n. (in Ukrainian).
31. Kozlov, V. E. and Novykova, O. O. (2014), "Method of Building Ranked Lists of Candidates for Substitution of Positions in Special Divisions of Law Enforcement Forces", *Collection of scientific papers of the National Academy of the National Guard of Ukraine*, Vol. 2 (24), pp. 80-82.
32. (2017), *Universal Standards for Quality in Education*, To enable the delivery of Sustainable Development Goals 2030, Commonwealth Secretariat, London, SW1Y 5HX, United Kingdom,16 p., available at: https://www.thecommonwealth-educationhub.net/wp-content/uploads/2016/05/Quality_Standards_Education_2017_07.pdf.
33. Gorodnov, V. P. (2008), *Theoretical Foundations of Modeling Macroeconomic and Other Processes and Systems*, Acad, VV MVSU, Kharkiv, 484 p.
34. Bilyk, Volodymyr (2015), *Data Flow Diagrams (DFD) Explained – What is Data Flow Diagram*, available at: https://www.artofba.com/post/data-flow-diagrams-dfd-explained.
35. Bykov, V. Yu., Biloshchytskyi, A. O., Kuchansky, A. Yu., Andrashko, Y. V., Dikhtiarenko, O. V. and Budnik, S. V. (2019), "Development of information technology for complex evaluation of higher education institutions", *Information technology and learning tools*, Vol. 3, No. 5, pp. 293-306.

Received (надійшла) 11.05.2021
Accepted for publication (прийнята до друку) 12.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Козлов Валентин Євгенович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Valentyn Kozlov – 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: kozlov1945ve@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0003-4452-3009.

Козлов Юрій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;

Yury Kozlov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Metrology and Technical Expertise, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: yurii.kozlov83@nure.ua; ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-6165-4978.

Мощенко Інна Олексіївна – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри метрології та технічної експертизи, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна;
Inna Moshchenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering Fundamentals, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: my1485@ukr.net; ORCID ID: http://orcid.org/0000-0002-2738-0037.

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.

Оленченко Віктор Тимофійович – кандидат технічних наук, заступник начальника кафедри військового зв'язку та інформатизації, Національна академія Національної гвардії України, Харків, Україна;
Victor Olenchenko – Candidate of Technical Sciences, Deputy Head of the Department of Military Communication and Informatization, National Academy of the National Guard of Ukraine, Kharkiv, Ukraine;
e-mail: olenchenko.1971@gmail.com; ORCID ID: https://orcid.org/ 0000-0003-4220-4274.

Інформаційна технологія реалізації компетентнісного методу оцінювання професійної діяльності працівника системи освіти

В. Є. Козлов, Ю. В. Козлов, І. О. Мощенко, О. О. Новикова, В. Т. Оленченко

Анотація. Послідовне і поступове розповсюдження на Заході поняття "competence" у практиці післядипломного навчання, підвищення кваліфікації та перепідготовки кадрів професійної школи призвело до появи в системі освіти концепції так званого компетентнісного підходу. Спираючись на цю концепцію, Міжнародна асоціація праці вводить поняття "ключові компетенції", що включають предметні й соціальні компоненти, у кваліфікаційні вимоги до спеціалістів. Накопичений досвід втілення компетентнісного підходу в системі освіти показав наявність низки проблем, обумовлених складністю оцінювання процесу і результату професійної діяльності спеціалістів-освітян. Ця проблема викликала потік публікацій, різних за видом, обсягом і змістом, за авторством від маститих і титулованих вчених до вчителів молодших класів середньої школи, кількість посилань на які в Інтернеті налічує мільйони. Наявність безлічі публікацій спонукає до пошуку шляхів вирішення проблеми з застосуванням методів кваліметрії та інформаційних технологій. У статті розглянуто і запропоновано до практичного застосування інформаційну технологію вирішення завдань оцінювання професійної діяльності працівника системи освіти, засновану на компетентнісному підході. Сутність методу: група експертів складає інформаційну модель (професіограму) працівника системи освіти – переліки (тезаурус і абетковий покажчик) оцінюваних ознак – кола повноважень (компетенції), а також знань, умінь та особистісних ознак (компетентності); кожен об'єкт оцінювання експерти порівнюють за кожною із ознак і приписують бал за чотирибальною шкалою порядку, що характеризує ступінь відповідності об'єкта оцінювання конкретній ознаці; отримані сукупності оцінок (персонограми) обробляють відповідним чином; результат оброблення (ранжируваний список) подається особі, що приймає рішення. В якості приклада застосування методу розглянуто процедуру оцінювання професійної діяльності групи викладачів-початківців закладу вищої освіти.

Ключові слова: компетентність; компетенція; експертний метод; інформаційна технологія; прийняття рішень.

