

p-ISSN 1607-3274
e-ISSN 2313-688X

Радіоелектроніка
Інформатика
Управління



Radio Electronics
Computer Science
Control

Радиоэлектроника
Информатика
Управление



2023/2



Національний університет «Запорізька політехніка»

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 2(65) 2023

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Національний університет «Запорізька політехніка».

ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).

Запоріжжя

НУ «Запорізька політехніка»

2023

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 2(65) 2023

Founded in January 1999.

Founder and publisher – National University «Zaporizhzhia Polytechnic».

ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).

Zaporizhzhia

NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

2023

Национальный университет «Запорожская политехника»

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 2(65) 2023

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Национальный университет «Запорожская политехника».

ISSN 1607-3274 (печатный), ISSN 2313-688X (электронный).

Запорожье

НУ «Запорожская политехника»

2023

Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ) видається Національним університетом «Запорізька політехніка» (НУ «Запорізька політехніка») з 1999 р. періодичністю чотири номери на рік.

Зареєстровано у Міністерстві юстиції України 19.11.2019 р. (Свідчення про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ № 24220-14060 ПР.)

ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).

Наказом Міністерства освіти і науки України № 409 від 17.03.2020 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 06 березня 2020 року» журнал включений до переліку наукових фахових видань України в категорії «А» (найвищий рівень), в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук і доктора філософії (кандидата наук).

Журнал включений до польського Переліку наукових журналів та рецензованих матеріалів міжнародних конференцій з присвоєною кількістю балів (додаток до оголошення Міністра науки та вищої освіти Республіки Польща від 31 липня 2019 р.: № 16981).

В журналі безкоштовно публікуються наукові статті англійською, російською та українською мовами.

Правила оформлення статей подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

Журнал забезпечує **безкоштовний відкритий он-лайн доступ** до повнотекстових публікацій.

Журнал дозволяє авторам мати авторські права і зберігати права на видання без обмежень. Журнал дозволяє користувачам читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати, шукати або посилатися на повні тексти своїх статей. Журнал дозволяє повторне використання його вмісту у відповідності Creative Commons ліцензією CC BY-SA..

Опублікованим статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал входить до наукометричної бази Web of Science.

Журнал реферується та індексується у провідних міжнародних та національних реферативних журналах і наукометричних базах даних, а також розміщується у цифрових архівах та бібліотеках з безкоштовним доступом у режимі on-line, повний перелік яких подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 22914).

Тематика журналу: телекомунікації та радіоелектроніка, програмна інженерія (включаючи теорію алгоритмів і програмування), комп'ютерні науки (математичне і комп'ютерне моделювання, оптимізація і дослідження операцій, управління в технічних системах, міжмашинна і людино-машинна взаємодія, штучний інтелект, включаючи системи, засновані на знаннях, і експертні системи, інтелектуальний аналіз даних, розпізнавання образів, штучні нейронні і нейро-нечіткі мережі, нечітку логіку, колективний інтелект і мультиагентні системи, гібридні системи), комп'ютерна інженерія (апаратне забезпечення обчислювальної техніки, комп'ютерні мережі), інформаційні системи та технології (структури та бази даних, системи, засновані на знаннях та експертні системи, обробка даних і сигналів).

Усі статті, пропонувані до публікації, одержують **об'єктивний розгляд**, що оцінюється за суттю без урахування раси, статі, віросповідання, етнічного походження, громадянства або політичної філософії автора(ів).

Усі статті проходять двоступінчасте закриті (анонімне для автора) **рецензування** штатними редакторами і незалежними рецензентами – провідними вченими за профілем журналу.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – Субботін Сергій Олександрович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна.

Заступник головного редактора – Піза Дмитро Макарович – доктор технічних наук, професор, директор інституту інформатики та радіоелектроніки, професор кафедри радіотехніки та телекомунікацій, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна.

Члени редколегії:

Андрюлідакіс Іосіф – доктор філософії, голова департаменту телефонії Центру обслуговування мереж, Університет Яніни, Греція;

Бодяньський Євгеній Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна;

Веннекенс Юст – доктор філософії, доцент, доцент факультету інженерних технологій (кампус Де Наїр), Католицький університет Льовена, Бельгія;

Рекомендовано до видання Вченою радою НУ «Запорізька політехніка», протокол № 10 від 19.06.2023.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом НУ «Запорізька політехніка».

Веб-сайт журналу: <http://ric.zntu.edu.ua>.

Адреса редакції: Редакція журналу «РІУ», Національний університет «Запорізька політехніка», вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна.

Тел: (061) 769-82-96 – редакційно-видавничий відділ

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Вольф Карстен – доктор філософії, професор, професор кафедри технічної інформатики, Дортмундський університет прикладних наук та мистецтв, Німеччина;

Вуттке Ганс-Дітріх – доктор філософії, доцент, провідний науковий співробітник інституту технічної інформатики, Технічний університет Льменау, Німеччина;

Горбань Олександр Миколайович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор факультету математики, Університет Лестера, Велика Британія;

Городничий Дмитро Олегович – доктор філософії, кандидат технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Дирекції науки та інженерії, Канадська агенція прикордонної служби, Канада;

Дробахін Олег Олегович – доктор фізико-математичних наук, професор, перший проректор, Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, Україна;

Зайцева Олена Миколаївна – кандидат фізико-математичних наук, професор, професор кафедри інформатики, Жилінський університет в Жиліні, Словаччина;

Камеяма Мічітака – доктор наук, професор, професор факультету науки та інженерії, Університет Ішіномакі Сеншу, Японія;

Карташов Володимир Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри медіаінженерії та інформаційних радіоелектронних систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна;

Леващенко Віталій Григорович – кандидат фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри інформатики, Жилінський університет в Жиліні, Словаччина;

Луенго Давид – доктор філософії, професор, завідувач кафедри теорії сигналів та комунікацій, Мадридський політехнічний університет, Іспанія;

Марковска-Качмар Урсула – доктор технічних наук, професор, професор кафедри обчислювального інтелекту, Вроцлавська політехніка, Польща;

Олійник Андрій Олександрович – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна;

Павліков Володимир Володимирович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, проректор з наукової роботи, Національний аерокосмічний університет ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ», Україна;

Папшицький Марцін – доктор наук, професор, професор відділу інтелектуальних систем, Дослідний інститут систем Польської академії наук, м. Варшава, Польща;

Скруський Степан Юрійович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна;

Табунчик Галина Володимирівна – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка», Україна;

Тригано Томас – доктор філософії, старший викладач кафедри електричної та електронної інженерії, Інженерний коледж ім. С. Шамон, м. Ашдод, Ізраїль;

Хенке Карстен – доктор технічних наук, професор, науковий співробітник факультету інформатики та автоматизації, Технічний університет Льменау, Німеччина;

Шарпанських Олексій Альбертович – доктор філософії, доцент, доцент факультету аерокосмічної інженерії, Делфтський технічний університет, Нідерланди.

РЕДАКЦІЙНО-КОНСУЛЬТАТИВНА РАДА

Аррас Пітер – доктор філософії, доцент, доцент факультету інженерних технологій (кампус Де Наїр), Католицький університет Льовена, Бельгія;

Ліснянський Анатолій – кандидат фізико-математичних наук, головний науковий експерт, Ізраїльська електрична корпорація, Хайфа, Ізраїль;

Мадрицх Христіан – доктор філософії, професор факультету інженерії та інформаційних технологій, Університет прикладних наук Каринфії, Австрія;

Маркосян Мгер Вардкесович – доктор технічних наук, професор, директор Єреванського науково-дослідного інституту засобів зв'язку, професор кафедри телекомунікацій, Російсько-вірменський університет, м. Єреван, Вірменія;

Рубель Олег Володимирович – кандидат технічних наук, доцент факультету інженерії, Університет МакМастера, Гамільтон, Канада;

Тавхелідзе Автанділ – кандидат фізико-математичних наук, професор, професор школи бізнесу, технології та освіти, Державний університет ім. Ілії Чавчавадзе, Тбілісі, Грузія;

Уреутью Дору – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри електроніки та обчислювальної техніки, Трансильванський університет в Брашові, Румунія;

Шульц Пітер – доктор технічних наук, професор, професор факультету інженерії та комп'ютерних наук, Гамбургський університет прикладних наук (HAW Hamburg), Гамбург, Німеччина.

The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control» is published by the National University «Zaporizhzhia Polytechnic» NU «Zaporizhzhia Polytechnic» since 1999 with periodicity four numbers per year.

The journal is registered by the Ministry of Justice of Ukraine in 19.11.2019. (State Registration Certificate of printed mass media series KB № 24220-14060 IIP).

ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).

By the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 17.03.2020 № 409 “On approval of the decision of the Certifying Collegium of the Ministry on the activities of the specialized scientific councils dated 06 March 2020” journal is included in the list of scientific specialized periodicals of Ukraine in category “A” (highest level), where the results of dissertations for Doctor of Science and Doctor of Philosophy may be published.

The journal is included to the Polish List of scientific journals and peer-reviewed materials from international conferences with assigned number of points (Annex to the announcement of the Minister of Science and Higher Education of Poland from July 31, 2019: Lp. 16981).

The journal publishes scientific articles in English, Russian, and Ukrainian free of charge.

The article formatting rules are presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

The journal provides policy of on-line open (free of charge) access for full-text publications. The journal allow the authors to hold the copyright without restrictions and to retain publishing rights without restrictions. The journal allow readers to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of its articles. The journal allow reuse and remixing of its content, in accordance with Creative Commons license CC BY-SA.

Published articles have a unique digital object identifier (DOI).

The journal is included into Web of Science.

The journal is abstracted and indexed in leading international and national abstracting journals and scientometric databases, and also placed to the digital archives and libraries with a free on-line access, full list of which is presented at the site: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

The journal is distributed by the Catalogue of Ukrainian periodicals (the catalog number is 22914).

The journal scope: telecommunications and radio electronics, software engineering (including algorithm and programming theory), computer science (mathematical modeling and computer simulation, optimization and operations research, control in technical systems, machine-machine and man-machine interfacing, artificial intelligence, including data mining, pattern recognition, artificial neural and neuro-fuzzy networks, fuzzy logic, swarm intelligence and multiagent systems, hybrid systems), computer engineering (computer hardware, computer networks), information systems and technologies (data structures and bases, knowledge-based and expert systems, data and signal processing methods).

All articles proposed for publication receive an objective review that evaluates substantially without regard to race, sex, religion, ethnic origin, nationality, or political philosophy of the author(s).

All articles undergo a two-stage blind peer review by the editorial staff and independent reviewers – the leading scientists on the profile of the journal.

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief – **Sergey Subbotin** – Dr. Sc., Professor, Head of Software Tools Department, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine.

Deputy Editor-in-Chief – **Dmytro Piza** – Dr. Sc., Professor, Director of the Institute of Informatics and Radio Electronics, Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunications, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine.

Members of the Editorial Board:

Iosif Androulidakis – PhD, Head of Telephony Department, Network Operation Center, University of Ioannina, Greece;

Evgeny Bodyanskiy – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

Oleg Drobakhin – Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine;

Alexander Gorban – PhD, Professor, Professor of the Faculty of Mathematics, University of Leicester, United Kingdom;

Dmitry Gorodnichy – PhD, Associate Professor, Leading Research Fellow at the Directorate of Science and Engineering, Canada Border Services Agency, Ottawa, Canada;

Karsten Henke – Dr. Sc., Professor, Research Fellow, Faculty of Informatics and Automation, Technical University of Ilmenau, Germany;

Michitaka Kameyama – Dr. Sc., Professor, Professor of the Faculty of Science and Engineering, Ishinomaki Senshu University, Japan;

Volodymyr Kartashov – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Media Engineering and Information Radio Electronic Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine;

Vitaly Levashenko – PhD, Professor, Head of Department of Informatics, University of Žilina, Slovakia;

David Luengo – PhD, Professor, Head of the Department of Signal Theory and Communication, Madrid Polytechnic University, Spain;

Ursula Markowska-Kaczmar – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Computational Intelligence, Wrocław University of Technology, Poland;

Andrii Oliinyk – Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine;

Marcin Paprzycki – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Intelligent Systems, Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences, Warsaw, Poland;

Volodymyr Pavlikov – Dr. Sc., Senior Researcher, Vice-Rector for Research, N. E. Zhukovsky National Aerospace University “KhAI”, Ukraine;

Alexei Sharpanskykh – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Aerospace Engineering Faculty, Delft University of Technology, Netherlands;

Stepan Skrupsky – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Networks, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine;

Galyna Tabunshchyk – PhD, Professor, Professor of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine;

Thomas (Tom) Trigano – PhD, Senior Lecturer of the Department of Electrical and Electronic Engineering, Sami Shamoon College of Engineering, Ashdod, Israel;

Joost Vennekens – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Faculty of Engineering (Campus de Nair), Katholieke Universiteit Leuven, Belgium;

Carsten Wolff – PhD, Professor, Professor of the Department of Technical Informatics, Dortmund University of Applied Sciences and Arts, Germany;

Heinz-Dietrich Wuttke – PhD, Associate Professor, Leading Researcher at the Institute of Technical Informatics, Technical University of Ilmenau, Germany;

Elena Zaitseva – PhD, Professor, Professor, Department of Informatics, University of Žilina, Slovakia.

EDITORIAL-ADVISORY COUNCIL

Peter Arras – PhD, Associate Professor, Associate Professor, Faculty of Engineering (Campus De Nair), Katholieke Universiteit Leuven, Belgium;

Anatoly Lisnianski – PhD, Chief Scientific Expert, Israel Electric Corporation Ltd., Haifa, Israel;

Christian Madritsch – PhD, Professor of the Faculty of Engineering and Information Technology, Carinthia University of Applied Sciences, Austria;

Mher Markosyan – Dr. Sc., Professor, Director of the Yerevan Research Institute of Communications, Professor of the Department of Telecommunications, Russian-Armenian University, Yerevan, Armenia;

Oleg Rubel – PhD, Associate Professor, Faculty of Engineering, McMaster University, Hamilton, Canada;

Peter Schulz – Dr. Sc., Professor, Professor, Faculty of Engineering and Computer Science, Hamburg University of Applied Sciences (HAW Hamburg), Hamburg, Germany;

Avtandil Tavkhelidze – PhD, Professor, Professor of the School of Business, Technology and Education, Ilia State University, Tbilisi, Georgia;

Doru Ursuțiu – Dr. Sc., Professor, Professor, Department of Electronics and Computer Engineering, University of Transylvania at Brasov, Romania.

Recommended for publication by the Academic Council of NU «Zaporizhzhia Polytechnic», protocol № 10 dated 19.06.2023.

The journal is imposed by the editorial-publishing department of NU «Zaporizhzhia Polytechnic».

The journal web-site is <http://ric.zntu.edu.ua>.

The address of the editorial office: Editorial office of the journal «Radio Electronics, Computer Science, Control», National University «Zaporizhzhia Polytechnic», Zhukovskiy street, 64, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.

Tel.: +38-061-769-82-96 – the editorial-publishing department.

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

Fax: +38-061-764-46-62

© National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 2023

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	6
<i>Petrushak V. S.</i> PHASE FREQUENCY INTERPRETATION OF THE COINCIDENCE METHOD FOR FREQUENCY TO CODE CONVERSION.....	6
<i>Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Puleko I. V.</i> DETECTION OF THE SIGNALS OF THE TERRESTRIAL RADAR STATIONS BY SPACECRAFT WITH A PASSIVE SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE.....	13
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	20
<i>Козуля Т. В.</i> КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНОГО ПРОСТОРУ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ.....	20
<i>Кондрук Н. Е.</i> СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОДІБНОСТІ КАТЕГОРІАЛЬНИХ ВПОРЯДКОВАНИХ ДАНИХ.....	31
<i>Хаханов В. І., Чумаченко С. В., Литвинова Є. І., Хаханова І. В., Хаханова Г. В., Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Шевченко О. Ю.</i> ВЕКТОРНО-ЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ.....	37
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	52
<i>Bilous N. V., Ahekan I. A., Kaluhin V. V.</i> DETERMINATION AND COMPARISON METHODS OF BODY POSITIONS ON STREAM VIDEO.....	52
<i>Ivanets O. B., Khrashchevskiy R. V., Kulik M. S., Burichenko M. Yu.</i> INTELLIGENCE ANALYSIS OF EMPIRICAL DATA BASED ON TIME SERIES.....	61
<i>Katerynychuk I. S., Babaryka A. O., Khoptinskiy R. P.</i> OBJECT DETECTION PERFORMANCE INDICATOR IN VIDEO SUIVEILLANCE SYSTEMS.....	72
<i>Moskalenko V. V.</i> MODEL-AGNOSTIC META-LEARNING FOR RESILIENCE OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM.....	79
<i>Петров К. Е., Кириченко В. В.</i> ВИДАЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ДОЩУ З ОДИНОЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ.....	91
<i>Прокіпчук О. А., Висоцька В. А.</i> ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ УКРАЇНОМОВНИХ ТВІТІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ДИНАМІКИ ГРОМАДСЬКОЇ ДУМКИ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	103
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	117
<i>Kungurtsev O. B., Zinovatna S. L.</i> TECHNOLOGY FOR IDENTIFYING AND FORMING POSSIBLE RELATIONSHIPS BETWEEN USE CASES IN THE PROCESS OF THE INFORMATION SYSTEM DESIGN.....	117
<i>Morkun V. S., Hryshchenko S. M., Nizhehorodtsev V. O., Filonenko M. M., Lagovsky V. V.</i> DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STUDYING TRAFFIC OF MULTISERVICE NETWORKS.....	125
<i>Seniv M. M.</i> METHOD FOR SELECTING A SOFTWARE DEVELOPMENT METHODOLOGY TAKING INTO ACCOUNT PROJECT CHARACTERISTICS.....	134
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	142
<i>Дорофеев Ю. І., Любчик Л. М., Мельников О. С.</i> СТАБІЛІЗАЦІЯ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ З ЧАСОВИМИ ЗАТРИМКАМИ ЗА СТАНОМ ТА ОБМЕЖЕННЯМИ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ.....	142
<i>Chernov S. K., Chernova Lb. S., Chernova Ld. S., Kusanets N. E., Titov S. D., Trushliakov E. I.</i> USING THE BEHAVIOR ANTAGONISM AND THE BIMATRIX GAME THEORY IN THE IT PROJECT MANAGEMENT.....	152
<i>Stenin A. A., Drozdovych I. G., Soldatova M. O.</i> APPLICATION OF SPLINE FUNCTIONS AND WALSH FUNCTIONS IN PROBLEMS OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF LINEAR NONSTATIONARY SYSTEMS.....	166

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	6
<i>Petrushak V. S.</i> PHASE FREQUENCY INTERPRETATION OF THE COINCIDENCE METHOD FOR FREQUENCY TO CODE CONVERSION.....	6
<i>Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Puleko I. V.</i> DETECTION OF THE SIGNALS OF THE TERRESTRIAL RADAR STATIONS BY SPACECRAFT WITH A PASSIVE SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE.....	13
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	20
<i>Kozulia T. V.</i> THE CONCEPT OF INFORMATION-ENTROPY SPACE FOR SYSTEM OBJECTS MODELS BUILDING USED IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT TASKS.....	20
<i>Kondruk N. E.</i> METHODS FOR DETERMINING SIMILARITY OF CATEGORICAL ORDERED DATA.....	31
<i>Hahanov V., Chumachenko S., Litvinova Y., Hahanova I., Khakhanova A., Shkil A., Rakhlis D., Hahanov I., Shevchenko O.</i> VECTOR-LOGICAL FAULT SIMULATION.....	37
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	52
<i>Bilous N. V., Ahekan I. A., Kaluhin V. V.</i> DETERMINATION AND COMPARISON METHODS OF BODY POSITIONS ON STREAM VIDEO.....	52
<i>Ivanets O. B., Khrashchevskiy R. V., Kulik M. S., Burichenko M. Yu.</i> INTELLIGENCE ANALYSIS OF EMPIRICAL DATA BASED ON TIME SERIES.....	61
<i>Katerynychuk I. S., Babaryka A. O., Khotynskiy R. P.</i> OBJECT DETECTION PERFORMANCE INDICATOR IN VIDEO SUEILLANCE SYSTEMS.....	72
<i>Moskalenko V. V.</i> MODEL-AGNOSTIC META-LEARNING FOR RESILIENCE OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM.....	79
<i>Petrov K. E., Kyrychenko V. V.</i> REMOVAL OF RAIN COMPONENTS FROM SINGLE IMAGES USING A RECURRENT NEURAL NETWORK.....	91
<i>Prokipchuk O., Vysotska V.</i> UKRAINIAN LANGUAGE TWEETS ANALYSIS TECHNOLOGY FOR PUBLIC OPINION DYNAMICS CHANGE PREDICTION BASED ON MACHINE LEARNING.....	103
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	117
<i>Kungurtsev O. B., Zinovatna S. L.</i> TECHNOLOGY FOR IDENTIFYING AND FORMING POSSIBLE RELATIONSHIPS BETWEEN USE CASES IN THE PROCESS OF THE INFORMATION SYSTEM DESIGN.....	117
<i>Morkun V. S., Hryshchenko S. M., Nizhehorodtsev V. O., Filonenko M. M., Lagovsky V. V.</i> DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STUDYING TRAFFIC OF MULTISERVICE NETWORKS.....	125
<i>Seniv M. M.</i> METHOD FOR SELECTING A SOFTWARE DEVELOPMENT METHODOLOGY TAKING INTO ACCOUNT PROJECT CHARACTERISTICS.....	134
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	142
<i>Dorofieiev Yu. I., Lyubchuk L. M., Melnikov O. S.</i> STABILIZATION OF DISCRETE-TIME SYSTEMS WITH STATE-DELAYS AND SATURATING CONTROL INPUTS.....	142
<i>Chernov S. K., Chernova Lb. S., Chernova Ld. S., Kumanets N. E., Titov S. D., Trushliakov E. I.</i> USING THE BEHAVIOR ANTAGONISM AND THE BIMATRIX GAME THEORY IN THE IT PROJECT MANAGEMENT.....	152
<i>Stenin A. A., Drozdovych I. G., Soldatova M. O.</i> APPLICATION OF SPLINE FUNCTIONS AND WALSH FUNCTIONS IN PROBLEMS OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF LINEAR NONSTATIONARY SYSTEMS.....	166

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

UDC 621.317

PHASE FREQUENCY INTERPRETATION OF THE COINCIDENCE METHOD FOR FREQUENCY TO CODE CONVERSION

Petrushak V. S. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Telecommunications, Media and Intellectual Technologies, Khmelnytskyi National University, Khmelnytskyi, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of fast conversion of radio signal frequency for monitoring the radial velocity of a moving object. The object of the study was the process of converting frequency into a code based on the coincidence method.

Objective. The goal of the work is to improve the coincidence method for creating a new signal-to-code frequency converter without fixing the conversion time interval.

Method. The coincidence method for converting the signal frequency into a code has been improved. The improved frequency conversion method, unlike the existing ones, consists in counting the number of complete phase cycles of the known and unknown signals during the time of double coincidence and asynchronous mode of hardware determination of the particle. The improved method has advantages in comparison with the method of an electro-counter frequency meter when determining the radial speed of objects and does not have a methodical error, which in an electro-counter frequency meter increases as the unknown frequency approaches the reference to 100%. However, the improved coincidence method compared to other versions has a hardware scheme for tracking the moments of coincidence and determining the fraction and does not require expensive and high-speed microprocessors to calculate the conversion results.

Results. Based on the phase-frequency interpretation and the derived conversion equation and the proposed frequency-to-code conversion scheme using the coincidence method, a functional scheme of the frequency converter was developed. This made it possible to implement a 16-bit frequency converter in code on Intel's MAX V series CPLD.

Conclusions. The coincidence method for converting the signal frequency into a code received further development, which, unlike the existing ones, consists in counting the number of complete phase cycles of the known and unknown signals during the time of double coincidence and the asynchronous mode of hardware determination of the fraction.

The influence of the frequency of signals on the time of a single measurement was studied using the coincidence method, as a result of which it was found that with an increase in the difference between the reference and unknown frequency, the time of a single measurement decreases.

The obtained research results can be used for the development of high-speed means of converting the signal frequency into a binary code: in industrial tomography, radar and radio navigation for monitoring moving objects.

KEYWORDS: frequency, coincidence, electronic counter frequency meter, full phase shift, phase cycle, industrial tomography, radar, internet of things, unmanned aerial vehicle, complex programmable logic device.

ABBREVIATIONS

CPLD is a complex programmable logic device;

FPHSH is a full phase shift;

UAV is a unmanned aerial vehicle.

NOMENCLATURE

T_0 is a periods of a known signal;

T_x is a periods of a unknown signal;

$d\varphi$ is a full phase shift;

N_0 is a number of periods of the known signal during the entire time interval of the coincidence;

N_x is a number of periods of the unknown signal during the entire time interval of the coincidence.

INTRODUCTION

The efforts of outstanding scientists are aimed at improving the metrological and technical indicators of exist-

ing measuring devices, in particular at developing new methods for correcting the characteristics of the transformation of the measuring channel, which is their main component [1]. Means of measuring various parameters and technical characteristics of radio equipment have always occupied leading positions in science and technology. Without an accurate definition of the relevant values, it is impossible to build modern high-quality radio communication systems, radar, navigation ground and satellite systems. Accordingly, the improvement of known methods for creating new high-speed converters of the frequency of high-frequency signals into a code is a promising task at today's stage of development of measuring technology [10].

The object of study is the process of converting frequency into a code based on the coincidence method. The

process of converting a frequency into a code using an electro-counter frequency meter usually takes a long time. This is caused by the fact that the measurement time is always fixed, usually one second. At the same time, there is an additional methodical error inherent in the method of the electro-counter frequency meter. Therefore, to increase the speed of frequency conversion, it is necessary to improve the coincidence method for this problem.

The subject of study is the coincidence method for converting the signal frequency into a code.

The known sampling methods of frequency conversion [1, 3] are low-speed, and are also characterized by the presence of methodological error, which can reach 100% as the reference frequency approaches the unknown.

The purpose of the work is to improve the coincidence method for creating a new converter frequency to code without fixing the conversion time interval.

1 PROBLEM STATEMENT

It is known that to convert the frequency of a signal into a code, an electronic counter frequency meter uses a time interval equal to one second [1, 3]. This limits its use in radio communication systems with pseudo-random reconfiguration of the operating frequency. Because in such systems, the period of changing the operating frequency can be from several seconds to several minutes. In addition, there are limitations regarding the use of this method and for measuring the speed of UAV movement. Because two UAVs moving towards each other at a speed of 200 km/h will travel more than 100 meters in one second.

Therefore, in order to prevent emergency situations and obtain timely information about the operating frequency or the speed of UAV movement, it is necessary that the time of converting the signal frequency into a code is less than one second.