Информационная технология реализации компетентностного метода оценивания профессиональной деятельности работника системы образования

В. Е. Козлов, Ю. В. Козлов, И. А. Мощенко, Е. А. Новикова, В. Т. Оленченко

Аннотация. Последовательное и постепенное распространение на Западе понятия "competence" в практике последипломного обучения, повышения квалификации и переподготовки кадров, а также в профессиональной школе привело к появлению в системе образования концепции так называемого компетентностного подхода. Опираясь на эту концепцию, Международная ассоциация труда вводит понятие "ключевые компетенции", включающих предметные и социальные компоненты, в квалификационные требования к специалистам. Эта проблема вызвала поток публикаций, различных по виду, объему и содержанию, под авторством от маститых и титулованных ученых до учителей младших классов средней школы, количество ссылок на которые в Интернете насчитывает миллионы. Наличие множества публикаций побуждает к поиску путей решения проблемы с применением методов квалиметрии и информационной технологии. В статье рассмотрена и предложена к практическому применению информационная технология решения задач оценки профессиональной деятельности работника системы образования, основанная на компетентностном подходе. Сущность метода: группа экспертов составляет информационную модель (профессиограмму) работника системы образования – перечни (тезаурус и алфавитный указатель) оцениваемых признаков – круг полномочий (компетенции), а также знаний, умений и личностных признаков (компетентности); каждый объект оценивания эксперты сравнивают по каждому из признаков и приписывают балл четырехбалльной шкалы порядка, характеризующий степень соответствия объекта оценивания конкретному признаку; полученные совокупности оценок (персонограммы) обрабатывают соответствующим образом; результат обработки (ранжированный список) подается лицу, принимающему решение. В качестве примера применения метода рассмотрена процедура оценивания профессиональной деятельности группы начинающих преподавателей учреждения высшего образования.

Ключевые слова: компетентность; компетенция; экспертный метод; информационная технология; принятие решений.

UDC 623.437+519.8 **doi:** https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.3.20

Helen Makogon, Volodymyr Chalapko, Serhiy Guba, Vladyslav Starychenko,
Viktor Moskalenko, Yuriy Krasnoshapka

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

USING OF THE MATHEMATICAL APPARATUS REGRESSION ANALYSIS TO UNIFY THE CALCULATING METHODOLOGY FOR THE T-64B TANK'S OVERHAUL LIFE

Abstract. **The subject matter** of the article is the life cycle of a T-64B tank sample during the period from normal operation in a combat training group to resource consumption and carrying out average and capital repairs. The **goal** of the study is to develop a model of dependence of inter-repair service life of the T-64B tank sample on the machine operating conditions and, on its basis, a methodology for controlling the parameters of individual assemblies and systems of the tank sample during its life cycle. **The tasks** to be solved are: to analyze the results of statistical records of tank system failures and damages number and identify the predicates set affect the inter-repair service life of the machine depending on conditions of its tasks for the intended purposes; to create the regression equation for getting the unified analytical dependence of inter-repair service life of the T-64B tank sample in the period from normal operation in training and combat group to service life and overhaul; to investigate specific influence of reliability indices on the machine's service life. General scientific and special **methods** of scientific knowledge are used. The method of hierarchy analysis, mathematical apparatus of probability theory and multidimensional statistical analysis were used. The following **results** are obtained. A set of predicates influence the inter-repair service life of the machine depending on conditions of its tasks for the intended purposes fulfillment has been determined. A regression equation has been drawn up to obtain a unified analytical dependence of the overhaul life of a T-64B tank sample during the period from normal operation in a combat training group to the development of a resource and carrying out of intermediate and complete overhauls were drawn up. Engineering solutions have been proposed to implement a methodology for monitoring the parameters of individual units and systems of the tank sample during its life cycle, namely integrated real-time monitoring of oil condition and recording of engine operating hours under various load conditions. **Conclusions.** The space of features characterizes the conditions of the tank sample tasks for its intended purposes, includes service life, crew training, operation, seasonality of the unit's performed tasks nature, machine operating time since the last service and range of the vehicle before the next overhaul. The analytical relationship between the individual factors determining the conditions under which the T-64B tank sample performs its tasks for the intended purposes and the machine's service life consumption as a dependent variable can be determined in the form of a regression equation. Differentiated control of the parameters of individual assembly units and systems of the tank sample plays a leading role in ensuring the combat readiness and efficiency of the use of aging samples of weapons, insures personnel against possible accidents and catastrophes, sudden failures.

Keywords: service life of the T-64B tank sample; operating conditions; regression analysis; differentiated control of parameters.

Introduction

Formulation of the problem and research tasks. The T-64 tank and its modifications remain one of the most common and recognizable symbols of modern warfare. Created in the early 1960s, it was very advanced for its time and has retained the ability to be upgraded to this day.

Restoration**,** repair and upgrading of existing armored weapons and military equipment (AWME) vehicles is one of the constant factors that ensure the high combat readiness of a unit. However, during the life cycle individual units and systems of the sample tank have different impact on the life between overhauls, thus contributing to irrational use of the latter.

Taking into account individual properties of a particular vehicle, its operating conditions, character of loading schedule and other factors, the rate of wear of both separate units and subsystems of the vehicle can significantly differ from the values determined for the analogue sample. In this regard, the task of finding ways to unify the method of calculating the service life of the T-64B tank, depending on the conditions of performing its tasks for the intended purposes seems to be relevant.

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

In general, warranty and overhaul resources of AWME are defined by guiding documents, but the method of their calculation, normative indicators are obsolete, unique for samples of equipment for different purposes, despite the differences in the mechanisms of consumption of overhaul resources of individual components.

The authors present a reasoned critique of the lack of differentiated indicators of overhaul mileage in the system of maintenance and repair of AMWE, but ways to develop technically sound standards for overhaul mileage and, accordingly, maintenance of AMWE samples are not fully explored [1-5].

The authors are of the opinion that a more thorough study of the feasibility of full maintenance under real operating conditions is required, as well as the scope of daily and numbered maintenance work, based on the time and scope of the tasks that the sample AWME performs.

The goal of the study is to develop a model of dependence of inter-repair service life of the T-64B tank sample on the machine operating conditions and, on its basis, a methodology for controlling the parameters of individual assemblies and systems of the tank sample during its life cycle.

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

© Makogon H., Chalapko V., Guba S., Starychenko V., Moskalenko V., Krasnoshapka Yu., 2021

- to analyze the results of statistical records of tank system failures and damages number and identify the predicates set affect the inter-repair service life of the machine depending on conditions of its tasks for the intended purposes;

- to create the regression equation for getting the unified analytical dependence of inter-repair service life of the T-64B tank sample in the period from normal operation in training and combat group to service life and overhaul;

- to investigate specific influence of reliability indices on the machine's service life.

Main material

1.1 The results of statistical accounting of the number of failures and damage to tank systems in the period from normal operation to aging and overhaul. The tank is a complex technical system. During its operation, various types of failures may occur. The availability of data on machine failures provides opportunities to systematize, establish the causes and develop measures to eliminate and develop methods for predicting reliability, optimize the timing and amount of numbered maintenance and increase the time of repair resources. The classification of failures, adopted in the scientific literature on the theory of reliability, is quite relative.

So, to obtain the dependence on the generalized assessment of the existing level of reliability of machines, its constituent units and components, it is necessary to consider the division of machine failures into operational and resource.

It is believed that operational failures occur due to accidental causes, which are due to a combination of adverse factors arising from the operation of products with low properties, which are inherent in the design, and more often in the manufacture of machines.

The reasons for operational failures are various minor violations of the established rules, norms of design, production, storage and repair of machines, their operation.

These are failures that are not usually expected. Operational failures characterize faultlessness.

It is believed that in contrast to operational, resource failures occur as expected events associated with natural changes (usually over a long period of time), which take place in the main (base) components of the machine and lead to their extreme condition, extreme wear, breakdowns parts and assemblies due to the reduction of their strength.

When the failed element is restored, the initial (or overhaul) resource of the main nodes is restored.

Resource failures characterize durability.

It should be noted that the operating conditions of the machines are random and have probabilistic characteristics, and failures of units and components of the machine can occur both under normal (failures can be expected in different units of the machine) and under extreme operating conditions.

Given that both “operational” and “resource” failures occur during the operation of machines, and the failure itself is sudden only because its development is too fast over time and hidden for observation, proposed resource and operational failures [6].

1.2 Failures after removal of equipment from long-term storage. Most of the existing weapons of the Armed Forces of Ukraine have been in operation for over 30 years and have been in long-term storage, which inevitably affects its technical condition and combat readiness.

Experience with the use of military equipment has shown that a significant proportion of failures of military equipment is associated with violations of the requirements for its operation by crews, non-compliance with the rules of storage of military equipment for long-term storage, untimely and incomplete implementation of the list and scope of at the time of removal of military equipment from long-term storage.

When military equipment was brought to combat condition to perform combat missions as intended, a significant part of it required maintenance and repair, and in some cases – routine works to renew the service life of military equipment, whereby the indicators of serviceability were not confirmed.

The available statistical data revealed the main (type) failures (malfunctions) at the time of withdrawal of the equipment from long-term storage (Table 1).

Table 1 – **The main failures of the T-64B after removal from long-term storage**

№	Name of the T-64B tank sample systems	Failures, %
1.	Fire control systems	8
2.	Weapons	13
3.	Power plant	36
4.	Electrical equipment	12
5.	Undercarriage	12
6.	Transmission	16
7.	Others	3

As a result, the current technical condition of the Armed Forces, military equipment in long-term storage (including storage bases) gives a high failure rate, after its commissioning, due to violation of storage requirements and bringing to combat readiness. In particular, storage of engines involves turning the shafts, which is not always done on time and properly [7-9].

1.3 Operation failures. Armored vehicles operational failures are largely due to the fault of the crew and repair units personnel, which make mistakes during operation or during maintenance and repair of the machine. A study of the quantitative analysis of the operational failures flow was conducted on the results of ones operation during performing intended tasks.

Data on the operation of 87 different “ages” machines in the range from normal operation to aging during 2014-2020 were subject to statistical processing, so the sample can be considered sufficient and representative. Generalized quantitative indicators of the flow of operational failures of the sample tank T-64B for a certain period of time are given in Table 2.