An alternative to an electronic counter frequency meter can be a converter based on the coincidence method. However, the imperfect theoretical justification of the transformation process and the use of a microprocessor to track the moments of coincidence and determine the share nullifies all the advantages of this method. Accordingly, the improvement of the coincidence method and the development of a frequency conversion device that would perform a single measurement of the frequency of a signal in a time of less than one second is a priority task for this research work.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The modern world does not stand still. The constant development of the radio engineering industry requires more high-speed means of converting the frequency of the radio signal to monitor the speed of a moving object. In ultrasound diagnostics, which are used in medicine, the speed of blood flow in vessels is studied by determining the frequency of the reflected signal [12]. In industrial tomography and radar, the speed of movement of the ob-

ject depends on the frequency of the reflected signal [1, 5, 6, 11, 12]. At the same time, it is necessary to use high-speed frequency measurement tools in systems with active sensors used in telecommunication networks and UAVs based on the Internet of Things technology [2, 9]. In addition, UAVs need a quick response in the environment.

Among the methods of converting the frequency of a radio signal into a code, the leading place is occupied by the method of an electro-counter frequency meter [1, 3]. This method has a simple hardware implementation, which in the simplest version requires: a reference generator, a logical AND2 multiplication scheme and a counter. At the same time, the method of the electro-counter frequency meter has a low speed of single measurement, usually 1s. In addition, this method has a methodical error, which increases as the unknown frequency approaches the reference frequency to 100%.

There are attempts to implement the coincidence method for frequency conversion [4, 5, 13]. However, all these attempts have an imperfect coincidence tracking scheme and require expensive and high-speed microprocessors to calculate the conversion results. All this leads to the appearance of additional errors and increases the time of converting the frequency into a code.

3 MATERIALS AND METHODS

The essence of the coincidence method for measuring the signal frequency consists in the double coincidence of the fronts of the known and unknown signals at a certain time interval [13]. The graphic interpretation of the double coincidence of the fronts of the known and unknown signals at a certain time interval is presented in fig. 1. From the point of view of phase-frequency theory[8], both frequencies of periodic signals can be expressed in terms of their FPHSH. At the same time, the frequency of a known periodic signal can be represented as:

$$F_0 = \frac{d\varphi_0}{dt} \quad (1)$$

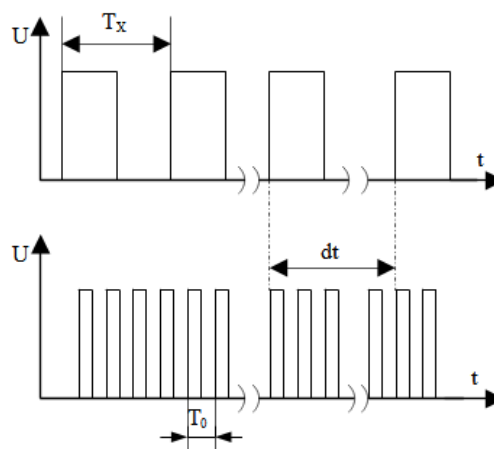


Figure 1 – Graphical interpretation of the coincidence method

Accordingly, the frequency of an unknown periodic signal can be determined by the formula (2):

$$F_X = \frac{d\varphi_X}{dt}. \quad (2)$$

Let's imagine that the time interval during which a double coincidence of the fronts of signals of known and unknown frequency occurs is dt . Let's express this time interval from formulas (1) and (2). For a known periodic signal, we will have:

$$dt = \frac{d\varphi_0}{F_0}. \quad (3)$$

For an unknown periodic signal, we will have:

$$dt = \frac{d\varphi_X}{F_X}. \quad (4)$$

Since in one period there is a phase shift of 2π , then for the entire time interval of coincidence, FPHSH for a known periodic signal will be defined as:

$$d\varphi_0 = 2\pi \cdot N_0. \quad (5)$$

Accordingly, FPHSH for an unknown periodic signal will be defined as:

$$d\varphi_X = 2\pi \cdot N_X. \quad (6)$$

Since the coincidence of the signal fronts of a known and an unknown periodic signal occurs in one time interval, we equate expressions (3) and (4), we will have:

$$\frac{d\varphi_0}{F_0} = \frac{d\varphi_X}{F_X}. \quad (7)$$

Substitute expressions (5) and (6) into expression (7) to determine FPHSH and shorten the left and right parts by 2π , then we will have:

$$\frac{N_0}{F_0} = \frac{N_X}{F_X}. \quad (8)$$

From formula (8), we express the frequency of the unknown periodic signal and obtain the conversion equation:

$$F_X = F_0 \cdot \frac{N_X}{N_0}. \quad (9)$$

In accordance with the transformation equation (9), to measure the frequency, it is necessary to count the number of phase cycles of the known and unknown signals during the time of coincidence and find their proportion.

4 EXPERIMENTS

At the same time, to determine the frequency of a periodic signal, it is necessary to count the number of periods of a known and unknown signal during the time in-

terval when the fronts of these signals coincide twice. Schematically, such a process is presented in Fig. 2.

In accordance with the scheme presented in Fig. 2, it is necessary:

1. Form pulses with minimum duration for signals of known and unknown frequency.
2. Determine the moments of matching signal fronts.
3. Calculate the moments of matching signal fronts.
4. Count the number of pulses of the known and unknown signals during the time of two matching signal fronts.
5. Find the share of the number of pulses of the known and unknown signals during the time of two coincidences of the signal fronts.

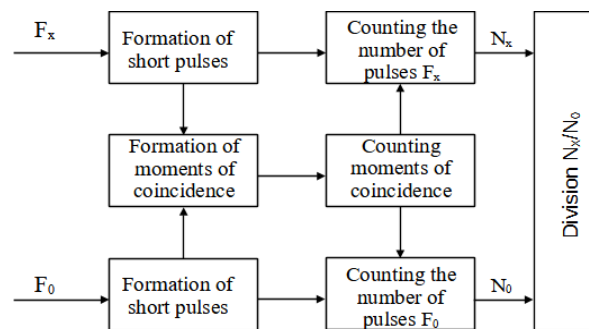


Figure 2 – Scheme of the process of converting the frequency of a periodic signal into a code by the method of coincidence

Since most of the blocks of this scheme are related to digital signal processing, the hardware implementation of such a converter is better to be implemented on the basis of CPLD. The use of CPLD in radio equipment allows you to arrange the entire digital part in the middle of one microcircuit and improve the immunity of the circuit. Accordingly, the processing time of the frequency conversion results can be reduced. To form pulses with a minimum duration for signals of known and unknown frequency, it is advisable to use the shaper described in [10]. In this case, the period will remain constant, and the duration of the pulse will be equal to 2 time delays of the basic logic element. For CPLDs of the MAX V family from Intel, the delay is 7ns [7]. Accordingly, the duration of the pulse will be 14ns. Determination of the moments of coincidence of the signal fronts can be implemented with the help of the logic element AND2. To count the moments of coincidence of the signal fronts, we will use a two-digit counter based on the D-trigger. With the help of 8-bit counters, we will calculate the number of pulses of known and unknown signals during the time of two coincidences of signal fronts. We will determine the share using the DIVIDE megafunction. In addition, it will allow to separate the whole and fractional part of the division results. The functional scheme of the frequency to code converter based on the coincidence method is presented in Fig. 3.

Rectangular pulses of an unknown frequency are received at the Fx input of the circuit (Fig. 3), and at the F0 input – of the reference frequency. With the help of fi short pulse generators, the duration of input pulses of unknown and reference frequency becomes equal to 14 ns. At the same time, the period of the unknown and reference signal remains unchanged. Through 2AND logic multiplication circuits, short pulses are sent to the inverse exclusive OR element, which captures the moments of coincidence. At the same time, the cnt2 counter counts the moments of coincidence. Blocks ff, built on the basis of a D-trigger and a logic multiplication scheme 2AND, included in series. These blocks are intended for fixing the leading edges of pulses. The first moment of coincidence enables the operation of the LPM_COUNTER counters. These counters count pulses of the unknown and reference signal. After the second moment of coincidence, the counters are blocked. After that, the counter outputs have a binary code corresponding to the number of periods of the unknown Nx and the reference N0 signal, for the entire time period of the double coincidence. From the outputs of the counters, an 8-bit binary code is sent to the input of the DIVIDE division block. In asynchronous mode, the division block DIVIDE defines an integer quotient (cile) of 8 bits and a remainder (ostacha) of 8 bits. Thus, we have a 16-bit code at the output of the frequency con-

verter. If the binary 16-bit code from the DIVIDE block is multiplied by the value of the reference frequency, then we will have the frequency of the unknown signal.

5 RESULTS

Modeling of the functional scheme of the frequency converter into code based on the coincidence method (Fig. 3) was carried out in the automated design environment Quartus Prime from Intel. In fig. 4 presents an oscillogram explaining the operation of the functional circuit (Fig. 3). The first two signals correspond to the reference F0 and the unknown Fx signal. The other two signals are data from the counters of the reference N0 and measuring NX channels. The last two signals are the result of dividing the data from the counters. Accordingly, cile[7..0] is an integer value, the result of division, ostacha[7..0] is a fractional value, the result of division.

In order to determine the time of a single conversion of the frequency into a code, by the method of coincidence, it is necessary to estimate the difference in the duration of the signal periods. The difference in the duration of the periods can be written in the following way:

$$\Delta T = \left| \frac{1 - F_0/F_x}{F_0} \right|. \quad (10)$$

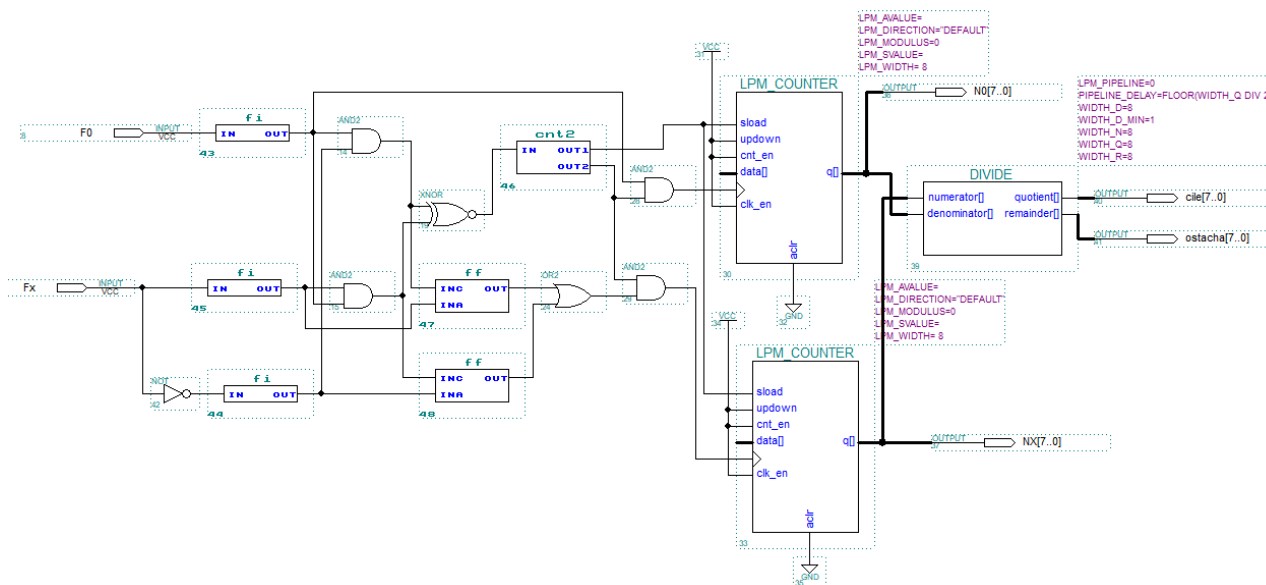


Figure 3 – Functional scheme of the frequency converter to the code based on the coincidence method

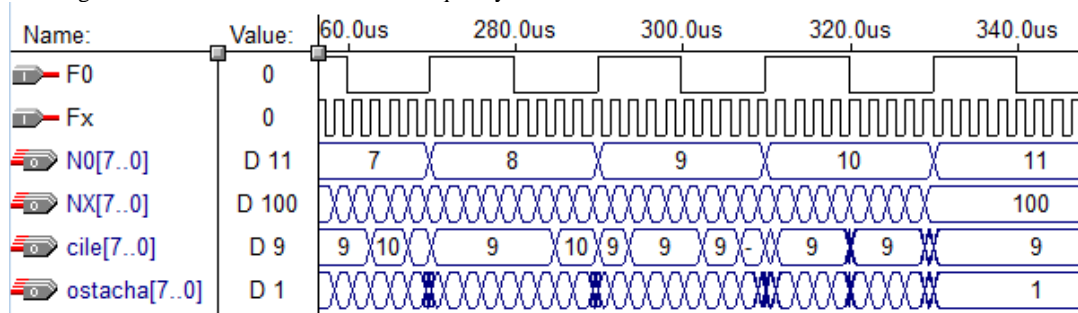


Figure 4 – Oscillograms of the operation of the frequency converter to the code based on the coincidence method

The time between two coincidences of signal edges, taking into account expression (10), will be determined as:

$$T_i = \frac{T_x \cdot T_0}{\Delta T} = \frac{1}{|F_x - F_0|}. \quad (11)$$

The modulo value in the denominator assumes no negative time. In this way, the moments when the un-

known frequency may be lower than the reference frequency are taken into account. In fact, expression (11) is a formula for determining the time of a single transformation. Graphical interpretation of expression (11) for three reference frequency values: 10KHz, 100KHz and 1MHz is presented in Fig. 5. On the vertical axis, the measurement time is indicated in seconds, on the horizontal axis - the value of the unknown frequency in hertz.

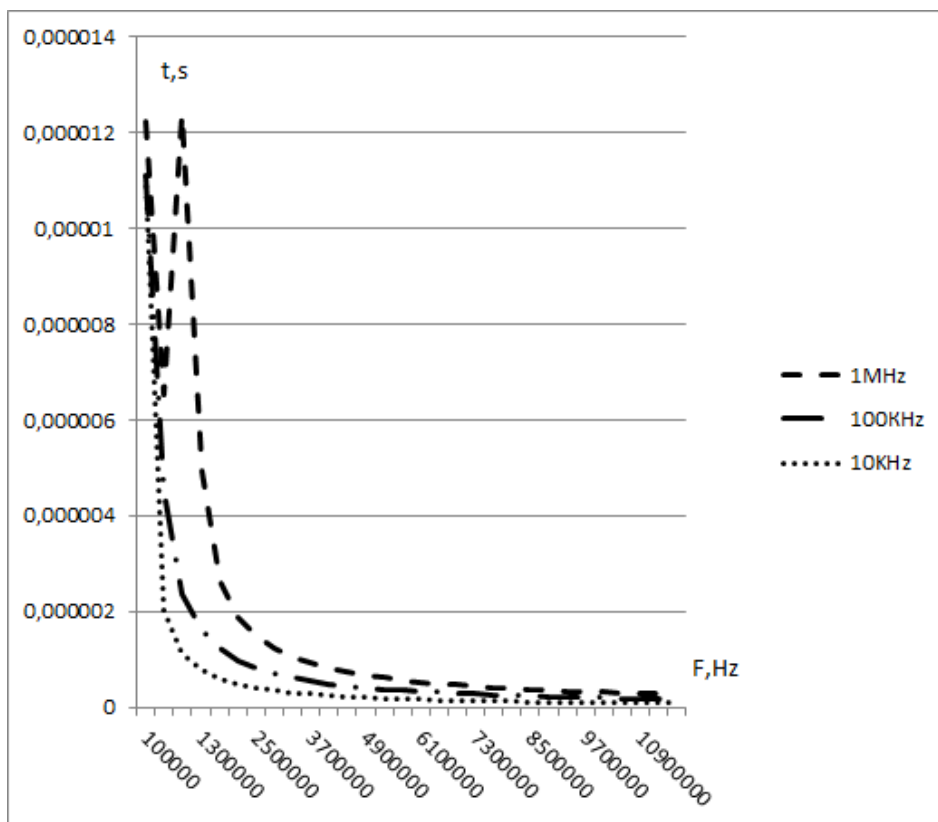


Figure 5 – Time dependence of a single frequency measurement by the coincidence method

6 DISCUSSION

Signal oscillograms obtained during modeling in the Quartus Prime automated design environment from Intel (Fig. 4) confirm the validity of the proposed theoretical solutions: expression (9), scheme (Fig. 2) and the functionality of the functional scheme (Fig. 3).

As can be seen from Fig. 5: as the difference between the reference and the unknown frequency increases, the time of a single measurement decreases. Thus, it can be noted that even with a frequency difference of 1Hz, the time of a single measurement will be one second, which corresponds to an electric counter frequency meter. On the basis of the developed functional scheme (Fig. 3), a high-speed frequency converter can be developed into a code for industrial tomography or radar reconnaissance. The proposed version of the frequency to code converter (Fig. 3) based on the Intel MAX V family CPLD can

measure the frequency of an unknown signal up to 100 MHz.

CONCLUSIONS

The urgent problem of developing a coincidence method for converting the signal frequency into a code is solved.

The scientific novelty of the obtained results is that the coincidence method for converting the signal frequency into a code was further developed, which, unlike the existing ones, consists in counting the number of complete phase cycles of the known and unknown signals during the coincidence time and the asynchronous mode of hardware determination of the division result.

The influence of the frequency of signals on the time of a single measurement was studied by the coincidence method, as a result of which it was established that with the increase in the difference between the reference and

unknown frequencies, the time of a single measurement of the measurement decreases.

The practical significance of obtained results is that based on the derived conversion equation and the proposed scheme of frequency conversion to code using the coincidence method, a functional scheme of the frequency converter was developed. This made it possible to implement a 16-bit frequency converter in code on Intel's MAX V series CPLD.

Prospects for further research are to study the obtained research results can be used for the development of high-speed means of converting the signal frequency into a binary code: in industrial tomography, radar and radio navigation for monitoring the radial speed of moving objects.

REFERENCES

1. Astola J. T., Egiazarian K. O., Khlopov G. I. et al. Application of Bispectrum Estimation for Time-Frequency Analysis of Ground Surveillance Doppler Radar Echo Signals [Electronic resource], *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2008, Vol. 57, No. 9, pp. 1949–1957. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tim.2008.917192>
2. Banzhaf S., Waldschmidt Ch. Phase-Code-Based Modulation for Coherent Lidar [Electronic resource], *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, P. 1. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3104109>
3. Boff A. F. The Application of Counter Techniques to Precision Frequency Measurements [Electronic resource], *Transactions of the IRE Professional Group on Instrumentation*. – 1954, PGI-3, pp. 2–10. Access mode: <https://doi.org/10.1109/irepg-i.1954.5007346>
4. Du B., Dong Sh., Wang Y. et al. High-resolution frequency measurement method with a wide-frequency range based on a quantized phase step law [Electronic resource], *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2013, Vol. 60, No. 11, pp. 2237–2243. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2013.6644729>
5. Kaszerman P. Frequency of Pulse Coincidence Given n Radars of Different Pulse Widths and PRF's [Electronic resource], *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1971, AES-7, No. 5, pp. 1013–1014. Access mode: <https://doi.org/10.1109/taes.1971.310349>
6. Koulountzios P., Rymarczyk T., Soleimani M. A Triple-Modality Ultrasound Computed Tomography Based on Full-Waveform Data for Industrial Processes [Electronic resource], *IEEE Sensors Journal*, 2021, Vol. 21, No. 18, pp. 20896–20909. Access mode: <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3100391>
7. MAX V Device Family Data Sheet [Electronic resource], Intel. Access mode: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max-v/mv51001.pdf>
8. Gula I. V., Polikarovskiyh O. I., Horiashchenko K. I. et al. Measurements of Periodic Signals Phase Shifts with Application of Direct Digital Synthesis [Electronic resource], *Devices and Methods of Measurements*, 2019, Vol. 10, No. 2, pp. 169–177. Access mode: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-2-169-177>
9. Hu J., Zhang H., Di B. et al. Meta-material Sensor Based Internet of Things: Design, Optimization, and Implementation [Electronic resource], *IEEE Transactions on Communications*, 2022, P. 1. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2022.3187150>
10. Petrushak V. S. Measurement of the amplitude of periodic signals using the fibonacci method [Electronic resource], *Devices and Methods of Measurements*, 2018, Vol. 9, No. 2, pp. 167–172. Access mode: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172>
11. Roehr S., Gulden P., Vossiek M. Precise Distance and Velocity Measurement for Real Time Locating in Multipath Environments Using a Frequency-Modulated Continuous-Wave Secondary Radar Approach [Electronic resource], *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2008, Vol. 56, No. 10, pp. 2329–2339. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2008.2003137>
12. Susaki H. A fast algorithm for high-accuracy frequency measurement: application to ultrasonic Doppler sonar [Electronic resource], *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2002, Vol. 27, No. 1, pp. 5–12. Access mode: <https://doi.org/10.1109/48.989878>
13. Zhang M., Wang H. // Precise Frequency Comparison System Using Phase Coincidence Demarcation [Electronic resource], *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, Vol. 69, No. 2, pp. 617–622. Access mode: <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2904130>

Received 14.02.2023.

Accepted 17.05.2023.

УДК 621.317

ФАЗОЧАСТОТНА ІНТЕРПРЕТАЦІЯ МЕТОДУ КОІНЦИДЕНЦІЇ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЧАСТОТИ В КОД

Петрушак В. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій, Хмельницький національний університет, Хмельницький, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблема швидкого перетворення частоти радіосигналу для моніторингу швидкості руху об'єкту. Об'єктом дослідження є процес перетворення частоти в код на базі методу коінцидентії.

Мета роботи – удосконалення методу коінцидентії для створення нового перетворювача частоти сигналу в код без фіксації часового інтервалу перетворення.

Метод. Удосконалено метод коінцидентії для перетворення частоти сигналу в код. Удосконалений метод перетворення частоти, на відміну від існуючих, полягає у підрахунку кількості повних фазових циклів відомого і невідомого сигналів за час подвійного збігу і асинхронного режиму апаратного визначення частки. Удосконалений метод має переваги в порівнянні з методом електролічильного частотоміра під час визначення радіальної швидкості об'єктів і не має методичної похибки, яка у електролічильного частотоміра збільшується з наближенням невідомої частоти до опорної до 100%. Разом з

тим, удосконалений метод коінциденції в порівнянні з іншими версіями має апаратну схему відслідковування моментів збігу та визначення частки і не потребує дорого вартісних і високошвидкісних мікропроцесорів для обрахунку результатів перетворення.

Результати. На основі фазочастотної інтерпретації і виведеного рівняння перетворення та запропонованої схеми перетворення частоти у код методом коінциденції, розроблено функціональну схему перетворювача частоти. Це дозволило реалізувати 16-розрядний перетворювач частоти в коді на CPLD серії MAX V компанії Intel.

Висновки. Отримав подальший розвиток метод коінциденції для перетворення частоти сигналу в код, який, на відміну від існуючих, полягає у підрахунку кількості повних фазових циклів відомого і невідомого сигналів за час подвійного збігу і асинхронного режиму апаратного визначення частки.

Досліджено вплив частоти сигналів на час поодинокого вимірювання за допомогою методу коінциденції, в результаті чого з'ясовано, що зі збільшенням різниці між опорною і невідомою частотою час поодинокого вимірювання зменшується.

Отримані результати досліджень можуть бути використані для розробки високошвидкісних засобів перетворення частоти сигналу у двійковий код: у промисловій томографії, радіолокації та радіонавігації для моніторингу рухомих об'єктів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: частота, коінциденція, електронно-лічильний частотомір, повний фазовий зсув, фазовий цикл, промислова томографія, радіолокація, інтернет речей, безпілотний літальний апарат, програмована логічна інтегральна схема.

ЛІТЕРАТУРА

1. Application of Bispectrum Estimation for Time-Frequency Analysis of Ground Surveillance Doppler Radar Echo Signals [Electronic resource] / [J. T. Astola, K. O. Egiazarian, G. I. Khlopov et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2008. – Vol. 57, No. 9. – P. 1949–1957. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tim.2008.917192>
2. Banzhaf S. Phase-Code-Based Modulation for Coherent Lidar [Electronic resource] / Sebastian Banzhaf, Christian Waldschmidt // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2021. – P. 1. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tvt.2021.3104109>
3. Boff A. F. The Application of Counter Techniques to Precision Frequency Measurements [Electronic resource] / A. F. Boff // Transactions of the IRE Professional Group on Instrumentation. – 1954. – PGI-3. – P. 2–10. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/irepg-i.1954.5007346>
4. High-resolution frequency measurement method with a wide-frequency range based on a quantized phase step law [Electronic resource] / [Baoqiang Du, Shaofeng Dong, Yanfeng Wang et al.] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2013. – Vol. 60, No. 11. – P. 2237–2243. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tuffc.2013.6644729>
5. Kaszerman P. Frequency of Pulse Coincidence Given n Radars of Different Pulse Widths and PRF's [Electronic resource] / Philip Kaszerman // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 1971. – AES-7, No. 5. – P. 1013–1014. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/taes.1971.310349>
6. Koulountzios P. A Triple-Modality Ultrasound Computed Tomography Based on Full-Waveform Data for Industrial Processes [Electronic resource] / Panagiotis Koulountzios, Tomasz Rymarczyk, Manuchehr Soleimani // IEEE Sensors Journal. – 2021. – Vol. 21, No. 18. – P. 20896–20909. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/jsen.2021.3100391>
7. MAX V Device Family Data Sheet [Electronic resource] // Intel. – Access mode: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/max-v/mv51001.pdf>
8. Measurements of Periodic Signals Phase Shifts with Application of Direct Digital Synthesis [Electronic resource] / [I. V. Gula, O. I. Polikarovskiykh, K. I. Horiashchenko et al.] // Devices and Methods of Measurements. – 2019. – Vol. 10, No. 2. – P. 169–177. – Access mode: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-2-169-177>
9. Meta-material Sensor Based Internet of Things: Design, Optimization, and Implementation [Electronic resource] / [Jingzhi Hu, Hongliang Zhang, Boya Di et al.] // IEEE Transactions on Communications. – 2022. – P. 1. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tcomm.2022.3187150>
10. Petrushak V. S. Measurement of the amplitude of periodic signals using the fibonacci method [Electronic resource] / V. S. Petrushak // Devices and Methods of Measurements. – 2018. – Vol. 9, No. 2. – P. 167–172. – Access mode: <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-2-167-172>
11. Roehr S. Precise Distance and Velocity Measurement for Real Time Locating in Multipath Environments Using a Frequency-Modulated Continuous-Wave Secondary Radar Approach [Electronic resource] / S. Roehr, P. Gulden, M. Vossiek // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2008. – Vol. 56, No. 10. – P. 2329–2339. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tmtt.2008.2003137>
12. Susaki H. A fast algorithm for high-accuracy frequency measurement: application to ultrasonic Doppler sonar [Electronic resource] / H. Susaki // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2002. – Vol. 27, No. 1. – P. 5–12. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/48.989878>
13. Zhang M. Precise Frequency Comparison System Using Phase Coincidence Demarcation [Electronic resource] / Min Zhang, Hai Wang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, No. 2. – P. 617–622. – Access mode: <https://doi.org/10.1109/tim.2019.2904130>

DETECTION OF THE SIGNALS OF THE TERRESTRIAL RADAR STATIONS BY SPACECRAFT WITH A PASSIVE SYNTHESIS OF THE ANTENNA APERTURE

Vakaliuk T. A. – Dr., Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

Andreiev O. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Technologies in Medicine and Telecommunications, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

Dubyna O. F. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Technologies in Medicine and Telecommunications, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

Nikitchuk T. M. – PhD, Associate Professor, Dean of the Faculty of Information and Computer Technologies Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

Puleko I. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Engineering and Cyber Security, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

ABSTRACT

Context is due to the need to analyze the electromagnetic accessibility of terrestrial radio radiation sources at long distances, which is typical for the operation of a spacecraft of radio technical intelligence with a passive synthesis of the antenna aperture.