Table 2 – **Quantitative analysis of the operational failures flow for the sample tank T-64B**

Operating time, thousand, km	Average number of operational failures, pcs	Intensity, $\lambda_e \times 10^3$, 1/km	$\sigma_{\lambda e} \times 10^3$, 1/km	$\lambda_{e\ min} \times 10^3$, 1/km	$\lambda_{e\ max} \times 10^3$б 1/km
6,747	1,96	0,29	0,19	0,06	0,63

Here λ_e, λ_{emin}, λ_{emax} are respectively average, minimum and maximum values of the parameter of operational disadvantages (intensity), and $\sigma_{\lambda e}$ is its standard deviation.

According to the data of Table 2, it can be concluded that operational faults amount to 15 to 30% of the limit permissible level of structural and operational faults (1 fault per 1000 km).

When using AWME for its intended purposes, there is an increase in the intensity of operational failures. The large discrepancy of λ_e values is explained by the variability of environmental conditions, different level of training of crews and maintenance personnel. In addition, it is worth noting the dispersion of the number of interruptions at the same values of the machine's mileage and the different consumption of motor life.

In general, we can assume that the operation of the barrel channel, armament, chassis, control system of the tank T-64B sample is not uniform and depends on a certain space of features that characterize the conditions of its tasks for intended purposes. Thus, the service life of the machine is most influenced by the operating conditions, in particular the motor oils quality and season suitability and the degree of training of the crew.

The connection between operating conditions, oil quality and a condition of the engine basic details is tendentiously seen [10]. It should be noted that the formal representation of the feature space is proposed by introducing a set of variables, different in their semantic load and dimension. For example, the operating conditions should take into account not only the time of year but also the nature of the tasks performed by the unit comprising the machine. In assessing the length of service, or "age" of the machine is appropriate to consider whether the machine has been overhauled, what is the direction after the last maintenance and predicted run of the technique to the next repair. Thus, the authors propose to define the range of features, which characterizes the conditions of the tank unit performing the tasks for the purpose, as follows:

F_1 – service life;

F_2 – degree of crew training;

F_3 – operation seasonality;

F_4 – the nature of the tasks performed by the unit the sample belongs;

F_5 – operating time of the machine after the last maintenance;

F_6 – power reserve before the next repair.

In order to formalize the level of the crew training it is suggested to use the number of sample's failures of units and equipment occurred due to the fault of the crew and the repair units staff, which caused the fault during the operation or during maintenance and repair of the machine.

Thus, certain variables (predicates) have different dimensions, so to unify the processing of results, it is proposed to normalize the results of calculations. For predicates with an implicit dimension, it is proposed to use a peer expert assessment.

The processing of statistical data allows us to assume the normal character of the random variables that are chosen as predicates.

The use of the STATISTICA application package with sufficient and representative sampling allows to obtain weights for each variable. In the final form, the analytical relationship between the individual factors that determine the conditions of the sample T-64B tasks for its intended purpose, and the consumption of machine life as a dependent variable is proposed to be defined as a regression equation. Note that the feature space can be changed depending on the specific tasks.

2. Regression equation to obtain a unified analytical dependence of the influence of the conditions of the T-64B tank sample's tasks for the intended purposes on its service life. It is considered that the service life of the tank is the minimum allowable operating time of the machine before the next scheduled repair. It is assumed that the life between overhauls of the tank is the minimum allowable operating time of the machine up to the next scheduled repair, it is the duration or amount of time the machine is working, measured in km of run, engine hours, cycles, starts, shots [11].

In order to achieve unification in the calculation of the service life of the sample equipment, in particular, to take into account the random nature of the influence of the conditions of its tasks, operating time of separate knots and units and its accounting unit, it is proposed to put in accordance with the service life of the sample tank T-64B some numerical value *y*, which would characterize the dependence of the impact of the conditions of its tasks on the service life of the machine.

Let's define the dependence y on the values of the vector components $F = \{F_1, F_2, ..., F_m\}$ as a multiple linear regression as follows:

$$y = a_1F_1 + a_2F_2 + ... + a_mF_m, \quad (1)$$

here $F = \{F_i\}$ – factors that determine the conditions of the T-64B sample tasks for the purpose; $\{a_i\}$ – regression coefficients to be determined.

It is natural to require a rationing condition in the form*:*

$$\sum_{i=1}^{m} = 1. \quad (2)$$

3 The least-squares method for regression coefficients renewal.

There are many ways of determining the coefficients of multiple regressions [8, 9]. In this paper, the direct estimation of the set $\{a_1, a_2, ..., a_m\}$, $i = \overline{1,m}$, is proposed to be performed by the method of least squares.

Suppose that, based on the results of processing statistical estimates of the service life of the tank T-64B samples, the accounting data for the number of failures and damage to systems for *n* tanks, $j = \overline{1,n}$.. Assume that each *j-th* tank is subject to the same space of conditions $F_{ij} = \{F_{i1}, F_{i2}, ..., F_m\}$, $j = \overline{1,n}$, $i = \overline{1,m}$.

Thus, to find the coefficients of the regression equation by the method of least squares, statistical data were obtained according to Table 3.