Objective is to calculate the probability indicators of detecting the fact of signal emission of ground-based radar stations using radio-technical intelligence installed on a space carrier.

Method. Analytical calculation of the correct detection probability of the signal of the radio radiation sources by the spacecraft of radio technical intelligence based on the determination of the signal-to-noise ratio at the input of the detection device. The analysis of the technical characteristics of the group of ground radars made it possible to calculate the probability of correct detection only for the virtual radar, which generates the minimum number of pulses with the minimum energy during reconnaissance among all the analyzed radars.

Results. The fulfillment of the conditions of electromagnetic accessibility is checked and the correct detection probability of the signals of modern radar stations by the space radio-technical intelligence system with a passive synthesis of the antenna aperture was calculated.

Conclusion. Proposed use of the correct detection probability of the signal as the resulting indicator of electromagnetic accessibility of the radio radiation source. In the example radar stations of the air defense proved, that the proposed parameters of the space radio technical intelligence system with a passive synthesis of the antenna aperture provide the values of the correct detection probability of the signal, which are quite acceptable for modern monitoring systems.

KEYWORDS: spacecraft, synthesis of the antenna aperture, radio technical intelligence, a radar station, and electromagnetic accessibility.

ABBREVIATIONS

RRS is a radio radiation source;
RLS is a radar station;
RTI is a radio technical intelligence;
SC is a spacecraft;
EIRP is an equivalent isotropic radiated power.

NOMENCLATURE

T_{REC} is a receiver noise temperature;
 T_A is an antenna noise temperature;
 G_{RSS} is a gain RRS antenna;
 G_{RTI} is a gain RTI antenna;
 η_{RRS}, η_{RTI} is an antenna efficiency;
 R_E is the Earth's radius;
 S_A is a geometric antenna area;
 K_A is an antenna surface using factor;
 T_S is a space noise temperature;
 T_{ATM} is an atmosphere noise temperature;
 T_E is an Earth noise temperature;

L_{LOSS} is a total signal loss;
 P_N is a noise power;
 K_N is a receiver noise factor;
 q is a signal-to-noise ratio;
 ΔF is a signal search range by frequency;
 λ is a wavelength;
 H_0 is an orbit altitude;
 V is a speed of the SC;
 ΔF_K is a receiver bandwidth;
 L_e, L_β are antenna sizes by elevation angle and azimuth;
 τ_i is an impulse duration;
 P_i is an impulse power;
 F_i is a pulse repetition frequency;
 $\Delta \varepsilon$ is a viewing zone by elevation angle;
 Ω_A is an angular velocity antenna rotation;
 R_{max} is a maximum distance;
 P_S is a power-useful signal;

F, D is a false alarm and correct detection probabilities;

t_R is a reconnaissance time;

N_f is the number of receiver reconfigurations by frequency;

M is a number of pulses at the receiver input;

k is Boltzmann's constant.

INTRODUCTION

Detection of radiation from active radio-electronic devices located on the earth's surface is using passive monitoring systems in a certain frequency range. The use of the RTI spacecraft with a passive synthesis of the antenna aperture allows an increase in the accuracy of the azimuthal direction measurements at the RRS. At the same time, both the parameters of the synthesized aperture and the quality indicators of the signal detection of the terrestrial RLS depend on the parameters of the spacecraft orbit and the technical characteristics of both the RTI station and the terrestrial RLS. The signal-to-noise ratio generated by the radio-electronic means at the input of the RTI station analysis device must be sufficient to search the signal in the space and for frequency.

The object of research is the process of the radio radiation sources detected on the Earth's surface by the RTI spacecraft.

The subject of research is the electromagnetic accessibility of terrestrial radio radiation sources for the RTI spacecraft with a passive synthesis of the antenna aperture.

The purpose of the work is to determine the electromagnetic accessibility of the terrestrial radar stations for the RTI spacecraft with a passive synthesis of the antenna aperture.

1 PROBLEM STATEMENT

Today, one of the priority directions of the aerospace industry of Ukraine is the creation of effective aerospace intelligence [1]. The concept of the National targeted scientific and technical space program of Ukraine for 2021–2025 provides for the use of space information, in particular, to ensure the realization of the state's interests in the region of national security and defense [2]. Surveying the earth's surface with spacecraft in different frequency ranges allows for solving various tasks [3]. Recent military conflicts have shown the importance of obtaining timely and reliable information about the enemy's active RLS. Detection of radiation from active radio-electronic devices located on the earth's surface is using passive monitoring systems in a certain frequency range. The use of the RTI spacecraft with a synthesized aperture of the antenna allows an increase in the accuracy of the azimuthal direction measurements to the RRS [4]. Quite a lot of attention is paid in the literature to the issue of optimizing the orbital grouping of satellites with a synthesis of the antenna aperture, based on ensuring a survey of a given area of the earth's surface [5, 6]. At the same time,

attention is not enough to the fact that the signal-to-noise ratio created by the radio-electronic means at the input of the RTI station analysis device must be sufficient to correctly detect the signal. Therefore, determining the electromagnetic availability of terrestrial RRS and calculating the probability indicators of signal detection by the RTI spacecraft, when synthesizing the antenna aperture on based pulse radar signals, is an actual scientific task.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Today, RTI systems are widely used as part of on-board complexes placed on aircraft and SC and allow to ensure security due to the timely detection of enemy RRS over a large area [7]. Synthesizing the antenna aperture of the RTI spacecraft carried out by external RRS signals. The literature is given the results of checking the possibility of passive synthesizing the antenna aperture, in particular, based on signals from navigation satellite systems or sources of radio astronomical radiation [8].

Peculiarities of passive synthesis of the antenna aperture on based pulse radar signals [4]:

- the parameters of the received radio signals are unknown in advance;
- the parameters of the synthesized antenna aperture depend on the wavelength and radar pulse repetition rate;
- the unambiguity of determining the azimuth direction on the RRS depends on the parameters of the RLS signal and the orbit altitude of the spacecraft.

The required orbit altitude of the RTI spacecraft with the passive synthesis of the antenna aperture using the terrestrial radar signals is determined in [4]. However, the sufficiency of the signal-to-noise ratio value at the input of the RTI space station analysis device for detecting the terrestrial radar signal did not check.

3 MATERIALS AND METHODS

Active radio devices detect using the radio technical intelligence system. The location of such systems on the SC gives the possibility of conducting reconnaissance of theoretically any part of the earth's surface, regardless of weather conditions and time of day [1].

The analysis of methods for detecting signals of radio-electronic systems showed, that to obtain the specified indicators of the quality of RRS detection necessary perform the following conditions:

- to obtain a high probability of meeting the antennas pattern of the RRS and the RTI station it is necessary, that the RTI station has a wide antenna pattern;
- the value of the signal-to-noise ratio created by the radio-electronic means at the input of the RTI station's analysis device must be sufficient to detect a signal with the required quality indicators;
- at the time of receiving the signal the RTI station must be tuned to the frequency of the signal emitted by the RRS;
- the duration of the received signal must be sufficient for its processing.

Suppose that the analysis of electromagnetic accessibility is subject to a group of ground radars, that emit

pulse signals of a certain power P_i and a certain duration τ_i . The wavelength of the signal λ is given, but the pulse repetition frequency F_i can vary within certain limits. The RLS has the dimensions of the antenna L_ϵ, L_β and carries out a circular survey of the space with the angular speed of rotation of the antenna Ω_A . The RTI station is placed on a SC which is moving in a circular orbit with an altitude of H_0 (see Fig. 1) and has a non-directional antenna. The analysis receiver has a fixed bandwidth ΔF_K and performs a sequential search of the radar signal by the frequency range ΔF . The noise coefficient of the receiver K_N is constant throughout the search range by frequency.

For a group of ground radars, it is necessary to calculate:

- the signal-to-noise ratio, that created by the RLS at the input of the RTI station's analysis device;
- the number of pulses that will enter the input of one frequency channel of the analysis receiver when it is tuned to a certain frequency;
- probability of correct detection of the signal of the radars by the analysis device of the RTI station.

The conditions of electromagnetic accessibility can be calculated using the following methodology.

1. The maximum distance between SC and RRS is determined [9]:

$$R_{\max} = \sqrt{(R_E + H_0)^2 - R_E^2}. \quad (1)$$

2. The power-useful signal the RRS creates at the input of the RTI station receiver can be calculated according to the expression [10]:

$$P_S = \frac{P_i \cdot G_{RRS} \cdot G_{RTI} \cdot \lambda^2 \cdot \eta_{RRS} \cdot \eta_{RTI}}{(4\pi)^2 \cdot R_{\max}^2 \cdot L_{LOSS}}. \quad (2)$$

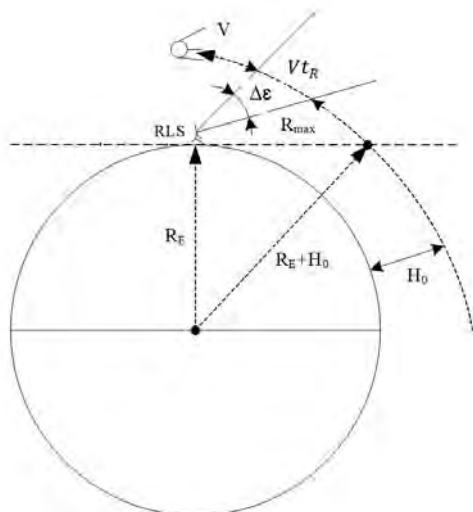


Figure 1 – The conditions of the conducting research

The gain RRS antenna can be calculated as follows:

$$G_{RRS} = \frac{4 \cdot \pi \cdot S_A \cdot K_A}{\lambda^2}. \quad (3)$$

The geometric antenna area is determined according to the expression:

$$S_A = L_\epsilon \cdot L_\beta. \quad (4)$$

3. In the case when the source of interference is the antenna noise and the inherent receiver noise, the total noise power at the input of the receiver can be determined according to the expression [12]:

$$P_N = k \cdot (T_A + T_{REC}) \cdot \Delta F_k. \quad (5)$$

The receiver noise temperature can be determined according to the expression ($T_0 = 300K$):

$$T_{REC} = T_0 \cdot (K_N - 1). \quad (6)$$

The influence of external noise is taken into account by entering the antenna noise temperature:

$$T_A = \eta_{RTI} (T_S + T_{ATM} + T_E) + (1 - \eta_{RTI}) T_0. \quad (7)$$

4. The signal-to-noise ratio can be calculated as follows:

$$q = \sqrt{\frac{2P_S}{P_N}}. \quad (8)$$

5. Having set the false alarm probability F , can find the correct detection probability of the signal with a random amplitude and an initial phase [12]:

$$D = F^{1+q^2/2}. \quad (9)$$

6. To check the fulfillment of the last two conditions of the electromagnetic availability of the RRS, it is enough to calculate the number of pulses of the terrestrial RLS, which will arrive at the input of the RTI receiver channel.

The number of receiver reconfigurations by frequency of the RTI station during the sequential search can be calculated according to the expression:

$$N_f = \frac{\Delta F}{\Delta F_K}. \quad (10)$$

The reconnaissance time is determined:

$$t_R \approx \frac{\Delta \epsilon \cdot R_{\max}}{V}. \quad (11)$$

The number of pulses at the IRT receiver input, when it is tuned to a certain frequency can be calculated as follows:

$$M = \frac{F_i \cdot t_R}{2N_f} \quad (12)$$

4 EXPERIMENTS

For further research, we will consider ground-based air defense RLS as RRS [13]. The analysis of tactical and technical characteristics of RLS showed that they can be combined into groups according to the working wavelength, at each of which a change of the pulse repetition frequency F_i is possible. Most devices work with a wavelength of 23 cm (F_i from 180 Hz to 680 Hz) and ten cm (F_i from 200 Hz to 1000 Hz).

The parameters of typical RLS, for which the probability indicators of signal detection by the RTI spacecraft will be calculated, are given in Table 1. RLS perform a circular viewing of space with a different angular velocity of antenna rotation and have a different operating range, which provided by the size of the antenna system and the energy of the emitted signal.

The analysis carried out in [4] for typical RLS showed that the fulfillment of the conditions for the unambiguity of measurements in azimuth is ensured when the RTI station is placed on the SC with an orbit altitude of 14200 km (SC speed $V=4.4$ km/sec). At the same time, the maximum range to the RRS, according to (1), will not exceed 20,000 km.

Instead of calculating the signal-to-noise ratio for each RLS given in Tab.1, this value can be calculated for a virtual RLS with minimum signal energy. From Tab.1 can be seen that the minimum EIRP value is 101 dB and the minimum impulse duration is two μ s.

Therefore, the signal-to-noise ratio can be calculated for a virtual radar that uses the signal with an impulse duration of two μ s at a frequency of three GHz and has EIRP = 101 dB.

5 RESULTS

The calculation of the signal-to-noise ratio for the virtual RLS can begin with the determination of the noise power at the input of the analysis unit of the RTI station.

For the search of the RRS signal by frequency, it is necessary to set the parameters of the analysis unit of the

RTI station. Suppose, that the signal search range by frequency $\Delta F = 0.5-18$ GHz and $\eta_{RRS} = \eta_{RTI} = 0.7$.

The receiver with a bandwidth $\Delta F_K = 1$ MHz carries out a sequential search by frequency and has $K_N \approx 3$.

Then, according to (6), the receiver noise temperature is $T_{REC} = 600K$. For a signal frequency greater than 1 GHz, the space noise temperature T_S is almost zero, the atmosphere noise temperature is $T_{ATM} \approx 110K$ and the average Earth noise temperature is $T_E \approx 250K$ [11]. The maximum of the RTI station antenna pattern is toward the Earth, therefore the component T_E is completely included in the noise temperature (7) and $T_A \approx 340K$. Then, according to (5), the noise power at the IRT receiver input $P_N \approx 1.3 \cdot 10^{-14}W$.

The power-useful signal at the input of the RTI station receiver with a non-directional antenna, that creates by the virtual RLS with $K_A = 0.7$ will be calculated according to the expression (2). At the same time, the total signal loss for the 3 GHz frequency does not exceed six dB [10]. Then, the power useful signal $P_S = 2.7 \cdot 10^{-10}W$ and the signal-to-noise ratio, according to (8), will be 23 dB. The correct detection probability of a signal with a random amplitude and an initial phase, according to (9), will be 0.99 at $F = 10^{-4}$.

A necessary and sufficient condition for detecting a signal is the arrival of at least one pulse at the input of the RTI receiver tuned to a certain frequency during the reconnaissance time. Verify the fulfillment of this condition can also by using a virtual radar, which generates the minimum number of pulses during reconnaissance. According to expressions (11) and (12), the minimum number of pulses at the input of the RTI station receiver will be at the minimum values of $\Delta\varepsilon = 20^0$ and $F_i = 180$ Hz.

The number of the receiver reconfigurations by frequency of the RTI station during the sequential search, according to (10), will be $N_f = 18000$ at $t_R \approx 1586$ sec.

During this time, at least seven pulses will arrive at the input of the RTI station receiver, according to (14), but even with one pulse, the virtual RLS signal is detected with sufficiently high-quality indicators.

Table 1 – RLS parameters

RLS	Range, km	λ , cm	τ_i , μ s	P_i , kW	$L_\varepsilon \times L_\beta$, m	EIRP, dB	$\theta_\varepsilon(\theta_\beta)$ degree	Ω_a , rpm
								$\Delta\varepsilon$ degree
AR5	400	23	2-5	2000	14.4x5.4	104	40 (1.2)	8/40
S625	340	23	5	4600	7.4x2.4	101	45 (2.3)	6/45
S690	400	23	10	3300	14.5x4.5	106	30 (1.25)	6/30
S640	600	10	10	6000	12.2x4.7	115	30 (0.62)	5/30
AN/TPS-32	550	10	30	2200	3.1x8.2	107	0.9 (2.2)	6/20

6 DISCUSSION

The radar with an active synthesis of the antenna aperture uses the motion of the antenna over a surface Earth to provide finer spatial resolution than conventional beam-scanning radars. The altitude of the spacecraft orbit, size of the board antenna and the parameters of the RLS signal emitted is provide of the uniqueness main antenna pattern both in range and in azimuth. At the same time, the information about the parameters of the emitted signal is always known.

Recent military conflicts have shown the importance of obtaining timely and reliable information about the enemy's active RLS. Detection of radiation from RLS located on the earth's surface is using passive monitoring systems in a certain frequency range. The literature is given the results of checking the possibility of passive synthesizing the antenna aperture, in particular, based on signals from navigation satellite systems or sources of radio astronomical radiation. In contrast from this studies, in work estimated the electromagnetic accessibility of typical ground-based air defense radars. The use of the RTI spacecraft with a synthesized aperture of the antenna allows also an increase in the accuracy of the azimuthal direction measurements to the RLS. Therefore determining the electromagnetic availability of terrestrial RLS using the RTI station with a passive synthesis of the antenna aperture located on the SC is an actual scientific task.

At the same time, the parameters of the passive synthesis of the antenna aperture depend on the parameters of the SC orbit and the technical characteristics of both the RTI station and the terrestrial RLS. The air defense radars perform a circular viewing of space with a different angular velocity of antenna rotation and have a different operating range, which provided by the size of the antenna system and the energy of the emitted signal. The signal-to-noise ratio generated by the RLS at the input of the RTI station analysis device must be sufficient to search the signal in the space and for frequency. The analysis of the technical characteristics of the group of ground radars made it possible to calculate the signal-to-noise ratio only for the virtual radar, which generates the minimum number of pulses with the minimum energy during reconnaissance among all the analyzed radars.

A necessary and sufficient condition for detecting a signal is the arrival of at least one pulse at the input of the RTI receiver tuned to a certain frequency during the reconnaissance time. Verify the fulfillment of this condition proposed to calculate also by using a virtual radar, which generates the minimum number of pulses during reconnaissance.

The distance for which the calculation of indicators of the electromagnetic accessibility of RLS is provide of the uniqueness of the main maximum of the pattern at passive synthesis of the antenna aperture both in range and in azimuth. Proposed use of the correct detection probability of the signal as the resulting indicator of electromagnetic accessibility of the RLS. Analytical calculation of the correct detection probability of the signal of the air de-

© Vakaliuk T. A., Andreiev O. V., Dubyna O. F., Nikitchuk T. M., Puleko I. V., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-2

fense radars by the SC of RTI based on the determination of the signal-to-noise ratio at the input of the detection device were carried out. The methodology for calculating electromagnetic accessibility indicators is based on generally accepted theoretical principles, so the obtained results can be considered reliable.

CONCLUSIONS

The scientific problem by the need to analyze the electromagnetic accessibility of terrestrial radio radiation sources at long distances, which is typical for the operation of a spacecraft of radio technical intelligence with a passive synthesis of the antenna aperture.

In contrast to similar studies using monitoring systems with the passive synthesis of the antenna aperture, an assessment of the electromagnetic accessibility of typical ground-based air defense radars.

The mathematical aspects of calculating the probability of correct detection of signals for a group of ground radars were further developed by introducing a virtual radar that generates the minimum number of pulses with the minimum energy during reconnaissance among all radars, which analyzes.

Practical significance. In the example radar stations of the air defense proved, that the proposed parameters of the space radio technical intelligence system with a passive synthesis of the antenna aperture provide quite acceptable values of the correct probability detection of the signal. The correct detection probability of a signal with a random amplitude and an initial phase is $D = 0.99$ at $F = 10^{-4}$.

When sequential searching for the virtual radar signal by frequency in the range of 0.5–18 GHz with a step of one MHz, during the reconnaissance time, at least seven pulses will arrive at the input of the RTI station receiver. The frequency of the search channel will be hopping by one MHz every 38 msec, which is quite acceptable for modern monitoring systems.

Directions for further research there is estimate the possible accuracy of the different methods determining the radar located on the Earth's surface when using the RTI spacecraft with the passive synthesis of the antenna aperture.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the management of Zhytomyr Polytechnic State University for the opportunity to conduct scientific research.

REFERENCES

1. Mosov S. P. Aerokosmichna rozvidka u suchasnykh viiskovykh konfliktakh. Kyiv, Rumb, 2008, 248 p.
2. Pro skhvalennia Kontseptsii Zahalnodержavnoi tsilovoi naukovo-tekhnichnoi kosmichnoi prohramy Ukrainy na 2021–2025 roky. Rezhym dostupu: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-koncepciyi-zagaln-a15r>
3. Dubyna O. F., Andreiev O. V., Nikitchuk T. M. et al. Vyznachennia tochnosti vymiru vysot ob'ektiv pry avtomatichnii obrobtii stereoznimkiv, *Visnyk Natsionalnoho*



- tekhnichnoho universytetu Ukrainy "Kyivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya: Radiotekhnika. Radioaparotobuduvannia, 2020, 82, pp. 67–73.
- Dubyna O. F., Andreiev O. V., Nikitchuk T. M. et al. Syntezuvannia apertury anteny za syhnalame nazemnykh radiolokatsiinykh stantsii z kosmichnoho nosiia, *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, 2022, 22, pp. 69–78.
 - DeFlorio S., Neff T., Zehetbauer T. Optimal operations planning for SAR satellite constellations in low earth orbit, *Conference: 6-th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations, September 2005*. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/224779016_optimal_operations_planning_for_sar_satellite_constellations_in_low_earth_orbit
 - Bianchessi N., Righini G. A mathematical programming algorithm for planning and scheduling an earth observing SAR constellation, *Proceeding of 5th International workshop on planning and scheduling for space, January 2006*. Access mode: https://www.researchgate.net/publication/244958413_A_Mathematical_Programming_Algorithm_for_Planning_and_Scheduling_an_Earth_Observing_SAR_Constellation
 - Hatsenko S. S., Dudnyk V. P., Sotnichenko A. I. et al. Otsinka efektyvnosti ta nadannia praktychnykh rekomendatsii shchodo funktsionuvannia systemy radioelektronnoi rozvidky v interesakh pidhotovky y vedennia stabilizatsiinoi operatsii, *Problemy stvorennia, vyprovuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, 2019, 17, pp. 64–78.
 - Sean P., Haynes M. S., Schroeder D. M., Castelletti D. et al. Passive Synthetic Aperture Radar Imaging Using Radio-Astronomical Sources, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 99, pp. 1–16. Access mode: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3050429>
 - Fryz P. V. Osnovy pobudovy spetsialnykh kompleksiv kosmichnoi vydovoi rozvidky. Zhytomyr, Vyd. O. O. Yevenok, 2020, 412 p.
 - Pilinskyi V. V. Tekhnichna elektrodynamika ta poshyrennia radiokhvyl [Elektronnyi resurs]. Kyiv, Kafedra, 2014, 336 p. Rezhym dostupu: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19132>
 - Recommendation ITU-R P.372-13 (09/2016). Radio noise. Electronic Publication, Geneva, 2016. Access mode: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-13-201609-S!!PDF-E.pdf
 - Manoilov V. P., Omelchuk V. V., Opaniuk V. V. Dystantsiine zonduvannia Zemli iz kosmosu: naukovo-tekhnicni osnovy formuvannia y obrobky vydovoi informatsii. Zhytomyr, ZhDTU, 2008, 384 p.
 - Cherniavskiy H. P., Bolotnykov V. I., Chumakevych V. O. Dovidnykovyi posibnyk po vyznachenniu inozemnykh armi. Zhytomyr, ZhVIRE, 2000, 124 p.

Received 25.04.2023.

Accepted 08.05.2023.

УДК 629.783

ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ НАЗЕМНИХ РЛС КОСМІЧНИМ АПАРАТОМ ІЗ ПАСИВНИМ СИНТЕЗОМ АПЕРТУРИ АНТЕНИ

Вакалюк Т. А. – д-р пед. наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

Андрєєв О. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

Дубина О. Ф. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій у медицині та телекомунікаціях, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

Нікітчук Т. М. – канд. техн. наук, доцент, декан факультету інформаційно-комп'ютерних технологій, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

Пулеко І. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та кібербезпеки, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність зумовлена необхідністю проведення аналізу електромагнітної доступності та розрахунку ймовірнісних показників виявлення сигналів наземних джерел радіовипромінювання на досить великих відстанях, що характерно для роботи космічного апарату радіотехнічної розвідки із синтезованою апертурою антени.

Метою роботи є визначення електромагнітної доступності наземних радіолокаційних станцій для космічних засобів радіотехнічної розвідки з пасивним синтезом апертури антени та розрахунок ймовірнісних показників виявлення факту випромінювання сигналів.

Метод. Аналітичний розрахунок ймовірності правильного виявлення сигналу джерел радіовипромінювання космічною системою радіотехнічної розвідки з пасивним синтезом апертури антени на основі визначення відношення сигнал/шум на вході пристрою виявлення, при заданих параметрах космічної системи розвідки. Аналіз технічних характеристик групи наземних РЛС дозволив розрахувати ймовірність правильного виявлення лише для віртуальної РЛС, яка генерує мінімальну кількість імпульсів з мінімальною енергією за час розвідки серед усіх РЛС, що підлягали аналізу.

Результати. Переверено виконання умов електромагнітної доступності та розрахована ймовірність виявлення сигналів сучасних радіолокаційних станцій космічною системою радіотехнічної розвідки з пасивним синтезом апертури антени.

Висновки. Як результуючий показник електромагнітної доступності запропоновано використовувати ймовірність правильного виявлення сигналу джерела радіовипромінювання. Доведено, що обрані параметри космічної системи радіотехнічної розвідки забезпечують цілком прийнятні значення ймовірності правильного виявлення сигналів наземних радіолокаційних станцій протиповітряної оборони.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: космічна система, антена із синтезованою апертурою, радіотехнічна розвідка, радіолокаційна станція, електромагнітна доступність.

ЛІТЕРАТУРА

1. Мосов С. П. Аерокосмічна розвідка у сучасних військових конфліктах / С. П. Мосов. – Київ : Румб, 2008. – 248 с.
2. Про схвалення Концепції Загальнодержавної цільової науково-технічної космічної програми України на 2021–2025 роки. – Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-shvalennya-konceptsiyi-zagaln-a15r>
3. Визначення точності виміру висот об'єктів при автоматичній обробці стереознімків / [О. Ф. Дубина, О. В. Андреев, Т. М. Нікітчук та ін.] // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія: Радіотехніка. Радіоапаробудування. – 2020. – 82. – С. 67–73.
4. Синтезування апертури антени за сигналами наземних радіолокаційних станцій з космічного носія / [О. Ф. Дубина, О. В. Андреев, Т. М. Нікітчук та ін.] // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2022. – 22. – С. 69–78.
5. DeFlorio S. Optimal operations planning for SAR satellite constellations in low earth orbit / S. DeFlorio, T. Neff, T. Zehetbauer // Conference: 6-th International Symposium on Reducing the Costs of Spacecraft Ground Systems and Operations, September 2005. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/224779016_optimal_operations_planning_for_sar_satellite_constellations_in_low_earth_orbit
6. Bianchessi N. A mathematical programming algorithm for planning and scheduling an earth observing SAR constellation / N. Bianchessi, G. Righini // Proceeding of 5th International workshop on planning and scheduling for space, January 2006. – Режим доступу : https://www.researchgate.net/publication/244958413_A_Mathematical_Programming_Algorithm_for_Planning_and_Scheduling_an_Earth_Observing_SAR_Constellation
7. Оцінка ефективності та надання практичних рекомендацій щодо функціонування системи радіоелектронної розвідки в інтересах підготовки й ведення стабілізаційної операції / [С. С. Гаценко, В. П. Дудник, А. І. Сотніченко та ін.] // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2019. – 17. – С. 64–78.
8. Passive Synthetic Aperture Radar Imaging Using Radio-Astronomical Sources / [P. Sean, M. S. Haynes, D. M. Schroeder et al.]// IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2021. – 99. – P. 1–16. – Режим доступу : <https://doi:10.1109/TGRS.2021.3050429>
9. Фриз П. В. Основи побудови спеціальних комплексів космічної видової розвідки / П. В. Фриз. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 412 с.
10. Пілінський В. В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль [Електронний ресурс] : / В. В. Пілінський. – Київ : Кафедра, 2014. – 336 с. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/19132>
11. Recommendation ITU-R P.372-13 (09/2016). Radio noise. Electronic Publication, Geneva, 2016. – Режим доступу : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.372-13-201609-S!!PDF-E.pdf
12. Манойлов В. П. Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації / В. П. Манойлов, В. В. Омельчук, В. В. Опанюк. – Житомир : ЖДТУ, 2008. – 384с.
13. Чернявський Г. П. Довідниковий посібник по визначенню іноземних армій / Г. П. Чернявський, В. Й. Болотников, В. О. Чумакевич. – Житомир : ЖВІРЕ, 2000. – 124 с.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 519.2

КОНЦЕПЦІЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНТРОПІЙНОГО ПРОСТОРУ ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ СИСТЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ ЗАДАЧ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

Козуля Т. В. – д-р техн. наук, професор кафедри програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління, Національний Технічний Університет «Харківський політехнічний інститут», Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішення завдань поглиблення міждисциплінарних системних досліджень при пошуку рішень задач сталого розвитку для реальних соціально-еколого-економічних об'єктів на основі системологічного моделювання та запровадження інформаційно-ентропійного простору визначення оцінки стану та функціональності таких об'єктів для прийняття управлінських рішень в умовах невизначеності.

Мета. Моделювання поточної ситуації дослідного соціально-еколого-економічного об'єкта у вигляді кооперативного зв'язку «дослідна система – навколишнє середовище» на базі системологічної моделі, що визначатиме умови досягнення цілі дослідження об'єкта завдяки виявленню синергетичної взаємодії внутрішніх і зовнішніх факторів у інформаційно-ентропійному просторі подання функціонування об'єкта.

Метод. У роботі наведено результати логіко-експериментального дослідження з оцінки стану складних об'єктів соціально-еколого-економічної природи, їх розвитку в умовах стохастичного зовнішнього середовища з позицій відповідності вимогам сталого розвитку на основі запропонованого підходу, що становить системологічну основу створення ентропійної моделі дослідного об'єкта, алгоритмізації розв'язку задачі оцінки цільового стану складних системних об'єктів за значенням екологічного функціоналу якості, що становить співвідношення ентропійних функцій стану «системи об'єкта – навколишнє середовище» і процесів взаємодії між ними, отриманих за результатами статистичного аналізу даних моніторингу об'єктів, віднесених до техногенних (економічних), соціальних і природних систем.

Результати. Вперше запропоновано використання комплексного поєднання положень системології для визначення структури об'єкта дослідження, теоретичного знання з інформаційної ентропії для опису параметрів стану будь-якого елемента систем об'єкта та метрики ентропійного опису станів і процесів. Для остаточної оцінки рівноваги функціонування дослідного об'єкта впроваджено відносний функціонал відповідності, що дозволяє оцінити наявність точок нестабільності системного і процесного характеру на основі моделі вкладеної системної структури, що важливо для прийняття рішень з передбаченням синергетичних позитивних відгуків.

Висновки. Визначені переваги запропонованого комплексного підходу ентропійного оцінювання станів систем і процесів у них на основі системологічної моделі «об'єкт – навколишнє середовище» для визначення умов регулювання сталого розвитку дослідного об'єкта завдяки використанню виявлених самодовільних і природних синергетичних відгуків. Отримано універсальну базу дослідження складних системних утворень з оцінки сталості їх стану та функціональності завдяки синергії процесів і зв'язків «об'єкт – навколишнє середовище» на основі комплексного використання системологічного моделювання, ентропійного оцінювання вхідних даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: системологія моделювання, вкладені системні системи, ентропійна функція стійкості, синергетичні ефекти логічні структури оцінки стану процесів і станів, ентропійний функціонал.

АБРЕВІАТУРИ

НС – навколишнє середовище;
НЧС – надзвичайна ситуація;
ВСС – вкладена складна система чи структура;
MSRV – max синергетична випадкова величина;
PID – the Partial Information Decomposition framework, система часткового розкладання інформації.

НОМЕНКЛАТУРА

S_{inside}^1 – ентропія стану об'єкта;

S_{inside}^1 – ентропія стану складових систем об'єкта;

$S_{outside}^2$ – ентропія зовнішнього середовища;

$S_{outside}^2$ – ентропія стану систем зовнішнього середовища, що безпосередньо оточують об'єкт;

$S_{process}^1_{inside}$ – ентропія процесів, що стосуються внутрішнього простору об'єкта дослідження;

$S_{process}^1_{inside_i}$ – ентропія процесів у системах внутрішнього простору об'єкта;

$S_{process}^2_{outside}$ – ентропія процесів, що відбуваються в зовнішньому просторі об'єкта дослідження;

$S_{process}^2_{outside_j}$ – ентропія процесів, які відзначені в системах, оточуючих об'єкт зовні;

$I(X : Y)$ – взаємна інформація Шеннона;

$H(Y)$ – ентропія загальної кількості інформації;

P_r – умовний розподіл ймовірностей;

$H(Y | X)$ – умовна ентропія;

$I(X; 1,2)$ – терм компонента надмірності між змінними 1 і 2;

$I(X; 1,2 \setminus 1,2)$ – терм синергетичної інформації двох змінних;

F – функціонал відносної рівноваги;

F_{system} – функціонал оцінки рівня стану систем як порівняння відносних ентропійних функцій стану систем об'єкта та систем зовнішнього оточення;

$F_{process}$ – функціонал оцінки стану процесів як відношення ентропійної функції визначення процесів у системах і між системами в об'єкті до ентропійної оцінки стану зовнішніх процесів і впливу на об'єкт;

S_1 – загальна ентропійна характеристика стану об'єкта відповідно до дослідження на системологічному рівні «об'єкт – навколишнє середовище»;

S_2 – загальна ентропійна характеристика стану систем зовнішнього середовища відповідно до дослідження на системологічному рівні «об'єкт – навколишнє середовище»;

$\Delta S^1_{inside_i}$ – ентропійна оцінка змін у стані систем об'єкта за зменшенням величини ентропії або зростанням функції ентропії до max значення, що відповідає стану рівноваги «об'єкт – НС»;

$\Delta S^2_{outside_j}$ – ентропійна оцінка змін у стані систем НС за зменшенням величини ентропії або зростанням функції ентропії до max значення, що відповідає стану рівноваги «об'єкт – НС»;

$\Delta S_{process}^2_{outside_j} \rightarrow 0$ – зміни ентропійної функції перебігу процесів у зовнішньому середовищі, що забезпечують відсутність впливу на об'єкт;

$S^1_{inside_i} (std or norm)$ – ентропія стану систем об'єкта, що відповідає гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^1_{inside_i} (norm func)$ – ентропія функціональності систем об'єкта відповідно до гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^2_{outside_j} (std or norm)$ – ентропія стану систем навколишнього середовища, оточуючого об'єкт, за умови гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S^2_{outside_j} (norm func)$ – ентропія функціональності систем навколишнього середовища, оточуючого об'єкт, за умови гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S_{process}^1_{inside_i} (norm func)$ – ентропійна функція, що відповідає за стан перебігу процесів в системах об'єкта для підтримки гомеостазу «об'єкт – НС»;

$S_{process}^2_{outside_j} (norm func)$ – ентропійна функція, що відповідає за стан перебігу процесів в системах зовнішнього середовища, оточуючих об'єкт, для підтримки гомеостазу «об'єкт – НС»;

S_1^{norm} – функція ентропії стану об'єкта, що визначає рівновагу чи досягнення цільової функції для системи «об'єкт – НС»;

S_2^{norm} – функція ентропії стану систем НС, взаємодіючих з об'єктом, що визначає рівновагу чи досягнення цільової функції для системи «об'єкт – НС».

ВСТУП

Вирішення завдань забезпечення сталого розвитку суспільства (sustainable development) є усе більш проблемним у зв'язку з великою масштабністю та інтенсивністю господарської діяльності в умовах зростання темпів її розвитку і непередбачуваності відгуків навколишнього середовища на інформаційний тиск з боку соціально-економічних систем. Проблемні області досліджень пов'язані з необхідністю своєчасного виявлення ознак розвитку НС, що викликані негативними наслідками синергетичних відгуків від прихованих (недооцінених) перебігів процесів як наслідків взаємодії природних елементів систем з техногенними факторами впливу на соціально-екологічні складові дослідного об'єкта.

Пошук шляхів, механізмів, методів, які могли б запобігти руйнуючому впливу господарської діяльності на навколишнє природне середовище, пов'язаний з обґрунтуванням і прийняттям до дії науково-теоретичних основ з конкретним змістом поняття «сталий розвиток». При розв'язку таких комплексних проблемних задач доцільно у першу чергу сформулювати міждисциплінарну наукову базу, що дозволить виявити універсальні закономірності розвитку систем будь-якої природи за реалізацією довільних процесів, що становлять самоорганізацію систем.

Теорія самоорганізації є наукою про складну й сталу нерівновагу, нестационарні та динамічні структури. Саме це й пов'язують з синергетикою як теорією самоорганізації [1–3], дисипативних структур [4–5], динамічного хаосу [6].

Загалом поширеним є визначення синергетики як теоретичного опису засобів кооперації, когерентного взаємозгодження поведінки природних і людських систем в складно організованих утвореннях. Для системних досліджень таких об'єктів і кібернетичних ідей синергетика дозволяє виявити принципи еволюції й коеволуції систем, встановити причини нестабі-

льності та хаосу, запровадити методи управління нестійкими складними системами завдяки використанню визначених процесів підтримки їх самоорганізації і рівноваги з НС [7].

Синергетичний підхід, пов'язаний з нелінійним аналізом складних динамічних систем і явищ, обчисленням експериментальних даних і математичним моделюванням, пропонується вважати основою для формування корпоративних знань у будь-якій науковій галузі, для вивчення та отримання цільової інформації та рішень. Трансдисциплінарні риси синергетичного підходу надають можливість перенесення когнітивних схем з однієї суб'єктної області на іншу з виникненням спільних просторів існування.

У межах синергетичного аналізу щодо стану системи будь-якої складності діють еволюційні правила заборони. Це дозволяє визначати напрями переходів до стаціонарного співвідношення системи з навколишнім середовищем (гармонізації). На основі об'єднання систем об'єкта з оточуючими його системами НС в єдине утворення визначають умови для процесів синергетичної дії з підтримки самоорганізації рівноваги «об'єкт – НС» [1–14].

Грунтовні рішення на синергетичній основі вимагають комплексності структурування об'єкта дослідження системного рівня складності. Це важливо в умовах динамічних змін у природних системах, що знаходяться у взаємодії з соціально-економічним простором. Для регулювання їх сталого розвитку доцільним є звернення до положень системології.

Таким чином, пошук чи розробка методів аналізу й моделювання складних систем визначатиметься тим, що роль системи більш високого порядку (надсистеми) встановлюється через функціональне призначення (цільову функцію) та відзначені при дослідженні сутнісні властивості.

Система зі своїми функціональними властивостями є наслідок наявності функціонального запиту надсистеми на її певну функцію. У процесі функціонування системи в надсистемі її функція (поточна внутрішня детермінанта) поступово наближається до функції (граничної внутрішньої детермінанти), що задається запитом надсистеми. Таким чином здійснюється узгодження внутрішньої детермінанти з зовнішньою детермінантою, що є основою аналізу складних систем на основі системологічного підходу [15].

У разі розгляду задач сталого розвитку при вивченні об'єкта дослідження як соціально-еколого-економічної системи встановлюється ступінь адаптованості її до запиту надсистеми, що становить вимоги безпеки навколишнього середовища.

Об'єкт дослідження – системологія моделювання складних об'єктів сталого розвитку на основі подання їх в інформаційно-ентропійному просторі оцінювання стану та функціональності як «об'єкт – НС».

Предмет дослідження – побудова моделей системних об'єктів як вкладених складних систем, інформаційно-ентропійного простору оцінки стану систем і процесів у них за ентропійною функцією.

Мета дослідження – отримання системної моделі оцінювання стану динамічно розвиваючих системних об'єктів з пошуку точок сталості за рахунок виникнення синергетичних відгуків на зовнішні управлінські дії для регулювання рівноваги «об'єкт – навколишнє середовище». Такий підхід є універсальним з пошуку умов забезпечення сталого розвитку будь-якого об'єкта при певному зовнішньому оточенні.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для вирішення певних завдань соціально-еколого-економічного змісту стосовно сталого розвитку пропонується мати моніторингові результати виду «об'єкт – навколишнє середовище», інформацію щодо умов рівноваги між системами об'єкта і системами НС за рахунок перебігу певних процесів у зовнішньому середовищі та об'єкті безпосередньо. Результат таких процесів повинен мати синергетичну дію проти дестабілізуючих сил, тобто таке співвідношення функцій ентропії стану самих систем дослідного об'єкта і процесів у них, що становить міні відхилення функції порядку чи відповідності виду $S = S_{inside}^1 + S_{outside}^2$.

Динамічна стабільність чи стала рівновага в «об'єкт – НС» контролюється величиною співвідношення ентропії стану систем і процесів у них, визначається результатами ентропійного оцінювання стану взаємодії систем об'єкта з зовнішнім середовищем. Для ґрунтовності використання ентропійного оцінювання статички і динаміки «об'єкт – НС» з прийняття рішень сталого розвитку пропонується:

1) формування моделі дослідного системного об'єкта типу «система + внутрішні процеси – навколишнє середовище = зовнішні системи + процеси впливу/взаємодії» з оцінкою її стану загальною функцією ентропії з урахуванням $S_{inside}^1, S_{inside_i}^1$ і $S_{process_{inside}^1}, S_{process_{inside_i}^1}$; $S_{outside}^2, S_{outside_i}^2$ і $S_{process_{outside}^2}, S_{process_{outside_i}^2}$;

2) визначення метрики оцінки стану систем як сталих об'єктів і процесів як динамічних систем в інформаційно-ентропійному просторі їх існування;

3) пошук синергетичних рішень для визначення точок довольного регулювання рівноважного стану системного об'єкта при розв'язанні задач сталого розвитку соціально-еколого-економічних систем.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Наукові дослідження з вивчення питань інноваційних технологій та природи нових об'єктів і їх властивостей повинні мати справу з основами синергетики як науки міждисциплінарного характеру про процеси розвитку й самоорганізації різних складних систем, ґрунтуючись на тектології Богданова А. І., теорії систем Л. фон Берталанфі, кібернетики Н. Вінера. Завдяки такій комплексності в дослідженнях надаються загальні уявлення про системи, їх структури та механізми підтримки їх цілісності або гомеостазу на осно-

ві врахування синергетичної саморегуляції через перебіг певних процесів взаємодії між системами [1–14].

Завдяки зверненню до процесів еволюції складних саморозвиваючих систем, опираючись на методи нелінійної математики й розділів природних і технічних наук, які вивчають процеси, виявляють стійкі інформаційні закономірності становлення зв'язків об'єкта з оточуючими системами НС.

Процеси в залежності від наслідків їх реалізації на стані дослідних систем і зовнішнього середовища при розв'язку проблем сталого розвитку – забруднення повітря, продовольча безпека, дефіцит води; «тимчасова захворюваність» тощо, які за екологічно-організаційним рівнем мають локальний, глобальний масштаб, пов'язуються з синергетичним відгуками [8–13]. Це є в свою чергу основою використання функціональних можливостей і властивостей об'єкта як засобу керування його якістю.

Підвищення складності систем у результаті еволюції пов'язують з проявом синергії. За думкою науковців взаємодія між системами має можливості стабілізувати нерівноважні й стохастичні варіації завдяки синергетичним явищам [8].

Дослідження складних систем пов'язуються з отриманням інформації про властивості об'єкта у цілому і його взаємодії з системами НС. Така інформація використовується для системологічного опису «об'єкт – НС», що визначає крім стану систем в об'єкті дію сил зв'язку між ними і з системами НС та особливості щодо встановлення гомеостазу об'єкта з НС. За думкою науковців це можливо завдяки стійкості синергії до шуму [5–8].

Кількісне визначення синергії між стохастичними змінними є важливою задачею теорії інформації [9]. Інформаційна синергія виникає тоді, коли багато джерел разом прогнозують результат змін краще, ніж сума прогнозів за окремими джерелами, тобто об'єктні процеси розглядаються цілісно через основні положення теорії інформаційної синергії.

Проведення процесу синергетичного моделювання за умови міждисциплінарних досліджень загалом становить такі складові [14–17]:

- 1) постановка завдання в дисциплінарному плані, в т.ч. міждисциплінарна експертиза;
- 2) визначення, аналіз, оцінка дослідних даних щодо основних процесів, зворотних зв'язків за принципами синергетики на емпіричному матеріалі;
- 3) побудова когнітивної моделі для відображення структурно-функціональних зв'язків в об'єкті у вигляді «дослідна система – навколишнє середовище» для формалізації динаміки;
- 4) математичне рішення моделі для визначення умов рівноваги та синергетичних ефектів від окремих процесів взаємодії «об'єкт – НС»;
- 5) прийняття рішень щодо коригування моделі на основі прогностичних даних у часовій динаміці моделі відповідно до реальної системи.

Задача побудови моделі на єдиній платформі інформаційної ентропії для узгодження в одній моделі

статики станів складових систем об'єкта і процесів внутрішнього характеру і зовнішнього впливу систем НС на об'єкт розглядається в даній статті.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

При комплексному науковому пошуку доцільно спочатку використати системно два підходи методології дослідження: *аспектний* – акцентування уваги на окремих задачах проблеми з позицій актуальності та врахування ресурсів; *концептуальний* – встановлення ключових положень, що визначають загальні напрями, архітектоніку та поступовість досліджень. У такому порядку будується певний вектор пошуку відповіді на питання наукового порядку та виходу з невизначеності щодо стану об'єкта дослідження і перебігу процесів в ньому з підтримки його функціональності через встановлення інформації про нього та знання про його природу.

Невизначеність знижується на кількість інформації, яка отримана в процесі вибору або ухвалення рішення з наявного числа альтернатив. До уваги береться саме інформація, а не дані. Під *даніми* розуміють початкові відомості (сигнали) про варіації (відхилення, невідповідності) змінних (ступінь агрегації низький). При формуванні інформації розрізняють проміжні відомості як агрегація первинних даних, що інформують про динаміку змін; заключні відомості – нагромадження й агрегація інформаційних даних, що використовують у процесі прийняття рішень [16–17].

Синергетичний підхід має на увазі дослідження системних утворень «об'єкт – навколишнє середовище (зовнішні системи)», надання інформації щодо стану об'єкта з виходом на знання і управляючу дію щодо отримання цільового результату з інновації чи збереження природної цілісності об'єкта.

У наукових публікаціях простежується дві головні концепції проведення таких комплексних досліджень, що мають включати мезо- та макрорівні розгляду складних систем, а саме синергетичні аспекти теорії інформації (синергетична інформація, отримання знань) і синергічна ентропія в теорії ентропії стосовно визначення динамічних змін і встановлення логічної узгодженості «стан – процес».

Отже, з урахуванням наявного зовнішнього середовища, результатів виявлення процесів, що контролюють умови функціонування об'єкта, формується основа для управління якістю дослідного об'єкта як системного утворення, що визначається техногенним, природним чи соціальним аспектами [7–16].

Змінність стану систем і їх функціональності уразі динамічної природи спостережуваних об'єктів потребує своєчасного отримання інформації стосовно результату Y за допомогою набору джерел змінних $X \equiv \{X_i\}_i$ згідно з класичним врахуванням взаємної інформації Шеннона [11]:

$$I(X : Y) = H(Y) - H(Y | X), \quad (1)$$

де $H(Y)$ – ентропія Y позначає загальну кількість інформації, необхідної в середньому для визначення унікального значення Y :

$$H(Y) = -\sum_y \Pr(Y = y) \log_2 \Pr(Y = y). \quad (2)$$

Для умовної ентропії $H(Y|X)$ відповідно до ланцюгового правила $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$ мають вираз виду

$$H(Y|X) = -\sum_x \Pr(X = x) \sum_y \Pr(Y = y | X = x) \times \log_2 \Pr(Y = y | X = x). \quad (3)$$

Таким чином позначається решта ентропії Y , враховуючи, що $H(X)$ та $I(X:Y)$ поширюються на вектори змін у системі «об'єкт – НС».

Запропоновано для урахування невизначеності щодо Y ввести і використовувати поняття максимальної синергетичних випадкових величин (MSRV). Типовий MSRV має близько 75 % максимально можливої інформації з X . Це означає, що набір MSRV є розрахунковим або взаємна інформація невеликого набору MSRV стає максимально можливою взаємною інформацією для практичного використання [10].

Пошук синергетичних ефектів при наявності, дії, взаємодії певних факторів внутрішнього характеру і зовнішнього починається з визначення набору дискретних стохастичних змінних X , який відображають матрицею спільних ймовірностей розмірності m^n , де n – кількість змінних; m – кількість можливих значень на змінну. Ця матриця однозначно визначена $m^n - 1$ незалежними параметрами, кожен на одиничній лінії.

За алгоритмом розрахунку максимально синергетичних випадкових величин для встановлення синергетичної інформації розглядається розподіл $\Pr(X_1, X_2, Y)$. Усі змінні обмежені однаковою кількістю можливих значень відповідно до умов експерименту так названим «простором стану». До робочих відносять дані, які отримані шляхом вибіркової вибірки розподілу ймовірностей з виміром синергетичної інформації $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ [10].

Більшість теоретичних робіт щодо визначення синергетичної інформації використовує систему часткового розкладання інформації PID, що становить

$$I(X:Y) = \text{synergy} + \text{individual}. \quad (4)$$

Синергетична інформація Y зберігає інформацію про X , менше інформації вона може зберігати про окремі X_i і навпаки, оскільки ці два типи інформації потрібно підсумувати до величини $I(X:Y)$ як невід'ємного терму. В цьому випадку синергетична інформація $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ не має даних про кількість «індивідуальної» інформації, що Y може зберігати про X_i . Синергетична інформація $I_{\text{syn}}(X \rightarrow Y)$ встанов-

люється за максимізацією ідентичності $I_{\text{syn}}(X \rightarrow X)$, яка зберігає максимум інформації про всі окремі змінні X_i . Для успішності запропонованої вимоги, щоб міра синергії виконувалась, синергетична інформація та індивідуальна інформація є взаємозалежними – збільшення однієї складової означає зменшення на стільки ж іншої [10–12].

Синергетичний підхід щодо дослідження системних утворень враховує зміни стану систем, зміни умов функціонування об'єкта у динамічному сенсі відповідно до поставлених задач для прийняття рішень. Згідно з наданою основою аналізу виявлення синергетичних ефектів при дослідженні складних систем (1)–(4) для моделі «системна структура дослідної системи – системи навколишнього середовища» запропоновано таку послідовність інформаційного оцінювання стану об'єкта з урахуванням невизначеності ситуації при спостереженнях [7–17]:

1) оцінка моніторингової інформації – умовний розподіл ймовірностей, умовна ентропія щодо результатів вимірювань показників стану та змінних;

2) пошук факторів впливу на результат підсилюючої позитивної дії чи факторів послаблення негативного зовнішнього впливу відповідно до оцінки стану дослідної системи чи цільової функції з врахуванням досвіду використання методу PID, методики роботи з синергетичною інформацією MSRV, характеристики взаємної і повної інформації;

3) отримання синергетичної інформації для повного і цілісного визначення ситуації «об'єкт – НС» у вигляді $\Pr(X_1, X_2, Y)$ на основі використання статистичного аналізу, ентропійного оцінювання при дослідженнях «стан-процес»;

4) визначення синергетичних дій в аналізованій ситуації з метою прийняття рішень щодо підсилення позитивних ефектів чи реалізації цільової функції.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Пропонується для характеристики статичних і динамічних результатів дослідження системної структури об'єкта та його оточуючого середовища, їх взаємодії використати ентропійну функцію як універсальну основу побудови системологічної моделі об'єкта дослідження, встановлення синергетичних ефектів в реалізації стану «об'єкт – НС» та оцінки зв'язку «стан – процес – зміни – стан».

Рекомендовано за теорією ентропійного аналізу для отримання детермінованої інформації при вирішенні питань соціально-еколого-економічного змісту використати інформаційну природу функції ентропії для аналізу стану системи та її функціональності. Враховуючи досвід застосування критерію ідентичності інформації на основі асоціацій ідентичності цільового джерела [12], визначаються ідентичності частин інформації відповідно до асоціативних зв'язків між цільовою функцією та змінними джерела при наявності обмежень на значення синергетичних термів. Пропонується використати загальні вирази, які відокрем-

люють кожен терм PID на стохастичний та детермінований компонент. У разі складного об'єкта «система – НС» введення такої ідентифікації при розгляді системи факторів дозволить встановлювати інформацію щодо наявності синергії.

Для створення єдиного матеріального та інформаційного простору складної системи, універсальної основи оцінювання стану, дії та взаємодії чинників будь-якої природи пропонується ентропійна та синергійна функція системних рішень. Ця функція дозволить надати комплексну оцінку складноструктурованим системним об'єктам і їх компонентам/елементам із можливістю співставлення оціночних результатів для ідентифікації стану та динаміки систем.