Table 3 – **Service life of T-64B tank samples**

Number of failures caused a decrease in the tank service life	The value of the factors determine the conditions of the T-64B tank sample tasks for its intended purpose			
Y_1	F_{11}	F_{12}	...	F_{1m}
Y_2	F_{21}	F_{22}	...	F_{2m}
...	...	...	...	...
Y_n	F_{n1}	F_{n2}		F_{nm}

It is proposed to calculate the coefficients of multiple linear regression in a matrix way. We present data and regression coefficients in matrix form

$$A=\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ ... \\ a_n \end{bmatrix},\ Y=\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ ... \\ y_n \end{bmatrix},\ E=\begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ ... \\ e_n \end{bmatrix},\ F=\begin{bmatrix} F_{11} & ... & F_{1m} \\ F_{21} & ... & F_{2m} \\ ... & ... & ... \\ F_{n1} & ... & F_{nm} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

here *Y* – is a *n*-dimensional column of the independent variable; *F* – matrix of $n \times m$ dimension values of conditions of the T-64B tank sample tasks of intended purposes; *A* – is a n dimension vector-column of the coefficients of the regression equation; *E* – is a *n*-dimension vector-column of deviations of the dependent variable y_i from similar values obtained by the regression equation,

$$\hat{y}_i = a_i F_{i1} + a_i F_{i2} + ... + a_i F_{in}. \quad (4)$$

In matrix form, the relationship will look like:

$$e = Y - FA. \quad (5)$$

According to the least squares method

$$\sum_{i=1}^{n} e_i^2 \ _i = e^T e = (Y - FA)^T (Y - FA) \to \min \quad (6)$$

It can be shown that the preceding condition is fulfilled if the vector column looks like

$$A = (F^T F)^{-1} F^T Y. \quad (7)$$

After the solution of equation (7) we obtain the value of coefficients of regression equation *A**. Therefore, the coefficients of the equation (3) are as follows:

$$A = (A^*)^T. \quad (8)$$

Thus, the obtained values of the regression equation (2) and the known $F = \{F_1, F_2, ..., F_m\}$ can form the dependence of influence of operating conditions on the inter-maintenance resource of the machine *y*.

The unconditional advantage of this technique is that it makes it possible to conduct a comparative analysis of both existing and prospective samples of weapons with the desired conditions for the tasks assigned.

A definite advantage of this methodology is that it enables a comparative analysis of both existing and advanced AWME vehicles with the desired conditions for the purposes.

4.1 Proposals and engineering solutions for monitoring the parameters of individual component parts and systems of the tank during its life cycle. It is natural to believe that monitoring of technical condition of vehicles in military samples must be carried out consistently, regardless of their deployment (in places of permanent deployment or during military operations). It is the control of the parameters of individual assembly units and systems of the tank sample that plays a leading role in ensuring the combat readiness and efficiency of the use of aging samples of weapons, insures personnel against possible accidents and catastrophes, sudden failures. Given the results of the research, the authors propose to focus efforts on such engineering solutions [12-17].

4.2 Dipstick as a tool to improve technical diagnostics of the engine lubrication system. In order to prevent the causes of failure of the tank engine this work considers a proposal for improvement of the means of diagnostics and control of the technical condition of the engine lubrication system (LS) by carrying out maintenance according to its actual state.

Installation of the olive oil condition sensor is a reliable and cost-effective way to solve a number of problems of economic and ecological character. Sensors of this type perform complex monitoring of olive condition in real time, transmitting information to the electronic control unit (ECU) in real time mode.

The function of the engine oil sensor [18]: to accurately indicate the need to replace the olive; reduction of operating costs; minimization of machine downtimes; engine protection.

The olive oil sensor helps to protect the engine through early detection of failures in the engine system, the corresponding alarm signal to the driver and disable the possibility of starting the engine, if it can cause problems in the work of the engine. The optimum replacement time for the motor oil is determined with the utmost precision.

An example of implementation of physical and chemical method of diagnostics of motor oil quality can be a design of a dipstick. A distinctive feature of this development is a comprehensive analysis of the actual condition of the oil during operation of the machine, which is based on assessing the degree of its contamination, antifriction and anti-seizure properties, determining the level, temperature and viscosity of engine oil.

Fig. 1 shows a schematic diagram of a dipstick for motor oil quality control. The device is made in the form of a gauge and consists of sensors of the oil level, fouling, viscosity, load-bearing capacity and torque, temperature. All the sensors of the device are designed as independent modules located in a tube connected to the housing in

which they are installed: The wrapping drive is connected to the sensors of tension, bearing capacity and torque; the information processing unit, which is connected to all the sensors and transmits information about the olive quality to the information panel [19].

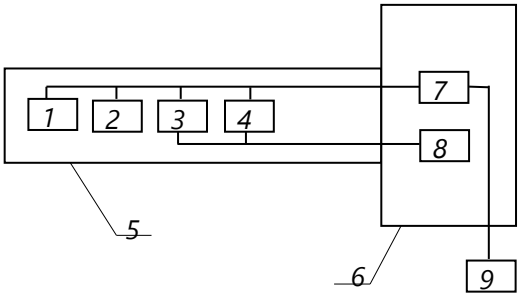


Fig. 1. Block diagram of the probe for oil quality control in the T-64B tank lubrication system: 1 – oil level sensor; 2 – pollution sensor; 3 – viscosity sensor; 4 – load-bearing capacity and torque sensor; 5 – tube; 6 – housing; 7 – stepper motor; 8 – information processing unit; 9 – information panel

In addition, the information processing unit provides the ability to select the oil quality control mode (continuous and periodic). For convenience of operation of the probe the information panel 9 on which the information on a condition of oil is displayed is provided. The information panel is made in a reliable case and can be placed in any convenient place in the control compartment. The design of the probe allows its installation and use on various types of weapons and military equipment. The principle of operation of the oil level sensor is that in the sections of the dipstick corresponding to the minimum and maximum oil level, an infrared emitter and a photodetector (photodiode) are built into the walls of the tank hull.

If the oil level does not reach the lower level of the sensor, the photodetector receives the signals of the emitter, which are reflected from the inner wall of the housing: the resistance of the diode decreases, as indicated by the corresponding LED on the display panel. At normal oil levels the boundary of the oil surface separates the receiver and the emitter. The purity sensor of motor oil is executed similarly to the optical level sensor, but in this case the radiator (light-emitting diode) and the receiver (photodiode) are directed opposite to each other. The signal received by the photodiode depends on the degree of transparency of the oil that is placed between the receiver and the emitter. The design of the viscosity sensor is based on the principle of a piston pump operation with an elastic membrane. As the piston moves down, the oil is partially expelled through the calibration holes, and the remaining part of the oil deforms the elastic membrane with the sensor. The lower of the oil viscosity, the more of it will pass from the cavity under the piston through the holes on the outside, and thus the deformation of the membrane will be less. At the critical (lower) viscosity level of the oil, the closing of the contact that is connected to the membrane will stop and the indication of the emergency state of the oil will turn on.

Friction force sensor (which characterizes the antifriction properties of the oil) and bearing capacity which is a miniature machine that is immersed in the oil under study. The friction unit in this sensor is formed by two spring electrodes, which are pressed against a metal cable with an elastic force, which is set so that under the action of the pressing force there is no rupture of the lubrication film in the new oil with acceptable anti-emergency properties.

The rubbing force sensor (characterizes the anti-friction properties of the olive) and load-bearing capacity which is a miniature machine which is immersed in the olive which is being inspected. The friction unit in this sensor is formed by two spring electrodes, which are pressed against a metal cable with an elastic force, which is set so that under the action of the clamping force there is no rupture of the lubricating film in the new oil with acceptable anti-seizure properties. During working off of anti-seizure additives in oil breaks of a film of greasing occur more often that will be displayed by burning of the corresponding LED.

As a drive for the diagnostic probe to ensure the operability of the modules for assessing the viscosity, antifriction and anti-seize qualities of the engine oil, an automated drive is proposed based on a stepper motor of the reciprocating motion of a flexible (steel) cable. The diagnostic probe monitors using five different sensors, which allows the need to replace the engine oil with high accuracy As a variant of the constructive basis of the diagnostic dipstick a capacitive fuel gauge sensor can be considered.

Note that it is the accounting of the engine will provide an opportunity to lead to a "single denominator" of its operation in hours and kilometers. Technical implementation of this idea is possible without making structural changes to the structure of the driver's panel.

Conclusions

The space of features characterizes the conditions of the tank sample tasks for its intended purposes, includes service life, crew training, operation, seasonality of the unit’s performed tasks nature, machine operating time since the last service and range of the vehicle before the next overhaul.

The analytical relationship between the individual factors determining the conditions under which the T-64B tank sample performs its tasks for the intended purposes and the machine's service life consumption as a dependent variable can be determined in the form of a regression equation.

Differentiated control of the parameters of individual assembly units and systems of the tank sample plays a leading role in ensuring the combat readiness and efficiency of the use of aging samples of weapons, insures personnel against possible accidents and catastrophes, sudden failures.

REFERENCES

1. Chornyy, M.V., Dolhov, R.V. and Budyanu, R.H (2009), “On-Site Armament Maintenance and Repair and Military Equipment Strategies“, *Viyskovo-tekhnichnyy zbirnyk Lvivskoho instytutu Sukhoputnykh viysk,* vol. 1, pp. 65-68.