При наявності конкретної цілі X , утвореної однією змінною чи набором змінних і двома змінними (первинні джерела) 1 і 2, за якими необхідно надати інформацію про X , взаємна інформація кожної змінної про ціль визначається як

$$I(X;1) = I(X;1.2) + I(X;1\setminus 2). \quad (5)$$

де $I(X;1.2)$ – терм компонента надмірності між змінними 1 і 2 при спостереженні 1 або 2 окремо; $I(X;1\setminus 2)$ або $I(X;2\setminus 1)$ – терми кількісного визначення компонента, унікального для 1 або 2, відповідно, – інформація, яку отримують за однією зі змінних, але її неможливо отримати за іншою [12].

Спільна інформація 1 і 2 визначається за таким обчислюванням

$$I(X;12) = I(X;1.2) + I(X;1\setminus 2) + I(X;2\setminus 1) + I(X;12\setminus 1,2), \quad (6)$$

де $I(X;12\setminus 1,2)$ – терм синергетичної інформації двох змінних, тобто інформація, яку можна отримати лише при комбінації двох варіабельностей (при поєднанні двох змінних) [12].

Враховуючи рівності стандартних інформаційно-теоретичних ланцюгових правил, мають таке визначення інформації:

$$I(X;12) = I(X;1) + I(X;2\setminus 1) = I(X;2) + I(X;1\setminus 2), \quad (7)$$

де $I(X;1\setminus 2)$ – умовна взаємна інформація, тобто середня інформація, яку 2 надає про X , як тільки знання 1 відоме, то розкладається

$$I(X;2\setminus 1) = I(X;2\setminus 1) + I(X;12\setminus 1,2). \quad (8)$$

Аналогічно визначається умовна взаємна інформація, якщо 1 надає про X інформацію, як тільки знання 2 відоме $I(X;1\setminus 2)$.

Отже, при дослідженні складного об'єкта, рішення щодо природної рівноваги чи досягнення цільової функціональності встановлюється завдяки узгоджен-

ню роботи інформації внутрішнього і зовнішнього характеру (вирази (1–8)). Умовна інформація дорівнює сумі унікальних і синергетичних умов (рівняння (4)).

Відповідно до методологічних основ визначення інформаційно-ентропійного простору через функцію ентропії стану за емпіричними даними та інформації щодо ситуації в об'єкті, якій взаємодіє з системами навколишнього середовища, модель «об'єкт – НС» на макрорівні дослідження надається у вигляді вкладеної системної структури (рис. 1).

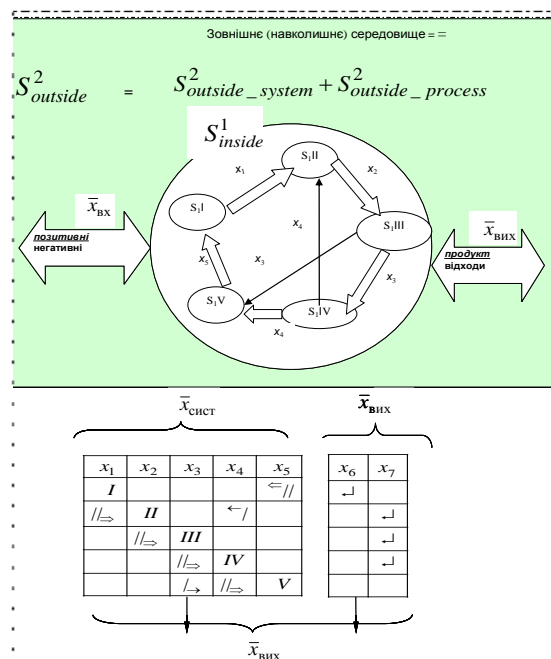


Рисунок 1 – Системологічне подання системи дослідження як «об'єкт – навколишнє середовище»

Для відображення аналітичної моделі об'єкта як ВСС враховують кооперативний зв'язок двох систем, що визначається узагальненою ентропією як функцією стану систем об'єкта і НС та процесів, що мають місце в внутрішньому просторі систем об'єкта і зовні, як результат взаємодії «об'єкт – НС» (рис. 2).

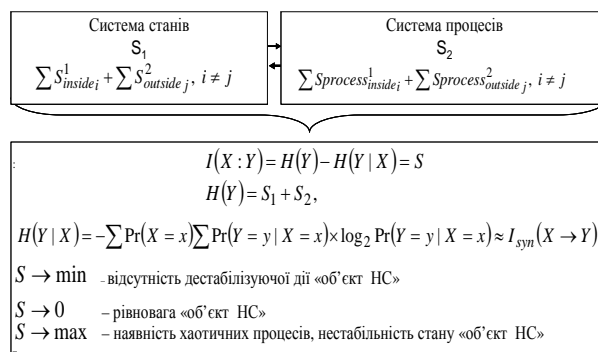


Рисунок 2 – Схема аналітичної моделі «об'єкт – НС»

Відповідно до запропонованої методології системологічного підходу подання аналітичної моделі дослідного об'єкта соціально-еколого-економічної природи з урахуванням синергетичних відгуків при певних взаємодіях його з НС розроблено алгоритм з по-

шуку рішень з сталого розвитку «об'єкт – НС», що враховує у комплексі всі рівні дослідження від локального до макрорівня оцінки стану об'єкта (рис. 3).

Алгоритмічне забезпечення передбачає, що дослідний системний об'єкт відповідає меті поставленої задачі, знаходиться у стані рівноваги завдяки сталості його функціональності за умови наявності внутрішньої та зовнішньої стабільності взаємодії «об'єкт – НС». Таким чином виключаються точки напруги щодо порушення стану рівноваги, підтримуються встановлені механізми довільного регулювання гомеостазу в системах об'єкта та НС завдяки перебігу процесів, що забезпечують функціональність «об'єкт – НС» і виключають дестабілізуючий вплив між системами.

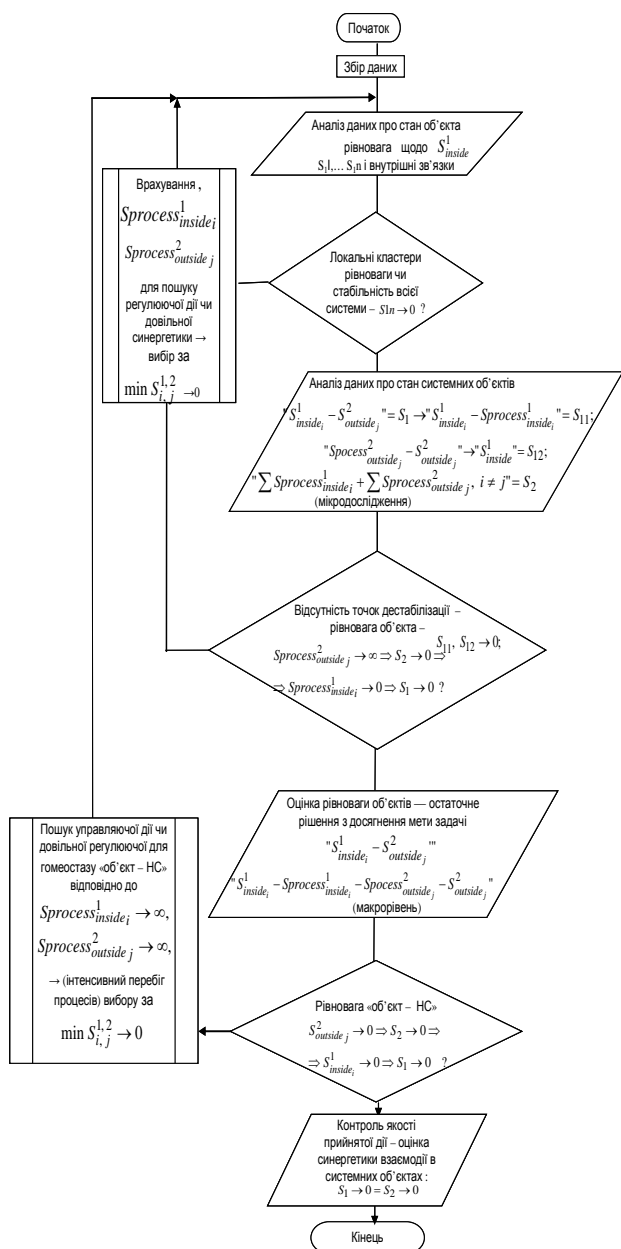


Рисунок 3 – Алгоритмічне забезпечення реалізації задачі оцінювання за ентропійною функцією стану «об'єкт – навколишнє середовище»

Відповідно до наданої методики аналізу пропонується така система ентропійного оцінювання:

1) функціонал оцінки відносної рівноваги, що визначається як відношення функції стану «об'єкт – НС» до функції характеристики процесів у складових і в системі «об'єкт – НС» (рис. 1, 2):

$$F = \frac{F_{system}}{F_{process}} = \frac{S^1_{inside_i} = 0 / Sprocess^1_{inside_i} \rightarrow 0}{S^2_{outside_j} = 0 / Spocess^2_{outside_j} \rightarrow 0} \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{S^1_{inside_i} / S^2_{outside_j}}{Sprocess^1_{inside_i} / Spocess^2_{outside_j}} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{S_1}{S_2} \rightarrow 0 \Rightarrow F = 0;$$

2) рішення щодо досягнення рівноваги на локальному рівні спостережень «об'єкт – НС», отримане за результатами аналізу та оцінки таким чином:

$$\frac{S^1_{inside_i} = \max = \Delta S^1_{inside_i} \rightarrow 0 \Rightarrow S_1 = 0}{S^2_{outside_j} = \max = \Delta S^2_{outside_j} \rightarrow 0 \Rightarrow S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \Delta Spocess^2_{outside_j} \rightarrow 0.$$

– рівновага систем об'єкта при рівноважному стану зовнішніх систем, що дозволяє реалізувати ситуацію відсутності впливу на об'єкт $\rightarrow F \rightarrow 0$;

$$\frac{S^1_{inside_i} = \max \left(Sprocess^1_{inside_i} = \max \rightarrow \Delta S^1_{inside_i} \rightarrow 0 \right) \Rightarrow}{S^2_{outside_j} = \max \left(Spocess^2_{outside_j} = \max \rightarrow \Delta S^2_{outside_j} \rightarrow 0 \right) \Rightarrow} =$$

$$= \frac{S_1 \rightarrow 0}{S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow \Delta Spocess^2_{outside_j} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta S_1 \rightarrow 0,$$

– рівновага систем об'єкта, що мають максимальне значення ентропії стану після перебігу внутрішніх процесів синергетичної дії $Sprocess^1_{inside_i} = \max$ при рівноважному стану зовнішніх систем $\Delta S^2_{outside_j} \rightarrow 0$ за умовами їх гомеостазу $Spocess^2_{outside_j} = \max$, що усуває вплив систем НС на об'єкт і таким чином мають ситуацію стабілізації «об'єкт – НС» $\rightarrow F \rightarrow 0$;

3) оцінка умов рівноваги, яка визначає можливості систем об'єкта і зовнішнього середовища зберігати свої функціональності без порушення гомеостазу «об'єкт – НС» за рахунок зростання перебігу процесів синергетичної дії – нівелювання впливу на об'єкт, підтримка процесів стабілізації ситуації відповідно до співвідношення з нормованими чи функціональними значенням (макрорівень досліджень) (рис. 3):

$$F = \frac{F_{system}}{F_{process}} = \frac{\left(\frac{S_{inside_i}^1}{S_{inside_i}^1 (std or norm)} \right) / \left(\frac{S_{process_{inside_i}^1}}{S_{process_{inside_i}^1} (std or norm)} \right)}{\left(\frac{S_{outside_j}^2}{S_{outside_j}^2 (std or norm)} \right) / \left(\frac{S_{process_{outside_j}^2}}{S_{process_{outside_j}^2} (std or norm)} \right)}$$

$$\rightarrow 1 \Rightarrow \frac{\left(\frac{S_{inside_i}^1}{S_{inside_i}^1 (norm func)} \right) / \left(\frac{S_{outside_j}^2}{S_{outside_j}^2 (norm func)} \right)}{\left(\frac{S_{process_{inside_i}^1}}{S_{process_{inside_i}^1} (norm func)} \right) / \left(\frac{S_{process_{outside_j}^2}}{S_{process_{outside_j}^2} (norm func)} \right)}$$

$$\rightarrow 1 \Rightarrow \frac{S_1 / S_1^{norm}}{S_2 / S_2^{norm}} \rightarrow 1 \Rightarrow F = 1;$$

4) максимізація ентропії з характеристики стану об'єкта як $S_1 \rightarrow \infty$ при $S_2 \rightarrow 0$, що є фактом перебігу процесів, не спрямованих на стабілізацію ситуації, визначається як $F \rightarrow \infty$ і значенням функціоналу, що не становить нульового значення – $0 < F < 1$:

$$\frac{S_{inside_i}^1 = \max \leftarrow \left(S_{process_{inside_i}^1} = \max \rightarrow \Delta S_{inside_i}^1 \rightarrow \infty \right)}{S_{outside_j}^2 = \max \leftarrow \left(S_{process_{outside_j}^2} = \max \rightarrow \Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow 0 \right)}$$

$$\Rightarrow \frac{S_1 \rightarrow \infty}{S_2 \rightarrow 0} \Rightarrow \infty;$$

– нестабільність за рахунок позитивного відгуку об'єкта на зовнішній вплив;

$$\frac{S_{inside_i}^1 = \min \leftarrow \left(S_{process_{inside_i}^1} = \max \rightarrow \Delta S_{inside_i}^1 \rightarrow \max \right)}{S_{outside_j}^2 = \max \leftarrow \left(S_{process_{outside_j}^2} = \max \rightarrow \Delta S_{outside_j}^2 \rightarrow \infty \right)}$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta S_1 \rightarrow \min}{S_2 \rightarrow \infty} \Rightarrow \infty$$

– нестійка стабільність при внутрішніх можливостях систем об'єкта, але при постійній дії дестабілізуючих зовнішніх впливів.

Відповідно до наданого алгоритмічного забезпечення (рис. 3) при дослідженні складних об'єктів на системологічному рівні розв'язку задач відзначаються точки напруги в будь-якій складовій системі об'єкта дослідження і систем НС. Вони вважаються промоторами порушення рівноваги (стабільності стану), ініціалізації перебігу стохастичних процесів, порушення мереж зв'язку, роботи програм тощо. Це фіксується значеннями ентропійної функції стану та ентропійної функцією функціональності «об'єкт – НС» згідно з

запропонованим відносним ентропійним функціоналом рівноваги (формули (9)–(14)).

Нівелювання дії негативних ситуацій – це пошук процесів, що діють в системі «об'єкт – НС» і є при певному корегуванні каталізаторами позитивних довірливих процесів стабілізації ситуації, тобто ініціаторами синергетики сталості «об'єкт – НС».

5 РЕЗУЛЬТАТИ

При моделюванні ситуації за результатами дослідження полігону «Зміївська ТЕС – НС» стосовно го-меостазу «об'єкт – НС» відзначено, що надмірне надходження забруднювачів в НС викликає перебіг процесів у ґрунтах. Проведено аналіз величин ентропії перебігу реакцій за умови надмірного забруднення та співставлення з результатами фазового аналізу проб ґрунтів на наявність речовин, що нівелюють негативні наслідки за рахунок утворення з'єднань, які містять техногенні елементи. Це є певним синергетичним ефектом згідно з відсутністю їх в рослинному матеріалі, тобто зовнішні процеси своєю результативністю забезпечують стійкість «техногенний об'єкт – природне навколишнє середовище» (рис. 4) [19].

Таким чином, відповідно до ситуації навантаження ґрунтів важкими металами від викидів ТЕС відбувається ініціалізація перебігу процесів, що зв'язують їх у нерозчинні речовини. Цим досягається довільне очищення ґрунтів, а тим самим створюється бар'єр до забруднення рослин, як ланцюга подальшого забруднення НС. Відбувається реалізація ситуації синергетики за моделлю (11).

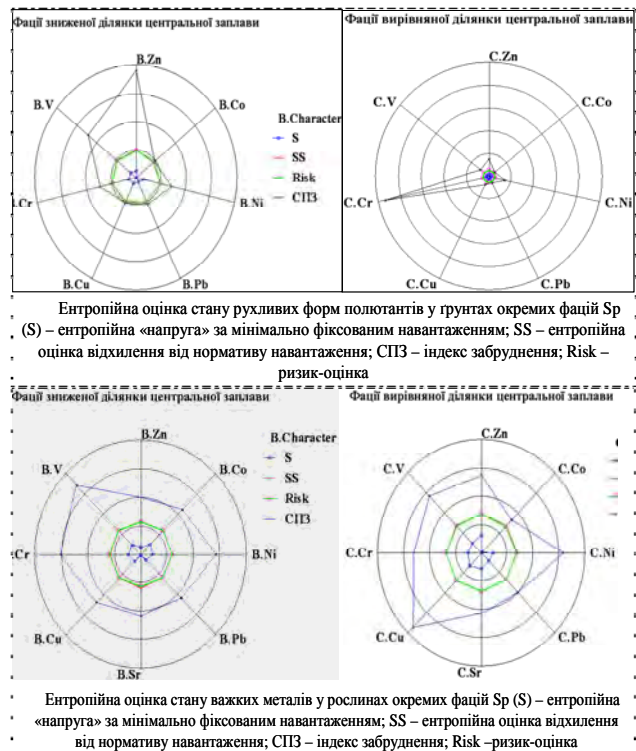


Рисунок 4 – Результати реалізації ентропійного аналізу і моделювання ситуації за станом «об'єкт – навколишнє середовище»

Аналогічні результати щодо використання ентропійної функції в аналітичних цілях для оцінювання стану дослідних об'єктів і перебігу процесів в їх системах і оточуючому середовищі за концепцією інформаційно-ентропійного простору та побудови моделей ВСС отримані при досліді «полігон відходів – НС», «підприємство – захворюваність населення», «підприємство – природні екосистеми» тощо за відповідним алгоритмом ентропійного аналізу «стан – процес» [16–17], [19].

6 ОБГОВОРЕННЯ

Застосування методології комплексної оцінки на основі інформаційно-ентропійного аналізу стану і процесів дозволило на практиці отримати:

1) характеристики екологічного стану об'єкта з урахуванням оточуючого середовища, тобто взаємодії «об'єкт – НС», у вигляді оцінки імовірності порушень екологічної рівноваги, ризику виникнення дестабілюючих процесів і формування термодинамічного потоку факторів впливу на еколого-соціальні системи з боку техногенних систем;

2) оцінку екологічного ризику і ризику здоров'ю населення як інтегрованих характеристик ефектів дії на живий організм дестабілюючих факторів НС;

3) прогнози з можливості стабілізації ситуації за рахунок позитивної синергетики процесів, що визначають саморегулювання відповідно до співвідношення негативних факторів, які промотують нівелювання негативних явищ і наслідків як-то забруднення екосистем, захворюваність населення [16–17], [19].

Відповідно до практики з реалізації ентропійного підходу розв'язку задач якості в межах проблем сталого розвитку запропоновано схему алгоритмічного забезпечення узагальненого вигляду для оцінки рівноваги в системах виду «об'єкт – НС» (рис. 5) [16–17], [19].

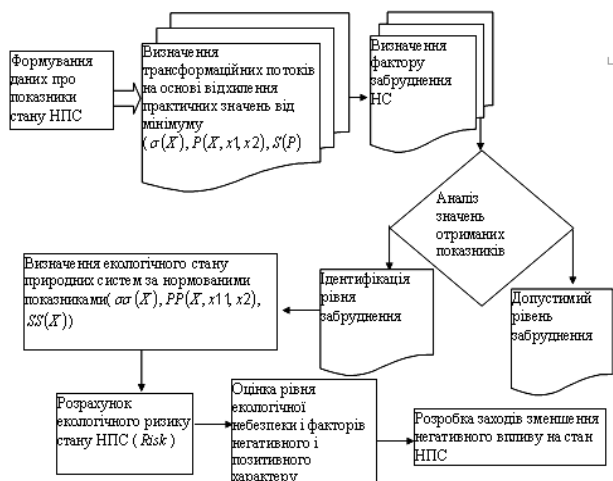


Рисунок 5 – Алгоритм виявлення впливу соціально-економічних об'єктів на навколишнє середовище

Таким чином, на рівні інформаційного аналізу ситуації у дослідженій складній системі «об'єкт – НС» © Козуля Т. В., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-3

при використанні ентропійної функції визначення станів і процесів є можливість виявити точки напруги, що призводять до дестабілізації системи, або встановити можливості підтримки самодовільного регулювання рівноваги за рахунок синергетики позитивних ефектів перебігу певних процесів.

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано комплексне оцінювання стану та функціональності системних об'єктів для розв'язку задач сталого розвитку за такими рішеннями:

1) формування моделі дослідного системного об'єкта типу «система – навколишнє середовище (зовнішні системи впливу/взаємодії)» за системологічним поданням його складної структури для опису стану і процесів в системах об'єкта та зовнішньому навколишньому оточенні;

2) визначення метрики оцінки стану систем як сталих об'єктів і процесів як динамічних систем в інформаційно-ентропійному просторі їх існування завдяки впровадженню ентропійної оцінки відношення «стан/процес» та функціоналу відносно рівноваги для загального висновку щодо гомеостазу «об'єкт – НС»;

3) надання синергетичних рішень для визначення точок довольного регулювання рівноважного стану системного об'єкта при розв'язанні задач сталого розвитку соціально-еколого-економічних систем.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у комплексному вирішенні завдань сталого розвитку складних систем як «об'єкт – НС» на основі системологічного їх відображення в інформаційно-ентропійному просторі стану та функціонування для пошуку можливостей врахування процесів саморегулювання і самопідтримки об'єкта на певному рівні функціональності за рахунок відзначення позитивних процесів синергетичного характеру.

Практична цінність полягає у можливості знаходити стійкі рішення сталого розвитку об'єкта і заощаджувати ресурси його підтримки завдяки використанню аналітичної системи запропонованої концепції інформаційно-ентропійного простору пошуку рішень на основі врахування синергетичних ефектів.

Перспективи подальших досліджень полягають у розробці відповідної бази інформаційної підтримки побудови ВСС і автоматизації розрахунків ентропійної функції станів і процесів на рівні їх універсалізації з пошуку синергетичних рішень для сталого розвитку «об'єкт – НС».

ПОДЯКИ

У даній роботі використано результати, отримані автором протягом 2012–2021 років на кафедрі програмної інженерії та інтелектуальних технологій управління (АСУ) Національного технічного університету «ХПІ» завдяки науковій співпраці з Українським науково-дослідницьким інститутом екологічних проблем, надалі з ГП «УкрНТЦ «Енергосталь».

ЛІТЕРАТУРА

1. Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced / H. Haken. – Topics Springer Science & Business Media. – 2004. – 758 p.
2. Zyrianov A. Synergetic Modeling of the System of State Organization of Society / A. Zyrianov, S. Likholetova, A. Bauken // WISDOM. – 2022. – Vol. 23, № 3. – P. 103–113. DOI: <https://doi.org/10.24234/wisdom.v23i3.829>
3. Designing synergetic and sustainable policy mixes – a methodology to address conflicting environmental issues / [H. Kosowa, W. Weimer-Jehlea, Ch. D. Leóna, F. Minna] // Environmental Science & Policy. – 2022. – Vol. 130 – P. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.007>
4. Socio-technical energy scenarios: State of the art and CIB-based approaches / [W. Weimer-Jehle, S. Vögele, W. Hauser et al.] // Clim. Change. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02680-y>
5. Weitz N. SDG Synergies: An Approach for coherent 2030 / N. Weitz, H. Carlsen, C. Trimmer. – Agenda Implementation. SEI Policy Brief May. – 2019. DOI: <https://www.sei.org/wpcontent/uploads/2019/04/sei-brief-2019-sdg-synergies-2.pdf>
6. Boeing G. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction / G. Boeing. – Systems. – 2016. – Vol. 4, № 37. – 18 p. DOI: 10.3390/systems4040037.
7. Князева Е. Н. Синергетика: Нелинейность времени и ландшафты коэволюции. / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М. : КомКнига, 2007. – 272 с.
8. Corning P. A. Systems Theory and the Role of Synergy in the Evolution of Living Systems / P. A. Corning // Systems Research and Behavioral Science Syst. – 2013. – № 15. – P. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.1002/sres.2191>
9. Shapiro J. A. Evolution: A View from the 21st Century. FT Press Science: Upper Saddle River, NJ. / J. A. Shapiro. – Evol. Intel. – 2012. – 5:207–209. – P. 207–209. DOI: 10.1093/gbe/evs008
10. Quax R. Quantifying synergistic information using intermediate stochastic variables / R. Quax, O. Har-Shemesh, P. Sloot // Entropy. – 2017. – 19(2). 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/e19020085>
11. Shannon C. E. Mathematical Theory of Communication / C. E. Shannon, W. Weaver. – University Illinois Press : Champaign, IL, USA, 1963. – 131 p.
12. Chicharro D. The Identity of Information: How Deterministic Dependencies Constrain Information Synergy and Redundancy / D. Chicharro, G. Pica, S.ID Panzeri // Entropy. – 2018. – 20. 169. DOI: 10.3390/e20030169
13. Perdigão Rui A. P. Polyadic Entropy, Synergy and Redundancy among Statistically Independent Processes in Nonlinear Statistical Physics with Microphysical Codependence / Rui A. P. Perdigão // Entropy. – 2018. – 20(1). 26. – 9 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20010026>
14. Techno-Ecological Synergies of Solar / [R. Hernandez, A. Armstrong, J. Burney et al.] // Energy for Global Sustainability. United States. – 2019. – P. 560–568. – Web. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2020. – P 43–64. DOI: 10.1038/s41893-019-0309-z.
15. Бондаренко М. Ф. Системологические методы концептуального моделирования слабоструктурированных проблемных областей на основе естественной классификации / [М. Ф. Бондаренко, С. И. Моторин, О. А. Нестеренко, Е. А. Соловьева] // Проблемы бионики. – 1999. – Вып. 51. – С. 9–18.
16. Kozulia T. Comprehensive study of the systemic formation «object-environment» safety state / T. Kozulia, M. Kozulia, I. Didmanidze // Technogenic and Ecological Safety. – 7(1/2020). – P. 3–12. doi: 10.5281/zenodo.3558994
17. Kozulia T. Methodical bases of information support for complex analysis of system objects difficult / weakly structured / T. Kozulia, M. Kozulia // Modern Problems Of Computer Science And IT-Education : collective monograph / [editorial board K. Melnyk, O. Shmatko]. – Vienna : Premier Publishing s.r.o., 2020. – P 43–64. ISBN 978-3-903197-19-0
18. Бондарь А. В. Динамика информационной энтропии проектов и практические аспекты ее оценки / А. В. Бондарь // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – № 2 (4). – С. 45–52.
19. Kozulia T. V. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects / T. V. Kozulia, M. M. Kozulia // Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. – 2022. – № 3 (139). – P. 118–127. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85135587722&origin=resultslist&sort=plf->
Стаття надійшла до редакції 29.03.2023.
Після доробки 11.05.2023.