2. Volokh, O.P. (2007), *The technique of substantiation of rational values of the parameters of maintenance of machines of engineering armaments at their use on purpose*, Ph.D. Thesis, Kamianets-Podilskyi, Ukraine
3. Lanetskiy, B.N., Luk'yanchuk, V.V. and Fomenko, D.V. (2009), "Justification of optimal maintenance and repair strategies for complex technical systems", *Systemy obrobky informatsiyi*, no. 6 (80), KhUPS, pp. 72-78.
4. Grib, D.A., Lanetskiy, B.N., Luk'yanchuk, V.V. and Mykhydenko, V.P. (2010), "Operation and repair of the technical condition of armaments and military equipment of anti-aircraft missile forces: problematic issues and ways to solve them", *Systemy ozbroyennya i viys'kova tekhnika*, no 4 (24), pp. 27-31.
5. Smironov, N.N. and Itskevich, A.A. (1987), On-Site maintenance and repair of aircraft, Transport, Moscow, SU.
6. Hulyayev, A.V., Zubaryev, O.V., Kanishchev, V.V. and Kolodyazhnyy, V.B. (2016), "Improving the efficiency of the system of maintenance and repair of weapons and military equipment", *Ozbroyennya ta viys'kova tekhnika*, no. 2(10), pp. 43-48.
7. Gusev, Yu.K. and Kritskiy, V.K (1979), "The influence of the ergonomic factor on operational failures", *Voprosy oboronnoy tekhniki*, no 84, vol. XX, available at: http://btvt.info/5library/vop_nadeznost_t_72_t_64.htm.
8. Goloshchapov, I.M. (1989), *Ekspluatatsiya bronetankovogo vooruzheniya i tekhniki*, Voyenizdat, Moscow, SU.
9. (1986), Obyekt 447A (437A). *Tekhnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii*, Kniga 2, Voyennoye izdatelstvo Ministerstva oborony SSSR, Moscow, SU.
10. Krutilin, A.G. (2005), "Implementation of targeted programs for the development of systems for the operation, repair and storage of weapons and military equipment of state aviation", *Voyennaya mysl*, no. 8, pp. 15-17.
11. (1994), *DSTU 2860-94. Reliability of equipment. Terms and definitions*, State Standard of Ukraine, Kyiv, UA.
12. Zubarev, V.V., Kovtunenko, A.P. and, Raskyn, L.H. (2005), Mathematical methods for assessing and predicting technical indicators of the operational properties of radio-technical systems, NAU, Kyiv, UA.
13. Korn, G.A. and Korn T.M. (1973), Mathematical handbook, Nauka, Fizmatgiz, Moscow, SU.
14. Demydenko, E.Z. (1981), *Lineynaya i nelineynaya regressiya*, Finansy i statistika, Moscow, SU.
15. Buslenko, N.P. (1968), *Modelirovaniye slozhnykh system*, Nauka, Moscow, SU.
16. Makogon, Ye. A. amd Seraya, O.V. (2007), "Evaluation of the effectiveness of complex systems using the modified method of pairwise comparisons", *Zbirnyk naukovykh prats' Kharkivs'koho universytetu Povitryanykh Syl,* no. 3(15), pp. 112-116.
17. Venttsel, Ye.S. (1969), *Teoriya veroyatnostey* [Probability Theory], Nauka, Fizmatgiz, Moscow, SU.
18. (2020), *SDU-1A-0.12 boundary support signaling device*, available at: https://izi.ua/p-10794116-signalizatory-davleniya-sdu1a-0-12-i-dr.
19. (2020), *Microcontroller Arduino: characteristics, capabilities*, available at: https://arduinoplus.ru/avtomatika-na-baze-mikrokontrollera-arduino/.

Received (Надійшла) 21.06.2021
Accepted for publication (Прийнята до друку) 25.08.2021

ABOUT THE AUTHORS / ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

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.

Чалапко Володимир Вікторович – заступник начальника кафедри озброєння та стрільби, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна.
Volodymyr Chalapko – Deputy Head the Department of Arms and Firing Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: Chalapkovolodymyr@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9833-9851.

Губа Сергій Михайлович – викладач кафедри підготовки офіцерів запасу, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Serhiy Guba – Lecture of the Reserve officers training department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: gsm136bts@ukr.net; ORCID: https://orcid.org/0000-0002-2304-2321.

Стариченко Владислав Вікторович– магістрант кафедри бронетанкового озброєння та військової техніки, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна;
Vladyslav Starychenko – 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: vladyslavstarychenko@ukr.net ; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5940-4526.

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.

Красношапка Юрій Васильович – старший викладач кафедри озброєння та стрільби, Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету "ХПІ", Харків, Україна.
Yuriy Krasnoshapka– Senior Lecture of the Arms and Firing Department, Military Institute of Tank Troops of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine;
e-mail: krasnoshapkayura@gmail.com; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9234-4844.

Використання математичного апарату регресійного аналізу для уніфікації методики розрахунків міжремонтного ресурсу танка Т-64Б

О. А. Макогон, В. В. Чалапко, С. М. Губа, В. В. Стариченко, В. І. Москаленко, Ю. В. Красношапка