UDC 519.2

THE CONCEPT OF INFORMATION-ENTROPY SPACE FOR SYSTEM OBJECTS MODELS BUILDING USED IN SUSTAINABLE DEVELOPMENT TASKS

Kozulia T. V. – Doctor of Science, Professor of Software Engineering and Intellectual Technology Management department National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Solving tasks of interdisciplinary research deepening during sustainable development problems solutions search for real social-ecological-economical objects based on systemological modelling and introducing information-entropy space of such objects state and functionality determining for making managerial decisions in uncertainty conditions.

Objective. Modelling current situation of researched social-ecological-economical object as the cooperative connection «studied system-environment» based on systemological model, which determines object study goal conditions due to discovery of internal and external factors interaction inside information-entropy space of object functioning representation.

Method. The paper presents the logical-experimental research results of complex social-ecological-economical objects state estimation, their development in stochastic environment conditions from the point of view of sustainable development requirements match based on proposed approach. This approach is the systemological basis of studied object entropy model creation and algorithmization by ecological functional of quality of the complex system objects goal state. The quality functional is the interrelation of

«object systems-environment» state entropy functions and their interaction processes, which are gotten through monitoring data statistical analyses of objects that belong to technogenic (economical), social and natural systems.

Results. The usage of systemology basis complex union for studied object structure identification is suggested for the first time, along with identification of theoretical knowledge for informational entropy for any object system element description and entropic description of states and process. The relative accordance functional is introduced for final evaluation of the studied object equilibrium. It allows to estimate the presence of system and processes unstable points on the basis of nested system structure. It is important for decision making with synergistically positive feedbacks prediction.

Conclusions. The systems and process states entropic estimation complex approach is determined. The systemological model «object-environment» is the basis for determining conditions of studied object sustainable development due to usage of found spontaneous and natural synergistically feedbacks. The universal research base for complex systems study was received for their state and functionality estimation due to process synergy and «object-environment» connections that are based on complex usage of systemological modelling and input information entropy estimation.

KEYWORDS: systemological modelling, nested systems, entropy stability function, synergistically effects, states and process estimation logical structures, entropy functional.

REFERENCES

1. Haken H. Synergetics: Introduction and Advanced. Topics Springer Science & Business Media, 2004, 758 p.
2. Zyrianov A., Likholetova S., Bauken A. Synergetic Modeling of the System of State Organization of Society, *WISDOM*, 2022, Vol. 23, № 3, pp.103–113. DOI: <https://doi.org/10.24234/wisdom.v23i3.829>
3. Kosowa H., Weimer-Jehlea W., Leóna Ch. D., Minna F. Designing synergetic and sustainable policy mixes – a methodology to address conflictive environmental issues, *Environmental Science & Policy*, 2022, Vol. 130, pp. 36–46. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.01.007>
4. Weimer-Jehle W., Vögele S., Hauser W., Kosow H., Poganietz W. P., Prehofer S. Socio-technical energy scenarios: State of the art and CIB-based approaches. *Clim. Change*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02680-y>
5. Weitz N., Carlsen H., Trimmer C. SDG Synergies: An Approach for coherent 2030, Agenda Implementation. SEI Policy Brief May, 2019. DOI: <https://www.sei.org/wpcontent/uploads/2019/04/sei-brief-2019-sdg-synergies-2.pdf>
6. Boeing G. Visual Analysis of Nonlinear Dynamical Systems: Chaos, Fractals, Self-Similarity and the Limits of Prediction, *Systems*, 2016, Vol. 4. № 37, 18 p. DOI: 10.3390/systems4040037.
7. Knjazeva E. N., Kurdjumov S. P. Sinergetika: Ne-linejnost' vremeni i landshafty kojevoljucii. Moscow, KomKniga, 2007, 272 p.
8. Corning P. A. Systems Theory and the Role of Synergy in the Evolution of Living Systems, *Systems Research and Behavioral Science Syst*, 2013, № 15, pp. 273–295. DOI: <https://doi.org/10.1002/sres.2191>
9. Shapiro J. A. Evolution: A View from the 21st Century. FT Press Science: Upper Saddle River, NJ., Evol. Intel, 2012, 5:207–209, pp. 207–209. DOI: 10.1093/gbe/evs008
10. Quax R., Har-Shemesh O., Sloot P. Quantifying synergistic information using intermediate stochastic variables, *Entropy*, 2017, 19(2), 85. DOI: <https://doi.org/10.3390/e19020085>
11. Shannon C. E., Weaver W. Mathematical Theory of Communication. University Illinois Press, Champaign, IL, USA, 1963, 131 p.
12. Chicharro D., Pica G., Panzeri S. ID The Identity of Information: How Deterministic Dependencies Constrain Information Synergy and Redundancy, *Entropy*, 2018, 20, 169. DOI: 10.3390/e20030169
13. Perdigão Rui A. P. Polyadic Entropy, Synergy and Redundancy among Statistically Independent Processes in Nonlinear Statistical Physics with Microphysical Codependence, *Entropy*, 2018, 20(1), 26, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20010026>
14. Hernandez R., Armstrong A., Burney J. et al. Techno-Ecological Synergies of Solar, *Energy for Global Sustainability. United States*, 2019, pp. 560–568. Web. Vienna: Premier Publishing s.r.o., 2020, P 43–64. DOI: 10.1038/s41893-019-0309-z.
15. Bondarenko M. F., Motorin S. I., Nesterenko O. A., Solov'eva E. A. Sistemologicheskie metody konceptual'nogo modelirovanija slabostruktiro-vannyh problemnyh oblastej na osnove estestvennoj klassifikacii, *Problemy bioniki*, 1999, Vyp. 51, pp. 9–18.
16. Kozulia T., Kozulia M., Didmanidze I. Comprehensive study of the systemic formation «object-environment» safety state, *Technogenic and Ecological Safety*, 7(1/2020), pp. 3–12. DOI: 10.5281/zenodo.3558994
17. Kozulia T., Kozulia M. Methodical bases of information support for complex analysis of system objects difficult / weakly structured, *Modern Problems Of Computer Science And IT-Education : collective monograph*, [editorial board K. Melnyk, O. Shmatko]. Vienna, Premier Publishing s.r.o., 2020, pp. 43–64. ISBN 978-3-903197-19-0
18. Bondar' A. V. Dinamika informacionnoj jentropii proektov i prakticheskie aspekty ee ocenki, *Visnyk Nacional'nogo tehnichnogo universytetu «HPI»*. Serija: Novi rishennja v suchasnyh tehnologijah. Harkiv: NTU «HPI», 2020, № 2 (4), pp. 45–52.
19. Kozulia T. V., Kozulia M. M. Using the systemological basis and information entropy function in the study at uncertainty conditions of system-structured objects, *Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki*, 2022, № 3 (139), pp. 118–127. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85135587722&origin=resultslist&sort=plf->

СПОСОБИ ВИЗНАЧЕННЯ ПОДІБНОСТІ КАТЕГОРІАЛЬНИХ ВПОРЯДКОВАНИХ ДАНИХ

Кондрук Н. Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розробка ефективних метрик відстані та міри подібності для категоріальних ознак є важливою задачею в аналізі даних, машинному навчанні, теорії прийняття рішень оскільки значна частина властивостей об'єктів описується саме не числовими значеннями. Зазвичай залежність між категоріальними ознаками може бути складнішою, ніж просто їх порівняння за рівністю чи нерівністю. Такі атрибути можуть бути відносно схожими, і для побудови ефективної моделі задачі необхідно врахувати цю подібність під час розрахунку відстані чи міри подібності.

Метою дослідження є підвищення ефективності розв'язання прикладних задач аналізу даних шляхом розробки математичних засобів для визначення подібності об'єктів за категоріальними впорядкованими ознаками.

Методи. Запропоновано відстань на базі зваженої манхетенської відстані та міру подібності для визначення схожості об'єктів за категоріальними впорядкованими ознаками (тобто на множині значень атрибутів можна задати лінійний порядок із шкалами переваг враховуючи предметну область задачі). Доведено, що формула відстані задовольняє аксіомам невід'ємності, симетричності, нерівності трикутника та обмеження зверху, а отже є метрикою відстані в просторі ранжованих категоріальних ознак. Доведено, що міра подібності представлена в дослідженні задовольняє аксіомам обмеженості, симетричності, максимальної та мінімальної подібності та описується спадною функцією.

Результати. Розроблений підхід реалізовано на прикладній задачі визначення ступеню схожості об'єктів, які описані впорядкованими категоріальними ознаками.

Висновки. В даному дослідженні розроблено математичні інструменти для визначення подібності структурованих даних, що описуються категоріальними атрибутами, які можна впорядкувати за певним пріоритетом у вигляді рангу із системою переваг. Проаналізовано їх властивості. Проведені експериментальні дослідження показали зручність, «інтуїтивну зрозумілість» логіки проведення обробки даних при розв'язанні прикладних задач. Представлений підхід може забезпечити можливість проводити нові змістовні дослідження аналізу даних. Перспективи подальших досліджень полягають у експериментальному використанні запропонованих інструментів в практичних задачах та вивченні їх ефективності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метрика відстані, міра подібності, подібність категоріальних даних, впорядковані дані.

НОМЕНКЛАТУРА

$\vec{a}_i(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i)$ – вектор значень (міток) ознак i -го об'єкту;

A_k – ознаки;

a_k^i – значення k -ї ознаки i -го об'єкту;

a_{kl} – l -а мітка k -ї ознаки;

$d(\cdot)$ – відстань;

m – кількість об'єктів (даних);

n – кількість ознак;

O – множина ознак об'єктів;

O_i – i -й об'єкт;

$\vec{r}_i(r_1^i, r_2^i, \dots, r_n^i)$ – вектор рангів ознак для i -го об'єкту;

r_{kl} – ранг l -ї мітки k -ї ознаки;

s_k – кількість різних міток (значень) k -ї ознаки;

R^{ORD} – нечітке бінарне відношення, що характеризує схожість векторів впорядковуваних ознак;

$\mu_{R^{ORD}}(\cdot)$ – функція належності нечіткому бінарному відношенню R^{ORD} ;

Δ_k – розмах рангових шкал для k -ї ознаки.

ВСТУП

Важливими інструментами визначення схожості об'єктів в математиці є метрики відстані та міри подібності. Вони забезпечують вимірювання подібності між об'єктами, так що близькі дані вважатимуться подібними, тоді як віддалені – відмінними [1] і як правило відображають близькість в просторі ознак.

Враховуючи постійне збільшення даних, що отримуються з різних носіїв та їх різноманітність, виявлення, аналіз існуючих зв'язків між ними привертає особливу увагу дослідників.

Подібність, як важливий взаємозв'язок, є числовим показником ступеня схожості двох об'єктів та зазвичай описується як функція відстані із змінними, що визначаються ознаками об'єкта. Це є принциповим і важливим для ефективної аналітики даних у різних областях, таких як аналіз даних, машинне навчання, теорія прийняття рішень, тощо.

Здебільшого в практичних задачах для опису властивостей об'єкта використовують атрибути різної природи. Якщо вони є числовими, то природніше порівнювати їх за рядом «перевіраних» класичних метрик Мінковського, частинним випадком якої є метрика Евкліда. Однак, коли ознаки описуються нечисловими (категоріальними) атрибутами, аналіз подібності є набагато складніший. Таким чином,

задача визначення ступеню схожості або відмінності між такими об'єктами є непростотою і відкритою для досліджень. Крім того, поняття подібності може різнитись залежно від конкретної предметної природи даних і повинно передбачати глибоке її розуміння. В ідеалі, поняття подібності визначається експертом галузі, який добре її розуміє [2, 3].

Метою даного дослідження є визначення метрики відстані та міри подібності для категоріальних впорядкованих даних.

Для досягнення мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- визначити метрику відстані та міру подібності між об'єктами, що описуються категоріальними впорядковуваними ознаками;
- описати та обґрунтувати їх основні властивості;
- проілюструвати їх використання при розв'язанні прикладної задачі.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В багатьох методах машинного навчання, інтелектуального аналізу даних та прийняття рішень постає проблема визначення схожості об'єктів, що описані нечисловими ознаками. Тому виникає необхідність розробки ефективних, зрозумілих та обґрунтованих інструментів для її вирішення. В дослідженні розглянуто випадок, коли значення ознак (атрибутів) можна впорядкувати за значимістю, перевагою (певним рангом). Нехай задано нечислові ознаки A_k , $k = \overline{1, n}$ що характеризують деякі об'єкти O_i , $i = \overline{1, m}$. Кожна із A_k може набувати певних значень (міток), які можна проранжувати: $a_{k1} > a_{k2} > \dots > a_{ks_k}$, тобто можна задати строгий лінійний порядок в просторі значень атрибутів. Кожному значенню a_{kl} ставиться у відповідність деяка числова величина переваги в рангу – r_{kl} , причому, має виконуватись $r_{k1} > r_{k2} > \dots > r_{ks_k}$ або $r_{k1} < r_{k2} < \dots < r_{ks_k}$ для $k = \overline{1, n}$. Тоді, ставиться задача визначити метрику відстані та міру подібності між двома об'єктами O_i та O_j , що характеризуються векторами ознак – $\overline{a_i}(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i)$ та $\overline{a_j}(a_1^j, a_2^j, \dots, a_n^j)$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Поняття подібності принципово важливе майже в кожній науковій галузі. Кластеризація, класифікація та регресія на основі відстані є базовими методами інтелектуального аналізу даних, які визначають схожість між об'єктами, а отже вибір конкретного показника подібності може виявитись основною причиною успіху або невдачі алгоритму. Міри

подібності для категоріальних даних умовно можна розділити на два типи [3]:

1) ті, що моделюються експертами з відповідними знаннями предметних областей разом із експертами машинного навчання, які знають, як кодувати ці знання домену мірами подібності [4, 5].

2) ті, що моделюються на основі даних навчальної вибірки та дослідження зв'язків між ними [3, 6–9].

Останні міри подібності є дуже корисними в ситуаціях, коли існує багато розмічених даних, але відсутні знання предметної області або коли моделювання мір першого типу є занадто складним.

Однак, використання мір подібності на базі певного підходу машинного навчання, як правило, приводить до деякого описання подібності, що поєднує високу точність та низьку зрозумілість, тому може зменшити довіру користувача до системи [6].

Крім того, як зазначено в [2] не для всіх мір подібності виконуються необхідні аксіоми, що в подальшому збільшує обчислювальні потужності для реалізації алгоритмів, які їх використовують.

В цій роботі описану проблему, пропонується вирішити моделюванням легко зрозумілої та обґрунтованої міри подібності та метрики, що потенційно заслуговує на довіру в порівнянні із мірами подібності подібними до чорної скриньки.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для кількісної оцінки схожості (відмінності) об'єктів вводяться поняття метрики та міри схожості, які опираються на систему аксіом. Для кожного об'єкта O_i , $i = \overline{1, m}$ закодуємо його вектор ознак $\overline{a_i}(a_1^i, a_2^i, \dots, a_n^i)$ відповідним вектором показників рангів $\overline{r_i}(r_1^i, r_2^i, \dots, r_n^i)$. Величина $\Delta_k = |r_{k1} - r_{ks_k}|$, $k = \overline{1, n}$ характеризує розмах рангової шкали для k -ї ознаки. Відстань між об'єктами пропонується визначати наступною формулою, яка є різновидом зваженої манхеттенської метрики:

$$d(O_i, O_j) = \sum_{k=1}^n \frac{|r_k^i - r_k^j|}{\Delta_k} \quad (1)$$

Властивості.

1. Аксіома невід'ємності:

$$d(O_i, O_j) \geq 0, \quad \forall i, j, \text{ причому, } d(O_i, O_j) = 0, \text{ коли}$$

об'єкти однакові, тобто $i=j$.

2. Аксіома симетричності:

$$d(O_i, O_j) = d(O_j, O_i).$$

3. Аксіома нерівності трикутника:

$$d(O_i, O_z) + d(O_z, O_j) \geq d(O_i, O_j).$$

4. Властивість обмеженості зверху:

$d(O_i, O_j) \leq n$, причому максимальне значення досягається, якщо об'єкти приймають крайні граничні значення рангів за всіма ознаками.

Доведення. Перші дві властивості очевидні, так як формула (1) містить модуль різниці рангів об'єктів. Доведемо правило трикутника:

$$d(O_i, O_z) + d(O_z, O_j) \geq d(O_i, O_j),$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{|a_k^i - a_k^z|}{\Delta_k} + \sum_{k=1}^n \frac{|a_k^z - a_k^j|}{\Delta_k} \geq \sum_{k=1}^n \frac{|a_k^i - a_k^j|}{\Delta_k},$$

$$\sum_{k=1}^n \frac{|a_k^i - a_k^z|}{\Delta_k} + \sum_{k=1}^n \frac{|a_k^z - a_k^j|}{\Delta_k} - \sum_{k=1}^n \frac{|a_k^i - a_k^j|}{\Delta_k} \geq 0,$$

$$\sum_{k=1}^n \left(\frac{|a_k^i - a_k^z| + |a_k^z - a_k^j| - |a_k^i - a_k^j|}{\Delta_k} \right) \geq 0, \quad \text{дана}$$

рівність завжди виконується, бо виконується:

$$|x - y| + |y - z| \geq |x - z|, \quad \forall x, y, z.$$

Якщо два об'єкти діаметрально різняться за певною ознакою (приймаючи крайні граничні значення в рангу), то величина $|a_k^i - a_k^j| = \Delta_k$. Якщо ж потрібно знайти відстань між об'єктами, які приймають діаметрально протилежні значення за всіма ознаками, то згідно (1), вона буде рівна n , а для всіх інших випадків менша за n .

Висновок. Отже, формула (1) визначає метрику відстані в просторі категоріальних ранжованих ознак.

В багатьох методах кластерного аналізу для визначення схожості між даними використовується поняття міри подібності. Міра подібності має задовольняти дещо іншим властивостям, ніж метрика відстані. Тому на основі (1) пропонується побудувати міру подібності:

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = \frac{1}{e-1} \left(e^{-\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{|a_k^i - a_k^j|}{\Delta_k} + 1} - 1 \right). \quad (2)$$

Подібність об'єктів характеризується нечітким бінарним відношенням R^{ORD} на множині об'єктів $O = \{O_i | i = \overline{1, m}\}$ із функцією належності $\mu_{R^{ORD}} : O^2 \rightarrow [0, 1]$. Чим більше значення величини $\mu_{R^{ORD}}$ ближче до 1, тим в більшому ступені об'єкти O_i та O_j будуть подібними за категоріальними ранжованими ознаками.

Дослідимо властивості міри подібності (2).

1. Аксиома обмеження:

$$0 \leq \mu_{R^{ORD}} \leq 1.$$

2. Аксиома симетричності:

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = \mu_{R^{ORD}}(O_j, O_i).$$

3. Аксиома максимальної подібності:

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = 1 \Leftrightarrow O_i = O_j.$$

4. Аксиома мінімальної подібності:

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = 0 \Leftrightarrow O_i, O_j \text{ – гранично різняться.}$$

5. Функція (2) є спадною.

Доведення: $\mu_{R^{ORD}}$ є функціоналом від $d(O_i, O_j)$:

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = \frac{1}{e-1} \left(e^{-\frac{1}{n} d(O_i, O_j) + 1} - 1 \right), \quad (3)$$

$$\mu_{R^{ORD}} = \frac{1}{e-1} \left(e^{-x+1} - 1 \right), \quad (4)$$

де $x = \frac{1}{n} d(O_i, O_j)$. Враховуючи властивість 4 для (1) – $x \in [0; 1]$.

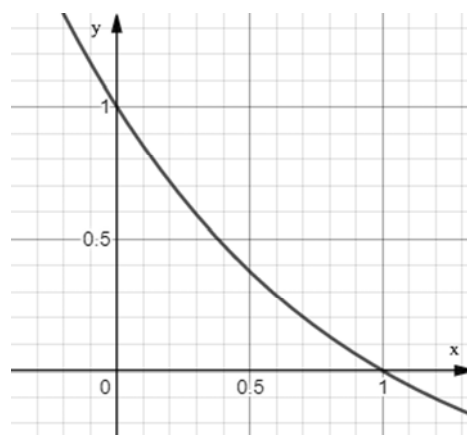


Рисунок 1 – Графік функції (4)

Із властивостей 1 і 4 для (1) та, що функція (4) є монотонно спадною (рис. 1) слідує, що:

– якщо об'єкти однакові, то $d(O_i, O_j) = 0$ і

$$\mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = \frac{1}{e-1} \left(e^{-\frac{1}{n} \cdot 0 + 1} - 1 \right) = 1;$$

– якщо об'єкти діаметрально різняться, то

$$d(O_i, O_j) = n \text{ і } \mu_{R^{ORD}}(O_i, O_j) = \frac{1}{e-1} \left(e^{-\frac{1}{n} \cdot n + 1} - 1 \right) = 0;$$

– в інших випадках $0 < \mu_{R^{ORD}} < 1$.

Отже, аксіоми 1, 3, 4 доведено.

Аксіома симетричності впливає із 2-ї властивості для (1) і (3).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Нехай задано об'єкти, що описують осіб-клієнтів і визначені впорядкованими категоріальними ознаками. Ознака A_1 – «Вік» може набувати таких значень {«юний», «молодий», «середній», «похилий»}. Ознака A_2 – «Освіта» може приймати значення {«середня», «професійно-технічна», «фахова передвища», «вища/бакалавр», «вища/магістр»}. Ознака A_3 – «Місце проживання» може приймати значення {«село», «селище міського типу», «мале місто», «середнє місто», «велике місто», «місто-мільйонник»}. Нехай задано три об'єкти O_1, O_2, O_3 , що описані відповідними значеннями ознак.

Таблиця 1 – Значення ознак об'єктів

Об'єкт	Вік	Освіта	Місце проживання
O_1	Середній	Вища/бакалавр	Сер. місто
O_2	Юний	Середня	Село
O_3	Похилий	Вища/магістр	Місто-м.

Закодуємо значення ознак призначивши величини рангів (табл. 2).

Таблиця 2 – Ранги значень (міток) ознак

Ознака A_1		Ознака A_2		Ознака A_3	
значення	ранг	значення	ранг	значення	ранг
Юний	21	Середня	1	Село	1
Молодий	34	Проф.тех.	3	С.М.Т.	2
Середній	52	Фах.перед	4	М. місто	3
Похилий	75	Вища/бак	6	С. місто	4
		Вища/маг	7	В. місто	5
				Місто-м.	6

Для прикладу, розрахуємо відстані між об'єктами за формулою (1) та міру подібності за (3).

$$d(O_1, O_3) = \frac{|52 - 75|}{54} + \frac{|6 - 7|}{6} + \frac{|4 - 6|}{5} = 0,99,$$

$$\mu_{R^{ORD}}(O_1, O_3) = \frac{1}{e - 1} \left(e^{-\frac{1}{3} \cdot 0,99 + 1} - 1 \right) = 0,55.$$

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Розрахуємо відстань (1) та міру подібності (4) між об'єктами O_1, O_2, O_3 (табл. 3, табл. 4).

Таблиця 3 – Числові значення відстані (1) між об'єктами

$d(O_i, O_j)$	O_1	O_2	O_3
O_1	0	2	0,99
O_2	2	0	3
O_3	0,99	3	0

Таблиця 4 – Числові значення міри подібності (4) між об'єктами

$\mu_{R^{ORD}}(O_1, O_2)$	O_1	O_2	O_3
O_1	1	0,23	0,56
O_2	0,23	1	0
O_3	0,56	0	1

Із отриманих результатів слідує, що метрику відстані можна інтерпретувати як ненормовану величину визначення подібності між об'єктами, а міру подібності – стандартизовану із проміжку [0; 1].

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отже, отримані результати демонструють приклади використання метрики відстані (1) та міри подібності (2) для визначення подібності, схожості об'єктів, що описуються впорядкованими ознаками. Важливим моментом є призначення числових характеристик рангів. Система рангів може бути задана, як послідовні натуральні числа, так і містити скачки. Все залежить від конкретних особливостей прикладних задач. Так, за основу рівнів рангів ознаки A_1 взято середні значення вікових рівнів визначених в [10]; для A_2 – ранжування, в якому кожен рівень освіти виділений скачком; для ознаки A_3 – послідовне ранжування. Якщо в прикладній задачі кожен рівень певної ознаки має суттєво впливати на розв'язок, то рекомендується їх підсилювати системою рангів із скачками. Так, ранги значень ознаки A_3 можна було визначити у відповідності до кількості населення відповідного типу населеного пункту, але для задачі оцінки схожості об'єктів-клієнтів це не є значущим.

В метриці відстані (1) кожний її доданок є нормованою величиною і приймає значення із проміжку [0; 1], тому «вклади» кожної ознаки у відстань є співрозмірними. З іншого боку, кожна складова (1) характеризуватиме відсоток відмінності об'єктів за відповідною ознакою.

Міра подібності (4) має хорошу чутливість в околі нуля (рис. 1), що дозволить використовувати її для кластеризації із визначенням порогів [11]. Також, областю застосування відстані та міри можуть бути методи класифікації, що використовують метрику відстані (наприклад, k NN), методи кластерного аналізу даних (наприклад, k -means, метод кластеризації заснований на нечітких бінарних відношеннях); деякі задачі прийняття рішень.

ВИСНОВКИ

Вирішується проблема розробки математичного апарату для аналізу схожості об'єктів, що описуються впорядкованими категоріальними ознаками. Дана праця є продовженням досліджень вивчення застосування різних мір подібності до розв'язання різних практичних задач, де виникає потреба визначення структури даних та аналізу прихованих взаємозв'язків між ними.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані відстань (1) та міра

подібності (3). Доведено, що (1) є різновидом манхетенської зваженої відстані і є метрикою в просторі впорядкованих категоріальних ознак, а (4) задовольняє аксіомам, що визначають міру подібності.

Продемонстровано можливе використання (1) та (3) на конкретних прикладах.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості застосування відстані d та міри $\mu_{R^{ORD}}$ при розв'язанні різних задачах аналізу даних та машинного навчання, які описуються впорядкованими категоріальними ознаками та деяких класів задач прийняття рішень.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Ужгородського національного університету «Методи обчислювального інтелекту для обробки і аналізу даних» (номер державної реєстрації 0121U109279).

ЛІТЕРАТУРА

1. Suárez J. A tutorial on distance metric learning: Mathematical foundations, algorithms, experimental analysis, prospects and challenges / J. Suárez, S. García, F. Herrera // *Neurocomputing*. – 2021. – №425. – P. 300–322. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.08.017
2. Learning similarity measures from data / [B. Mathisen, A. Aamodt, K. Bach, H. Langseth] // *Progress in Artificial Intelligence*. – 2019. – №9. – P. 1–15. DOI: 10.1007/s13748-019-00201-2.
3. DISC: Data-Intensive Similarity Measure for Categorical Data / [A. Desai, H. Singh, V. Pudi et al.]. // *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*. – 2011. – №6635. – P. 469–481. DOI: 10.1007/978-3-642-20847-8_39
4. Cunningham P. A Taxonomy of Similarity Mechanisms for Case-Based Reasoning / Pdraig Cunningham. // *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*. – 2009. – №21. – P. 1532–1543. DOI: 10.1109/TKDE.2008.227.