Анотація. Предметом вивчення в статті є життєвий цикл зразка танка Т-64Б у період від нормальної експлуатації в навчально-бойовій групі до відпрацювання ресурсу і проведення середнього та капітального ремонту. **Метою дослідження** є розроблення моделі залежності міжремонтного ресурсу зразка танка Т-64Б від умови експлуатації машини та на її основі – методики контролю параметрів окремих складальних одиниць та систем зразка танка протягом його життєвого циклу. **Завдання дослідження:** проаналізувати результати статистичного обліку кількості відмов та пошкоджень систем танка та визначити множину предикат, які чинять вплив на міжремонтних ресурс машини в залежності від умов виконання нею завдань за призначенням; скласти рівняння регресії для отримання уніфікованої аналітичної залежності міжремонтного ресурсу зразка танка Т-64Б у період від нормальної експлуатації в навчально-бойовій групі до відпрацювання ресурсу і проведення середнього і капітального ремонту; дослідити питомий вплив надійнісних показників окремих складальних одиниць та систем на надійність зразка техніки та його міжремонтний ресурс; запропонувати інженерні рішення щодо реалізації методики контролю параметрів окремих складальних одиниць та систем зразка танка протягом його життєвого циклу. **Методологічною основою дослідження** стали загальнонаукові та спеціальні методи наукового пізнання. **Отримані такі результати**. Визначена множина предикат, які чинять вплив на міжремонтний ресурс машини в залежності від умов виконання нею завдань за призначенням; складено рівняння регресії для отримання уніфікованої аналітичної залежності міжремонтного ресурсу зразка танка Т-64Б у період від нормальної експлуатації в навчально-бойовій групі до відпрацювання ресурсу і проведення середнього і капітального ремонту; запропоновані інженерні рішення щодо реалізації методики контролю параметрів окремих складальних одиниць та систем зразка танка протягом його життєвого циклу, а саме: комплексний моніторинг стану оливи в реальному часі та облік мотогодин роботи двигуна при різних режимах навантаження. **Висновки**. Простір ознак, що характеризує умови виконання зразком танка завдань за призначенням, включає термін експлуатації, ступінь навченості екіпажу, сезонність експлуатації, характер завдань, що виконує підрозділ, до складу якого входить машина, напрацювання машини після останнього ТО та запас ходу машини до чергового ремонту. Аналітична залежність між окремими чинниками, що визначають умови виконання зразком танка Т-64Б завдань за призначенням та витрату експлуатаційного ресурсу машини як залежної змінної, може бути визначена у вигляді рівняння регресії. Диференційований контроль параметрів окремих складальних одиниць та систем зразка танка відіграє провідну роль у гарантуванні боєготовності та ефективності застосування старіючих зразків ОВТ, страхує особовий склад від можливих аварій і катастроф, раптових відмов.

Ключові слова: міжремонтний ресурс зразка танка Т-64Б; умови експлуатації; регресійний аналіз; диференційований контроль параметрів.

Использование математического аппарата регрессионного анализа для унификации методики расчетов межремонтного ресурса танка Т-64Б

Е. А. Макогон, В. В. Чалапко, С. М. Губа, В. В. Стариченко, В. И. Москаленко, Ю. В. Красношапка

Аннотация. Предметом изучения в статье является жизненный цикл образца танка Т-64Б в период от нормальной эксплуатации в учебно-боевой группе до выработки ресурса и проведения среднего и капитального ремонта. **Целью исследования** является разработка модели зависимости межремонтного ресурса образца танка Т-64Б от условия эксплуатации машины и на ее основе - методики контроля параметров отдельных сборочных единиц и систем образца танка в течение его жизненного цикла. **Задачи исследования:** проанализировать результаты статистического учета количества отказов и повреждений систем танка и определить множество предикат, которые оказывают влияние на межремонтных ресурс машины в зависимости от условий выполнения ею задач по назначению; составить уравнение регрессии для получения унифицированной аналитической зависимости межремонтного ресурса образца танка Т-64Б в период от нормальной эксплуатации в учебно-боевой группе к отработке ресурса и проведения среднего и капитального ремонта; исследовать удельное влияние надежностных показателей отдельных сборочных единиц и систем на надежность образца техники и его межремонтный ресурс; предложить инженерные решения по реализации методики контроля параметров отдельных сборочных единиц и систем образца танка в течение его жизненного цикла. **Методологической основой исследования** стали общенаучные и специальные методы научного познания. **Получены следующие результаты.** Определено множество предикат, которые оказывают влияние на межремонтный ресурс машины в зависимости от условий выполнения ею задач по назначению; составлено уравнения регрессии для получения унифицированной аналитической зависимости межремонтного ресурса образца танка Т-64Б в период от нормальной эксплуатации в учебно-боевой группе до выработки ресурса и проведения среднего и капитального ремонта; предложены инженерные решения по реализации методики контроля параметров отдельных сборочных единиц и систем образца танка в течение его жизненного цикла, а именно: комплексный мониторинг состояния масла в реальном времени и учет моточасов работы двигателя при различных режимах нагрузки. **Выводы.** Пространство признаков, характеризующих условия выполнения образцом танка задач по назначению, включает срок эксплуатации машины, степень обученности экипажа, сезонность эксплуатации, характер задач, выполняемых подразделением, в состав которого входит машина, наработки машины после последнего ТО и запас хода машины до очередного ремонта. Аналитическая зависимость между отдельными факторами, определяющими условия выполнения образцом танка Т-64Б задач по назначению и расход эксплуатационного ресурса машины как зависимой переменной, может быть определена в виде уравнения регрессии. Дифференцированный контроль параметров отдельных сборочных единиц и систем образца танка играет ведущую роль в обеспечении боеготовности и эффективности применения стареющих образцов ВВТ, страхует личный состав от возможных аварий и внезапных отказов.

Ключевые слова: межремонтный ресурс зразка танка Т-64Б; условия эксплуатации; регрессионный анализ; дифференцированный контроль параметров.