5. Nikpour N. Bayesian-Supported Retrieval in BNCreek: A Knowledge-Intensive Case-Based Reasoning System / N. Nikpour, A. Aamodt, K. Bach. // *Case-Based Reasoning Research and Development*. – 2018. – №1156. – P. 323–338. DOI: 10.1007/978-3-030-01081-2_22
6. Top-Down Induction of Similarity Measures Using Similarity / [T. Gabel, E. Godehardt, E. Hüllermeier, M. Minor] // *Case-Based Reasoning Research and Development*. – 2015. – №9343. – P. 149–164. DOI: 10.1007/978-3-319-24586-7_11
7. Hoffer E. Deep Metric Learning Using Triplet Network / E. Hoffer, N. Ailon. // *Similarity-Based Pattern Recognition*. – 2014. – №9370. – P. 84–92. DOI: 10.1007/978-3-319-24261-3_7
8. A method for k-means-like clustering of categorical data / [T. Nguyen, T. Dinh, S. Sriboonchitta, V. Huynh] // *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. – 2019. – P. 1–11. DOI: 10.1007/s12652-019-01445-5.
9. Learning similarity measures from data / [B. Mathisen, A. Aamodt, K. Bach, H. Langseth] // *Progress in Artificial Intelligence*. – 2020. – №9. – P. 129–143. DOI: 10.1007/s13748-019-00201-2
10. Dyussenbayev A. Age Periods Of Human Life / A. Dyussenbayev // *Advances in Social Sciences Research Journal*. – 2017. – №4. – P. 258–263. DOI:10.14738/assrj.46.2924
11. Kondruk N. Clustering method based on fuzzy binary relation / N. Kondruk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – № 2(4). – P. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.94961
12. Kondruk, N.E., Malyar, M.M. Analysis of Cluster Structures by Different Similarity Measures / N. E. Kondruk, M. M. Malyar, // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2021. – №57. – P. 436–441. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00368-4>.
13. Кондрук Н. Е. Використання довжинної міри подібності в задачах кластеризації / Н. Е. Кондрук // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2018. – №3 (46). – С. 98–105. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-11.

Стаття надійшла до редакції 15.04.2023.
Після доробки 28.05.2023.

UDC 004.942, 004.89

METHODS FOR DETERMINING SIMILARITY OF CATEGORICAL ORDERED DATA

Kondruk N. E. – PhD, Associate professor, Associate Professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The development of effective distance metrics and similarity measures for categorical features is an important task in data analysis, machine learning, and decision theory since a significant portion of object properties is described by non-numerical values. Typically, the dependence between categorical features may be more complex than simply comparing them for equality or inequality. Such attributes can be relatively similar, and to construct an effective model, it is necessary to consider this similarity when calculating distance or similarity measures.

Objective. The aim of the study is to improve the efficiency of solving practical data analysis problems by developing mathematical tools for determining the similarity of objects based on categorical ordered features.

Method. A distance based on weighted Manhattan distance and a similarity measure for determining the similarity of objects based on categorical ordinal features (i.e. a linear order with scales of preference considering the problem domain can be specified on the attribute value set) are proposed. It is proven that the distance formula satisfies the axioms of non-negativity, symmetry, triangle inequality, and upper bound, and therefore is a distance metric in the space of ranked categorical features. It is also proven that the similarity measure presented in the study satisfies the axioms of boundedness, symmetry, maximum and minimum similarity, and is described by a decreasing function.

Results. The developed approach has been implemented in an applied problem of determining the degree of similarity between objects described by ordered categorical features.

Conclusions. In this study, mathematical tools were developed to determine similarity between structured data described by categorical attributes that can be ordered based on a specific priority in the form of a ranking system with preferences. Their properties were analyzed. Experimental studies have shown the convenience and “intuitive understanding” of the logic of data processing in solving practical problems. The proposed approach can provide the opportunity to conduct new meaningful research in data analysis. Prospects for further research lie in the experimental use of the proposed tools in practical tasks and in studying their effectiveness.

KEYWORDS: distance metric, similarity measure, categorical data similarity, ordered data.

REFERENCES

1. Suárez J., García S., Herrera F. A tutorial on distance metric learning: Mathematical foundations, algorithms, experimental analysis, prospects and challenges, *Neurocomputing*, 2021, № 425, pp. 300–322. DOI: 10.1016/j.neucom.2020.08.017
2. Mathisen B., Aamodt A., Bach K., Langseth H. Learning similarity measures from data, *Progress in Artificial Intelligence*, 2019, № 9, pp. 1–15. DOI: 9. 10.1007/s13748-019-00201-2.
3. Desai A., Singh H., Pudi V. et al. DISC: Data-Intensive Similarity Measure for Categorical Data, *Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, 2011, №6635, pp. 469–481. DOI: 10.1007/978-3-642-20847-8_39
4. Cunningham P. A Taxonomy of Similarity Mechanisms for Case-Based Reasoning, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2009, №21, pp. 1532–1543. DOI: 10.1109/TKDE.2008.227.
5. Nikpour N., Aamodt A., Bach K. Bayesian-Supported Retrieval in BNCreek: A Knowledge-Intensive Case-Based Reasoning System, *Case-Based Reasoning Research and Development*, 2018, №11156, pp. 323–338. DOI: 10.1007/978-3-030-01081-2_22
6. Gabel T., Godehardt E., Hüllermeier E., Minor M. Top-Down Induction of Similarity Measures Using Similarity, *Case-Based Reasoning Research and Development*, 2015, №9343, pp. 149–164. DOI: 10.1007/978-3-319-24586-7_11
7. Hoffer E., Ailon N. Deep Metric Learning Using Triplet Network, *Similarity-Based Pattern Recognition*, 2014, №9370, pp. 84–92. DOI: 10.1007/978-3-319-24261-3_7
8. Nguyen T., Dinh T., Sriboonchitta S., Huynh V. A method for k-means-like clustering of categorical data, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, pp. 1–11. DOI: 10.1007/s12652-019-01445-5.
9. Mathisen B., Aamodt A., Bach K., Langseth H. Learning similarity measures from data, *Progress in Artificial Intelligence*, 2020, №9, pp. 129–143. DOI: 10.1007/s13748-019-00201-2
10. Dyussenbayev A. Age Periods Of Human Life, *Advances in Social Sciences Research Journal*, 2017, №4, pp. 258–263. DOI:10.14738/assrj.46.2924
11. Kondruk N. Clustering method based on fuzzy binary relation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, № 2(4), pp. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.94961
12. Kondruk, N. E., Malyar M. M. Analysis of Cluster Structures by Different Similarity Measures, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2021, №57, pp. 436–441. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00368-4>.
13. Kondruk N. E. Vykorystannja dovhynnoi' miry podobnosti v zadachah klasteryzacii', *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, №3 (46), pp. 98–105. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-3-11.

ВЕКТОРНО-ЛОГІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ

Хаханов В. І. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Чумаченко С. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Литвинова Є. І. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Хаханова І. В. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Хаханова Г. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Шкіль О. С. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Рахліс Д. Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Хаханов І. В. – аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Шевченко О. Ю. – канд. техн. наук, асистент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Основна ідея – створення векторно-логічного in-memoгу комп'ютинг (ВЛК), який використовує лише read-write транзакції на адресній пам'яті для моделювання несправностей, як адрес. Традиційна логіка відсутня. ВЛК вільний від команд процесора та АЛП для організації обчислень і тому орієнтований на імплементацію у кристали SoC і FPGA. Пропонується векторно-логічний метод синтезу дедуктивних матриць для транспортування вхідних несправностей, який має квадратичну обчислювальну складність.

Мета. Розробка векторного дедуктивного методу моделювання несправностей на основі примітивних read-write транзакцій для аналізу логічних схем.

Метод. Використовується вхідний тестовий набір та логічний вектор функціональності. Метод, що розробляється, є розвитком алгоритму синтезу дедуктивних векторів на основі таблиці істинності. Дедуктивна матриця призначена для синтезу та верифікації тестів за допомогою паралельного моделювання комбінацій несправностей, як адрес, на основі read-write транзакцій над бітами дедуктивних векторів, що знаходяться в пам'яті.

Результати. Запропоновано векторний метод синтезу дедуктивних матриць для транспортування вхідних несправностей векторів на вихід елемента. Розроблено структури даних для паралельного моделювання несправностей цифрових схем на основі примітивної read-write транзакції в матричній пам'яті, де поєднання несправностей є стовпцями-адресами. Запропоновано секвенсор із п'яти блоків, що складають векторно-логічний комп'ютинг, пов'язаний з дедуктивним моделюванням несправностей на основі read-write транзакцій. Виконано верифікацію моделей та методів на тестових прикладах.

Висновки. Наукова новизна полягає у розробці наступних інноваційних рішень: 1) вперше запропоновано векторно-логічний метод синтезу матриць дедуктивних векторів для паралельного моделювання комбінацій вхідних несправностей як адрес; 2) вперше запропоновано автомат векторно-дедуктивного моделювання несправностей, як адрес, на основі read-write транзакцій, орієнтований для імплементації в FPGA LUT, вбудований online симулятор SoC, як ядро для моделювання несправностей цифрових систем RTL-рівня; 3) демонстрація технологічних переваг векторно-логічного синтезу дедуктивних матриць виконана на численних прикладах традиційної та RTL-логіки, що підкреслює технологічність векторів у порівнянні з аналітичними дедуктивними формулами для побудови симуляторів; 4) матриця дедуктивних векторів, як сукупність вектор-стовпців булевих похідних використовується для побудови мінімальних тестів для логічних елементів; 5) рекурсивна формула синтезу матриць перестановки координат у логічному векторі активності дозволяє суттєво спростити отримання дедуктивної матриці для моделювання несправностей як адрес. Практичне значення полягає в тому, що in-memory simulator дозволить отримати швидкодію моделювання несправностей реальних цифрових блоків SoC на рівні сотень наносекунд. Наводяться оцінки складності відповідних алгоритмів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: векторний комп'ютинг, векторна форма логіки, матриця дедуктивних векторів, векторний метод синтезу дедуктивної матриці, read-write транзакції, векторна модель дефектів, векторно-логічне дедуктивне моделювання несправностей.

АБРЕВІАТУРИ

АЛП – арифметико-логічний пристрій;

ВЛК – векторно-логічний комп'ютинг;

ДДНФ – досконала диз'юнктивна нормальна форма;

BIST – built-in self-test (вбудована самоперевірка);

SIM – compute in-memory (обчислення безпосередньо у пам'яті);

ма;

© Хаханов В. І., Чумаченко С. В., Литвинова Є. І., Хаханова І. В., Хаханова Г. В., Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Шевченко О. Ю., 2023

DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-5



CPU – central processing unit (центральный процесор);

CS – computational storage (обчислювальне сховище);

DNN – deep neural networks (глибокі нейронні мережі);

EDA – electronic design automation (система автоматизованого проектування);

FPGA – field-programmable gate array (програмувана користувачем вентиля матриця);

IMC – in-memory computing (обчислення в пам'яті);

IP-core – intellectual property core (складний функціональний блок);

LUT – look-up table (таблиця пошуку);

NLP – natural language processing (обробка природної мови);

NMC – near-memory computing (обчислення близько до пам'яті);

PIM-computing – processing-in-memory computing (обчислення з обробкою в пам'яті);

RTL – register transfer level (рівень регістрових передач);

SoC – system on chip (система на кристалі).

НОМЕНКЛАТУРА

C – обчислювальна складність;

d_i – відстань;

D_{ij} – елемент D -матриці дедуктивних векторів;

D_x – дедуктивний вектор стану виходів таблиці істинності несправностей, що перевіряються на тестових двійкових наборах x ;

F – функціональність;

F_{ij} – елемент F -матриці несправностей;

H^i – i -елемент H -матриці;

L – несправність;

L_f – вектор несправностей, що перевіряються;

L_H – L -матриця, що перекодована за допомогою матриці H ;

L_i – i -строка L -матриці;

n – кількість входів;

Q_i – i -елемент Q -вектора;

T – тест;

tD – час генерації дедуктивного вектора;

tF – час обробки входних векторів несправностей;

AT – час обробки одного логічного елемента;

U – номер лінії;

x – входний тестовий набір;

X – таблиця істинності одиночних та кратних входних константних несправностей;

X_i – входна змінна;

X_i' – похідна за змінною X_i ;

Y – вихідна змінна;

Z – значення несправності 0 або 1.

ВСТУП

Мотивація дослідження продиктована такими факторами: застосування елементарних транзакцій читання-запис (read-write transactions) для обчислень на

основі пам'яті (memory-driven computing) з векторним описом логіки, наявність пам'яті для зберігання гнучких моделей логіки, використання даних як адрес для підвищення швидкодії дедуктивного моделювання, перехід комп'ютингу на нижчий рівень обчислювальних процесів (read-write transaction), де можна не дотримуватися архітектури фон Неймана (Neuman architecture) та теореми Поста-Яблонського про функціональну повноту [2–3]. Сутність векторного комп'ютингу – транзакції читання-запис на векторних структурах даних в адресній пам'яті. Актуальність цього напрямку видно з останнього дослідження компанії Gartner, яка опублікувала як тригерний тренд обчислювальне сховище (computational storage, CS), який переносить обробку даних із центрального процесора у пам'ять, де вони знаходяться [4]. Великі дані мають оброблятися за місцем їх зберігання [5]. Одні з таких рішень – векторний комп'ютинг – обчислювальний процес на основі read-write транзакцій над бітами двійкового вектора функціональності, що формує обчислювальне сховище, де входні дані є адресами бітів вектора логіки. Векторно-логічний комп'ютинг розглядається як квазіоптимальний варіант вирішення протиріччя між потужною системою команд процесора (Neuman architecture) та бітових структур великих даних, що підлягають обробці. Суть пропонованого комп'ютингу – обробка великих даних, як адрес, за місцем їх зберігання за допомогою read-write транзакцій над бітами векторної логіки, що становить обчислювальну пам'ять (computational memory). Актуальність застосування In-Memory Computing (IMC), Near-Memory Computing (NMC), Processing-In-Memory (PIM) комп'ютингу підтверджується наступними публікаціями [6–10]. Тут можна виділити наступні метрики ефективного використання IMC.

1. Створення моделі глибоких нейронних мереж (DNN) особливо в галузі обробки природної мови (NLP), що скорочує енергетичну потужність використання програми на 36.3%, і підвищує продуктивність алгоритму великих даних 22.6% [6].

2. Основна мета IMC-архітектур максимально знизити енергоспоживання підвищення автономності з допомогою скорочення передачі між пам'яттю і обчислювальним блоком з допомогою побітових логічних операцій (NOT, AND, OR, XOR) всередині масиву пам'яті та поруч із ним, просуваючи концепцію обчислень у пам'яті (CIM) [7].

3. Пропускна здатність передачі даних та пов'язане з нею енергоспоживання стали найбільш критичним вузьким місцем у обчислювальній архітектурі фон Неймана через поділ процесора та пам'яті. Усвідомлення єдності обчислень та пам'яті в одному місці відкрило перспективний напрямок досліджень обчислень у пам'яті [8].

4. Сучасні програми повинні бути орієнтовані на обробку все більших даних.

Тенденція у технологіях пам'яті не зростає так швидко, як продуктивність обчислень, що призводить до так званої стіни пам'яті. В даний час вивчаються нові архітектури для вирішення цієї проблеми як для вбудованої, так зовнішньої пам'яті. Останні методи, що максимально наближають обчислення до масиву пам'яті, такі як обчислення в пам'яті (ІМС), обчислення ближньої пам'яті (NMC), обробка пам'яті (PIM), дозволяють знизити вартість переміщення даних між обчислювальним ядром і пам'яттю. Для вбудованих обчислень схема In-Memory Computing забезпечує вигідні обчислення та вираш енергії до 78% для певного класу додатків [9]. Даному виду ІМС-комп'ютигу присвячено більше 64 тисяч публікацій в IEEE Xplore, що свідчить про актуальність проблеми аналізу великих даних за допомогою простих CPU-free моделей, розміщених у пам'яті. Разом з цим запропоновані рішення, спрямовані на створення обчислювача у пам'яті, де зберігаються великі дані. Наступним кроком буде створення In-Data-Computing, без логіки та схем обробки у метриці операції зчитування-запису (read-write transaction) над бітами великих даних.

Об'єкт дослідження – in-memory комп'ютинг, який знижує енергетичні та часові витрати при обробці великих даних.

Предмет дослідження – in-memory моделювання логічних компонентів SoC будь-якої розмірності за допомогою read-write транзакцій на логічних векторах.

Мета дослідження – розробка векторного дедуктивного методу моделювання несправностей на основі примітивних read-write транзакцій для аналізу логічних схем.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вирішується проблема перенесення архітектури фон Неймана до пам'яті та заміни потужного процесора read-write транзакціями на логічних векторах для зниження енергетичних та часових витрат при моделюванні логічних функціональностей будь-якої розмірності.

Нехай задані моделі вхідних даних, що можуть бути представлені (рис. 1):

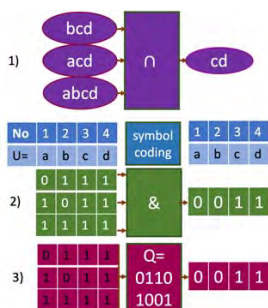


Рисунок 1 – Структури вхідних даних

1) множинами – компактні дані, що вимагають складного та послідовного за входами алгоритму їх обробки; 2) векторами – унітарне кодування (symbol coding) даних на універсумі примітивів, що використовує паралельний регістровий алгоритм їхньої обробки, послідовний по входах; 3) адресами – компактне кодування унітарних даних на універсумі примітивів та послідовний алгоритм їх обробки read-write транзакціями на пам'яті без логіки та процесора з паралельністю за стовпцями-адресами.

Нехай вектор $Q = 01101001$ являє собою хог-функцію від трьох змінних, які формують адреси даних, що підлягають аналізу.

Тут і далі Q -вектор переходить з частини таблиці істинності у самостійну компактну форму для завдання функціональності або структури з метою створення векторно-логічного комп'ютигу обробки великих даних, що розміщені у адресній пам'яті (CS).

Задача полягає у: 1) розробці векторного методу синтезу дедуктивних матриць для транспортування вхідних несправностей векторів на вихід елемента; 2) розробці структури даних (дедуктивної матриці D , логічного вектору Q , матриці перекодування H , комбінацій несправностей на входах елементу X), для паралельного моделювання несправностей цифрових схем на основі примітивної read-write-транзакції в матричній пам'яті, де поєднання несправностей служать стовпцями-адресами; 3) розробці п'яти блоків секвенсора (рис. 2), що становлять векторно-логічний комп'ютинг, пов'язаний з дедуктивним моделюванням несправностей на основі read-write транзакцій.



Рисунок 2 – Структура дослідження

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Основні проблеми в галузі моделювання несправностей слід визначити таким чином.

1. Висока обчислювальна складність алгоритмів комбінаторного аналізу на регістровому рівні опису моделі [10–12].

2. Складність алгоритмів моделювання та симуляції послідовних схем, пов'язана з непередбачуваною кількістю ітерацій [11].

3. Значний обсяг структур даних для аналізу цифрових систем на кристалі, що негативно позначається на продуктивності методів моделювання несправностей та синтезу тестів [15–21].

4. Складність аналізу та синтезу тестів для логіки великої розмірності та їх структурна і комбінаторна складність, пов'язана з розгалуженнями, що збігаються [10].

5. Паралельне розв'язання завдань тестування та імітації цифрових пристроїв [9–12].

У design and test використовуються три основні форми опису процесів та явищ: таблицна, аналітична, графова [10–21]. При цьому матриця (таблиця) і вектор є дві форми опису моделей, що переходять один до одного. Матриця, при необхідності, розпускається в одновимірний вектор для зручності паралельної обробки даних регістрової пам'яті. Природно, досить просто відновити таблицю чи матрицю з векторної форми опису процесу чи явища. Вектор Q (двійковий, багатозначний) є компактним видом таблиці істинності як упорядкованої послідовності станів виходу, якщо вхідні компоненти-адреси впорядковані за зростанням [11–20].

Криза сучасного комп'ютерингу пов'язана з двома проблемами: обробкою великих даних неспроможною за часовими витратами парою процесор-пам'ять, а також катастрофічним збільшенням споживання електроенергії глобальними обчислювальними процесами на сучасній мікроелектроніці. Вирішення першої проблеми ґрунтується на аксіомах: "Всі дані знаходяться у пам'яті". Немає логіки, яку не можна було б реалізувати на пам'яті. Немає даних, які не можна було б використовувати як адреси для обробки на пам'яті, де вміщена логіка. Не існує логіки або функцій, які не можна було б реалізувати за допомогою read-write транзакції на пам'яті. Найтехнологічніша структура даних для пам'яті є вектор або матриця, доступні для швидкодіючих read-write транзакцій. Де є великі дані, там необхідно будувати простий обчислювач для їх аналізу.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо основні визначення.

Логічний елемент – будь-яка двійкова функціональність від n змінних, з невизначеною внутрішньою структурою, що задається логічним вектором, розмірністю 2^n .

Логічний вектор – явна форма завдання функціональності за допомогою впорядкованої послідовності 2^n бітів, де кожен біт має свою двійкову адресу в метриці n змінних. Логічний вектор разом із впорядкованою сукупністю явних двійкових адрес утворюють таблицю істинності.

Вхідний двійковий набір – вхідна тестова послідовність з n двійкових бітів, які забезпечують транспортування комбінації вхідних несправностей елемента з його вихід.

Дедуктивний вектор – логічна функціональність, задана на вхідному двійковому наборі, що забезпечує транспортування комбінації вхідних несправностей на вихід елемента.

Таблиця істинності несправностей – явна комбінаторна форма завдання всіх можливих варіантів вхідних несправностей одиничними значеннями координат на множині n інверсних значень змінних вхідного двійкового набору.

© Хаханов В. І., Чумаченко С. В., Литвинова Є. І., Хаханова І. В., Хаханова Г. В., Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Шевченко О. Ю., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-5

Дедуктивна матриця – явна форма завдання 2^n дедуктивних векторів у форматі логічного вектора 2^n , кожен із яких на вхідному двійковому наборі, довжиною n , формує функціональність транспортування комбінації вхідних несправностей на вихід елемента.

Матриця перекодування бітів – сукупність номерів-індексів у метриці декартового добутку логічного вектора $2^n \times 2^n$ призначена для синтезу дедуктивної матриці з логічного вектора або його інверсії.

Розглянемо векторний метод синтезу матриці дедуктивної для моделювання несправностей.

На початку слід розглянути побудову H -матриці перестановок, яка є основою синтезу дедуктивних матриць. Для генерації H -матриці необхідно знати лише n – кількість вхідних змінних будь-якої функціональності. Матриця H відстежує закономірності зміни кожної вхідної змінної у просторі 2^n рядків таблиці істинності не враховуючи станів виходів. Іншими словами, H -матриця забезпечує потенційні умови активізації вхідних змінних (несправностей). Реальні умови активізації буде згенеровано шляхом суперпозиції матриці з логічним вектором конкретної функціональності (рис. 3). Тому H -матриця є ядерною незмінною структурою для технологічного синтезу D -матриці дедуктивних векторів.



Рисунок 3 – Роль H -матриці у формуванні дедуктивної моделі

Синтез H -матриці перестановки координат використовує технологічно просту рекурсивну формулу

$$H^i = \begin{bmatrix} H_1^{i-1} & H_2^i \\ H_3^i & H_4^{i-1} \end{bmatrix}, \text{ де } i=1,2,3,\dots - \text{кількість вхідних змінних.}$$

Алгоритм синтезу представлений трьома пунктами (рис. 4):

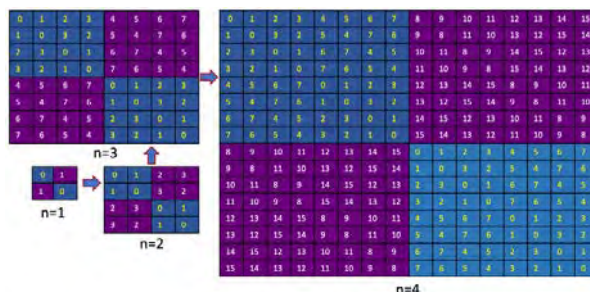


Рисунок 4 – Синтез L -матриці перекодування векторів

1) перша та четверта чверть матриці перестановок береться від попереднього рекурсивного обчислення матриці для $n = i - 1$ змінних, тут виконуються рівно-

сті: $H_1^{i-1} = H_4^{i-1}, H_2^{i-1} = H_3^{i-1}$, при цьому
 $H_0^0 = 0, H_1^1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$;

2) друга чверть матриці знаходиться на підставі виразу $H_{i,j+2^{n-1}} = (2^n - 1) - H_{i,j}, j = 1, 2^{n-1}, i = 1, 2^{n-1}$;

3) третя чверть матриці знаходиться шляхом копіювання другої частини матриці до третьої області $H_3^i = H_2^i$.

Метод синтезу матриці дедуктивних векторів за Q -вектором має лише два пункти.

1. Отримання матриці модифікованих L -векторів функціонального елемента (рис. 4) на вхідному i -наборі за правилом: $L_i = Q \oplus Q_i$. Для виконання цього пункту Q -вектор записується по горизонталі та вертикалі L -матриці. Потім аналізується кожна координата Q -вектора, записаного по вертикалі Q_i . Якщо Q_i – координата вертикального Q -вектора дорівнює одиниці, виконується інверсія горизонтального вектора Q і його запис в поточний рядок матриці $L_i = \bar{Q}$. В іншому випадку в поточний рядок L -матриці записується Q -вектор без зміни: $L_i = Q$.

2. Визначення всіх бітів дедуктивної матриці за формулою: $D_{ij} = L_{H_{ij}}, j = 1, 2^n$.

Розглянемо векторний метод синтезу дедуктивної матриці традиційної логіки.

Математична основа дедуктивного моделювання несправностей полягає у транспортуванні на вихід двійкових комбінацій вхідних дефектів через функціональність F на заданому вхідному тестовому наборі T за формулою $L = T \oplus F$. Сутність дедуктивного моделювання полягає у зміні логіки елемента F залежно від вхідних умов T . Дедуктивне моделювання, запропоноване рівно 50 років тому Армстронгом [22], досі є найвитонченішим та найефективнішим засобом аналізу якості тестів та синтезу таблиць для пошуку дефектів, простежування шляху розповсюдження несправності. Далі пропонується його реалізація на основі векторної форми опису логіки [11–21], яка включає логічні аналітичні форми, що дає можливість суттєво спростити алгоритми синтезу дедуктивних моделей та їх застосування для інтерпретативного моделювання цифрових елементів та схем великої розмірності. Мета – прибрати всі аналітичні вирази дедуктивної логіки, що фігурують у більшості робіт [6–9, 20], присвячених дедуктивному моделюванню. Можна і потрібно використовувати лише вектор дедуктивного моделювання несправностей. Дуже часто форма моделі визначає зміст, компактність та швидкодія процедур аналізу. Базові методи дедуктивного моделювання [10, 20, 22] зводилися до синтезу аналітичних дедуктивних форм (ДНФ). Інформація про логічний елемент була представлена таблицею істинності чи логічним виразом [1]. Але у будь-якому ви- © Хаханов В. І., Чумаченко С. В., Литвинова Є. І., Хаханова І. В., Хаханова Г. В., Шкіль О. С., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Шевченко О. Ю., 2023 DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-5

падку, явно чи не явно, використовувалося рівняння технічної діагностики $L = T \oplus F$ для отримання дедуктивних форм моделювання несправностей.

Далі пропонується новий метод синтезу дедуктивних векторів, який зводиться до аналізу Q -вектора вихідних станів логічного n -входового елемента без таблиці істинності. Метод синтезу дедуктивних матриць за Q -вектором для традиційних логічних елементів на операторі $D = (Q \oplus Q_i)_H$ продемонстровано на рис. 5.

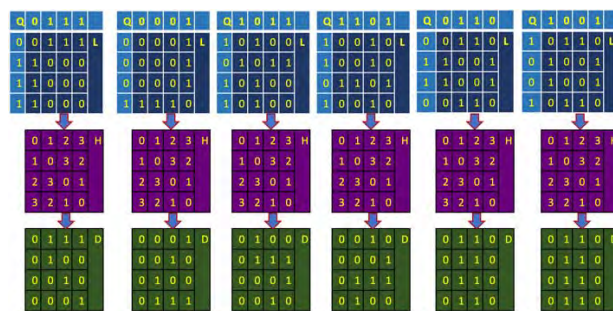


Рисунок 5 – Синтез дедуктивних векторів для базових логічних елементів

Спочатку записується логічний вектор Q по горизонталі та вертикалі першої Q -матриці синього кольору. Потім здійснюється запис вектора $Q_i = Q$ без зміни якщо по вертикалі $Q_i = 0$. Якщо $Q_i = 1$, то виконується інверсія логічного вектора $Q_i = \bar{Q}$. Матриця H є індексами для перестановки координат матриці Q . Зелена матриця D являє собою результат перестановки вмісту координат матриці Q за допомогою матриці H : $D = (Q \oplus Q_i)_H$.

Слід зазначити, що синтез дедуктивних формул для взаємно інверсних елементів: $Q = 0110$ і $Q = 1001$ дає однакові значення матриці дедуктивних векторів, які вироджуються в один вектор 0110 на всіх вхідних наборах. Обчислювальна складність (computational complexity) виконання цього оператора дорівнює: $C = 2 \times 2^n \times 2^n = 2^{2n+1}$. У разі паралельного виконання регістрових операцій над векторами обчислювальна складність даного оператора дорівнюватиме: $C = 2 \times 2^n$. Найбільш примітивними елементами є інвертор ($Q = 10$) та повторювач ($Q = 01$). Незважаючи на те, що це різні елементи, вони мають однакові дедуктивні вектори, які дозволяють проводити цифрову логічну активність з транспортування вектора несправностей від входу до виходу, не спотворюючи його (рис. 6).

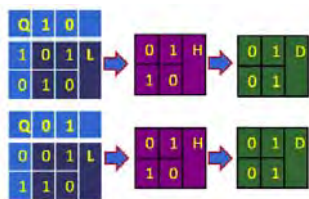


Рисунок 6 – Синтез дедуктивних векторів для примітивних взаємно інверсних елементів: 10 та 01

Розглянемо метод синтезу дедуктивних векторів RTL-логіки.

На рис. 7 представлено синтез дедуктивних векторів для трьох-входового хог-елемента, заданого вектором $Q = 01101001$. Отриманий результат має унікальну властивість: всі 2^n дедуктивних векторів хог-функціональності рівні між собою $D = 01101001$ і дорівнюють вихідному вектору $Q = 01101001$ цієї функції. Аналітична форма хог-функції дорівнює її дедуктивній функції, яка представлений наступною ДДНФ:

$$Y = \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \vee \overline{X_1} X_2 \overline{X_3} \vee X_1 \overline{X_2} \overline{X_3} \vee X_1 X_2 X_3.$$

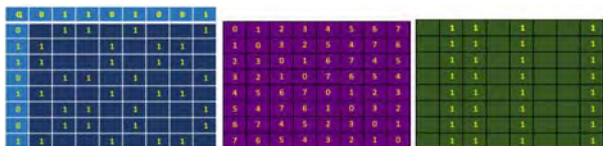


Рисунок 7 – Синтез дедуктивних векторів для трьох-входового елемента XOR

ДДНФ може бути записана диз'юнкцією двійкових кодів $Y = 001 \vee 010 \vee 100 \vee 111$. Перші три терми виконують роль фільтрів для визначення відмінностей на кожному з трьох входів. Останній терм визначає схожість даних на всіх трьох входах. Для двох-входового хог-елемента $Y = \overline{X_1} X_2 \vee X_1 \overline{X_2}$ працює тільки фільтр відмінності вхідних даних, а вектор $Q = 0110$ складений конкатенацією векторів інвертора 10 і повторювача 01, які мають однакові дедуктивні вектори, рівні 01. Чотирьох-входова хог-функція має ДДНФ

$$Y = \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3} \overline{X_4} \vee \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \overline{X_4} \vee \overline{X_1} X_2 \overline{X_3} \overline{X_4} \vee \overline{X_1} X_2 X_3 \overline{X_4} \vee \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3} X_4 \vee \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 X_4 \vee \overline{X_1} X_2 \overline{X_3} X_4 \vee \overline{X_1} X_2 X_3 X_4,$$

або

$$Y = 0001 \vee 0010 \vee 0100 \vee 1000 \vee 0111 \vee 1011 \vee 1101 \vee 1110,$$

яка відповідає наступному вектору $Q = 0110100110010110$. Перші чотири терми визначають фільтр відмінності вхідних даних, інші терми – подібності на всіх комбінаціях з трьох входів. Рекурсивна схема синтезу хог-векторів для входів $n = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ показано на рис. 8.

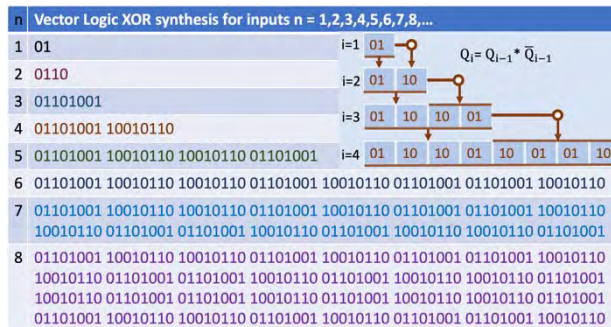


Рисунок 8 – Синтез Q -векторів для n -вхідного XOR

Тут кожен наступний вектор обчислюється з урахуванням рекурсивного висловлювання $Q_i = Q_{i-1} * \overline{Q_{i-1}}$, що містить конкатенацію двох векторних компонентів попереднього рівня. Вектор 01, при $n = 1$ слід розглядати як вироджену хог-функцію від однієї змінної. Метрика хог-функції: 1) хог-функція не підлягає мінімізації; 2) число одиниць та нулів у Q -векторі однакове; 3) всі дедуктивні вектори рівні між собою та рівні Q -вектору; 3) є єдиною функцією для вимірювання будь-яких процесів та явищ у кіберпросторі $\bigoplus_{i=1}^n d_i = 0$; 4) формує рівняння технічної діагностики $T \oplus F \oplus L = 0$ для вирішення завдань комп'ютерингу; 5) здатна вимірювати подібності та відмінності вхідних даних як адрес; 6) з будь-якого входу пропускає будь-яку активність до виходу, не вимагаючи жодних умов активізації; 7) хог-функція утворює транзитивне замикання з функціями and, or: $\wedge \oplus \vee = \oplus$ або $\wedge \oplus \vee \oplus \oplus = 0$, або у векторній формі: $0001 \oplus 0111 \oplus 0110 = 0000$; 8) для хог-функції Q -вектор є компактною формою.

Розглянемо матрицю дедуктивних векторів, як вектор-стовпець булевих похідних.

Два поняття векторно-булева похідна та дедуктивна матриця мають деякі загальні метричні властивості: 1) обидва використовують характеристичне рівняння технічної діагностики на основі хог-операції: $L = T \oplus F$; 2) мають одну і ту ж матрицю перекодування бітів $H^i = \begin{bmatrix} H_1^{i-1} & H_2^i \\ H_3^i & H_4^{i-1} \end{bmatrix}$; 3) обидві спрямовані

на транспортування будь-якої вхідної активності на виходи логічної схеми. Залишається вирішити питання, як взаємодіють між собою ці два компоненти. Для цього використовуємо дедуктивну матрицю логічної вектор-функції 10000001 від трьох змінних, яка наведена на рис. 9. Тут порожні клітини у таблицях позначають нульові стани.

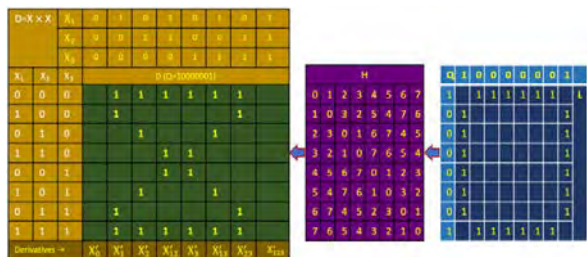


Рисунок 9 – Синтез дедуктивної матриці для симетричної функції $Q = 10000001$

Матриця D є декартовим добутком множини вхідних змінних $D = X \times X$, яке отримано на основі наступної формули $D = (Q \oplus Y)_H$. Рядки матриці є дедуктивними векторами транспортування вхідних активностей, а стовпці матриці формують векторні похідні або умови транспортування вхідних активностей. Крім того, стовпці та рядки дедуктивної матриці відзначені двійковими кодами вхідних змінних.

Булева векторна похідна по змінній X_i – це функція від $n-1$ змінної, яка виключає змінну, за якою береться похідна:

$$\frac{dF}{dX_i} = X'_i = f(X_1, X_2, \dots, X_i = 0, \dots, X_n) \oplus f(X_1, X_2, \dots, X_i = 1, \dots, X_n).$$

Фактично булева похідна – це є умова активізації змінної X_i , яка повинна бути виставлена на всіх $n-1$ вхідних змінних, за винятком змінної X_i . Дотримуючись цього визначення, можна записати ДНФ булевих похідних по стовпчиках дедуктивної матриці:

$$\begin{aligned} X'_0 &= X'_{123} = 0. \\ X'_1 &= X'_{23} = 000 \vee 100 \vee 011 \vee 111 = \\ &= X00 \vee X11 = \overline{X_2} \overline{X_3} \vee X_2 X_3. \\ X'_2 &= X'_{13} = 000 \vee 010 \vee 101 \vee 111 = \\ &= 0X0 \vee 1X1 = \overline{X_1} X_3 \vee X_1 X_3. \\ X'_3 &= X'_{12} = 000 \vee 110 \vee 001 \vee 111 = 00X \vee 11X = \\ &= \overline{X_1} \overline{X_2} \vee X_1 X_2. \end{aligned}$$

Дедуктивні матриці для трьох-входової логіки представлені такими таблицями (рис. 10). Тут порожніми клітинами позначені нульові координати.

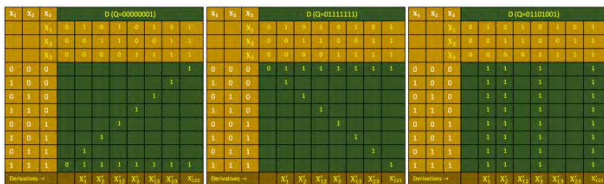


Рисунок 10 – Дедуктивні матриці для трьох-входової логіки

Стовпці дедуктивної матриці є похідними по одній, двом і трьом змінним. Йдеться про умови, які забезпечують активізацію виходу елемента залежно від кількості активних: одного, двох або трьох входів.

ДНФ булевих похідних по стовпчиках дедуктивних матриць мають вигляд:

$$X'_1 = (Q = 00000001) = 011 \vee 111 = X11 = X_2 X_3.$$

$$X'_2 = (Q = 00000001) = 101 \vee 111 = 1X1 = X_1 X_3.$$

$$X'_3 = (Q = 00000001) = 110 \vee 111 = 11X = X_1 X_2.$$

$$X'_{12} = (Q = 00000001) = 001 \vee 111 = \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \vee X_1 X_2 X_3.$$

$$X'_{13} = (Q = 00000001) = 010 \vee 111 = \overline{X_1} X_2 \overline{X_3} \vee X_1 X_2 X_3.$$

$$X'_{23} = (Q = 00000001) = 100 \vee 111 = X_1 \overline{X_2} \overline{X_3} \vee X_1 X_2 X_3.$$

$$X'_{123} = (Q = 00000001) = 000 \vee 111 = \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3} \vee X_1 X_2 X_3.$$

$$X'_1 = (Q = 01111111) = 000 \vee 100 = X00 = \overline{X_2} \overline{X_3}.$$

$$X'_2 = (Q = 01111111) = 000 \vee 010 = 0X0 = \overline{X_1} \overline{X_3}.$$

$$X'_3 = (Q = 01111111) = 000 \vee 001 = 00X = \overline{X_1} \overline{X_2}.$$

$$X'_{12} = (Q = 01111111) = 000 \vee 110 = \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \vee X_1 X_2 \overline{X_3}.$$

$$X'_{13} = (Q = 01111111) = 000 \vee 101 = \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \vee X_1 \overline{X_2} X_3.$$

$$X'_{23} = (Q = 01111111) = 000 \vee 011 = \overline{X_1} \overline{X_2} X_3 \vee \overline{X_1} X_2 X_3.$$

$$X'_{123} = (Q = 01111111) = 000 \vee 111 = \overline{X_1} \overline{X_2} \overline{X_3} \vee X_1 X_2 X_3.$$

$$\begin{aligned} X'_1 &= X'_2 = X'_3 = X'_{123} (Q = 01101001) = \\ &= 000 \vee 001 \vee 010 \vee 011 \vee 100 \vee 101 \vee 110 \vee 111 = XXX = 1. \end{aligned}$$

В останньому випадку похідна за будь-якою вхідною змінною дорівнює одиниці. Це означає інваріантність стану входів для активізації будь-якої вхідної змінної.

Цікавим є той факт, що якщо отримані похідні або умови активізації всіх вхідних змінних – це означає, що практично побудований повний квазімінімальний тест для поодиноких несправностей вхідних та вихідних змінних цього функціонального елемента. Формальний або аналітичний запис такого тесту має вигляд: $T = (0 \vee 1) * X'_i$, де $i = \overline{1, n}$, а символ $*$ – операція конкатенації. Як приклад $(0 \vee 1) * (X_2 X_3) = 011 \vee 111$ – тест для перевірки першого входу елемента 3and.

Розглянемо векторно-табличне дедуктивне моделювання несправностей логіки для підвищення продуктивності та якості моделювання несправностей логічних схем шляхом суперпозиції таблиці істинності одиночних та кратних константних несправностей, що перевіряються на двійковому тестовому наборі та матриці дедуктивних векторів. Тут відокремлюються такі задачі: 1) синтез структур даних та алгоритму отримання дедуктивної матриці за логічним Q -вектором; 2) розробка таблиці істинності як моделі вхідних несправностей логіки для визначення якості тесту; 2) and-суперпозиція таблиці істинності та векторів дедуктивної матриці для аналізу несправностей, що перевіряються на двійкових тестових наборах; 3) алгоритм спільного аналізу таблиць істинності пе-

ревірки вхідних одиночних та кратних константних несправностей на повному тесті.

Метод синтезу дедуктивної матриці. Вихідні дані: логічний вектор функціональності $Q = 10000001$ (рис. 11). Синтез дедуктивної матриці використовує таку формулу: $D = L_H = (Q \oplus Q_x)_H$. Логічний вектор Q спочатку записується в матрицю по горизонталі та вертикалі, створюючи метрику матриці. Заповнюються рядки матриці $L_i = Q \oplus Q_i$ шляхом виконання правила: якщо вертикальна координата вектора $Q_i = 1$, вектор Q записується в i -рядок з інверсією своїх біт. В іншому випадку $Q_i = 0$ без інверсії. Потім виконується перекодування бітів матриці L за допомогою матриці H з метою отримання дедуктивної матриці $D = L_H$.



Рисунок 11 – Синтез дедуктивної матриці елемента за логічним вектором

Метод моделювання несправностей за дедуктивною матрицею. Вихідні дані, однакові в метриці 2^n дедуктивного вектора: матриця дедуктивних векторів D та таблиця істинності X одиночних та кратних вхідних константних несправностей (рис. 12). Вхідні дані – двійковий тестовий набір x , який визначає номер-адресу дедуктивного вектора D_x для моделювання несправностей, а також знаки несправностей, що перевіряються в таблиці істинності X .

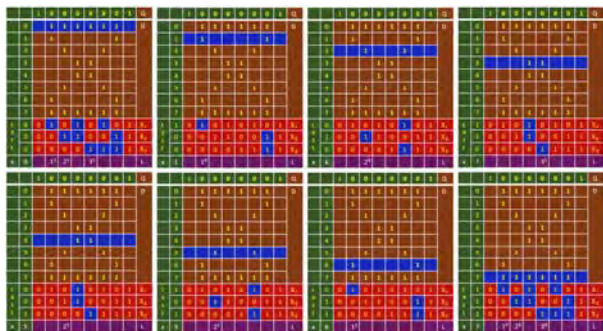


Рисунок 12 – Векторно-табличне дедуктивне моделювання несправностей логіки

Тут представлена суперпозиція однакових за розмірами матриці дедуктивних векторів і таблиці істинності всіх комбінацій константних несправностей на входах логічного елемента, заданого вектора $Q = 10000001$. Стівці таблиці істинності x одиничними координатами формують вичерпні комбінації одиночних та кратних константних дефектів, які є похідними від двійкового вхідного тестового набору x . Символ $x_{ij} = 1$ означає перевірку одиночної не-

справності $j\bar{x}_i$ на вхідному сигналі X_i . Кратна несправність ідентифікована декількома 1-координатами в стовпці матриці x . Наприклад, у синіх клітинах одиницями зазначені несправності, які перевіряються на тестових наборах $x = 101(2^1), 011(1^1), 111(1^0, 2^0, 3^0)$.

Алгоритм формування координат вектора дефектів, що перевіряються, містить всього один оператор логічного множення x -матриці на вектор D_x $L = X \wedge D_x$. При цьому дедуктивний вектор D_x ($x = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7$) розглядається як вектор стану виходів таблиці істинності несправностей, що перевіряються на тестових двійкових наборах $x = (000, 001, 010, 011, 100, 101, 011, 111)$. Результат множення своїми одиничними координатами формує сукупність несправностей, що перевіряються. Вони ідентифікуються в останніх рядках таблиць за загальноприйнятим позначенням.

Визначення знаків несправностей у матриці X заснована на суперпозиції двійкового тестового x -вектора зі стовпцями X -матриці: $X_j = \bar{x} \wedge X_j$. Знак несправності, що перевіряється, на активних 1-координат X -матриці, які виділені синім кольором (рис. 13), визначається за правилами: $X_{ij} = \bar{x}_i \wedge X_{ij}$.

Наприклад: $\bar{0} \wedge 1 = 1, \bar{1} \wedge 1 = 0$. Процес визначення знаків несправностей представлений першим та другим стовпцями. Аналіз якості тесту використовує метрику структури даних, представлених таблицями несправностей, що перевіряються, для їх об'єднання (суперпозиції) в процесі моделювання в одну компактну таблицю істинності. Підсумкова таблиця несправностей, визначена у трьохзначному алфавіті $\{0, 1, X\}$ за допомогою координатної операції об'єднання $0 \cup 1 = X$. Позначення координат таблиці несправностей: 0 – stack-at-0, 1 – stack-at-1, $X = \{0, 1\}$ – перевірка несправностей обох знаків вхідної лінії. Процес об'єднання таблиць представлений у правій частині.



Рисунок 13 – Інтеграція таблиць перевірки несправностей

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

1. Верифікацію запропонованого векторного методу синтезу дедуктивної матриці для моделювання несправностей виконано на прикладі синтезу дедуктивної матриці для трьох-входового логічного елемента, заданого вектором 10000001 (рис. 14).

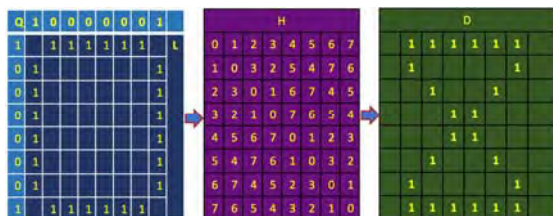


Рисунок 14 – Синтез матриці дедуктивних векторів

$$D = L_H$$

Такий елемент слід розглядати як чорний ящик або RTL-рівень представлення функцій стосовно його структури, яка може бути по-різному виконана при векторному завданні його поведінки. Тут інтерес є результатом транспортування списків активностей від входу до виходу цього елемента. При цьому нецікаво, які шляхи задіяні всередині конкретної реалізації логічного елемента. Проте синтез дедуктивних векторів цього елемента показав, що у всіх вхідних впливах вектори транспортування активностей мають одне й теж значення на парах наборів: 0–15 і 5–6. Інші набори, володіючи симетрією, не повторюються у матриці дедуктивних векторів. Нульові координати матриць L та D представлені порожніми клітинами з метою візуального сприйняття інформації. Таким чином, D -матриця дедуктивних векторів здобувається на основі виконання наступного оператора $D = (Q \oplus Q_i)_H$, отриманого внаслідок суперпозиції операторів: $L = Q \oplus Q_i$ та $D = L_H$.

2. Розглядається процес синтезу дедуктивних формул для чотирьох-входової логічної схеми, вентильна структура якої відома під ім'ям «схема Schneider» [13], яка представлена на рис. 15.

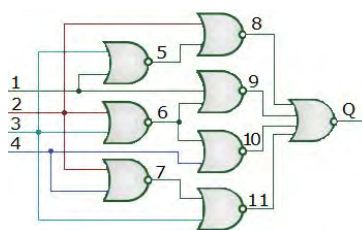


Рисунок 15 – Вентильна реалізація схеми Шнейдера

RTL-модель схеми задана векторним покриттям $Q = 1000000000000001$ (рис. 16).

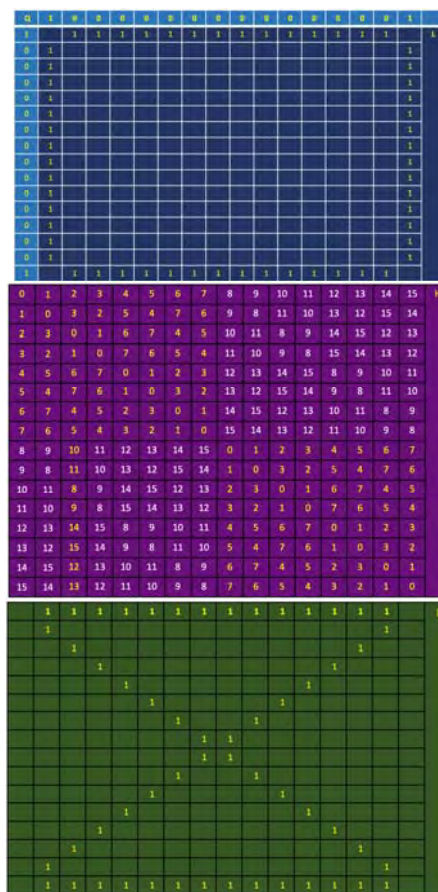


Рисунок 16 – Синтез дедуктивних векторів для чотирьох-входової схеми $Q = 1000000000000001$

Природно, що для кожного дедуктивного вектора можна отримати аналітичну форму у вигляді ДНФ для транспортування несправностей на конкретному наборі. Але цей шлях є технологічно складним і обчислювально-витратним, тому він не прийнятний для ринку електронних технологій.

Приклад моделювання вхідних несправностей чотирьох-входового елемента на дедуктивному векторі 0000001100000000 (7-й рядок наведеної вище матриці дедуктивних векторів) представлений на рис. 17. За чотири автоматні такти вектори вхідних несправностей були транспортовані на вихід з отриманням результату у вигляді одного вектора вихідних несправностей 0110. Розв'язання даного завдання на вентильній структурі цієї схеми потребувало б тридцять два автоматних такти.

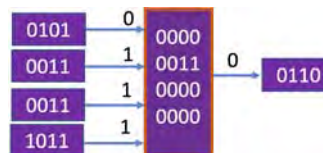


Рисунок 17 – Фрагмент моделювання чотирьох-входової схеми $Q = 1000000000000001$

Збільшення кількості входів функціонального RTL-елемента призводить до підвищення продуктивності моделювання за рахунок того, що більше векторів вхідних несправностей моделюються паралельно для отримання вихідного вектора дефектів. Використання чотирьох-входового елемента підвищує продуктивність моделювання в 11 разів, порівняно з його структурним вентиляним еквівалентом. У загальному випадку, підвищення продуктивності моделювання для RTL-схем, що мають n входів, порівняно з аналізом ДНФ-структури двох-входових вентилів, визначається такою формулою: $Q = \frac{n}{2} + n - 1$, $n = 4, 8, 16 \dots$

3. Розглянемо автомат векторно-дедуктивного моделювання несправностей логіки.

Мета – створення швидкодіючого ефективного вбудованого механізму для векторно-дедуктивного моделювання несправностей логічних елементів цифрових схем (рис. 18).



Рисунок 18 – Секвенсор векторно-дедуктивного моделювання несправностей логіки

Структура даних: H – універсальна матриця перекодування бітів для отримання дедуктивного вектора за вхідними параметрами: $H(x, 2^n)$, x – десятковий еквівалент вхідного двійкового слова, індекс, що визначає рядок таблиці перекодування, 2^n – довжина цього рядка в таблиці. H -матриця будується один раз для всіх n -вхідних елементів. $X = (X_1 X_2 X_3)$ – матриця векторів вхідних несправностей для набору x , U – універсум ідентифікаторів одиночних несправностей ліній схеми. $L = Q \oplus Q_x$ – інверсія логічного вектора у разі одиничної реакції елемента $Q_x = 1$ на вхідне слово. $D = (Q \oplus Q_x)_{H_i} = H$ – матриця отримання дедуктивного вектора для моделювання несправностей як адрес на основі логічного вектора Q .

Далі наводиться приклад векторно-дедуктивного моделювання вхідних двійкових наборів 101 та 111 для трьох-входової схеми Шнейдера (рис. 15).

Алгоритм моделювання несправностей як адрес на дедуктивному векторі має три команди (рис. 19), наведені нижче.

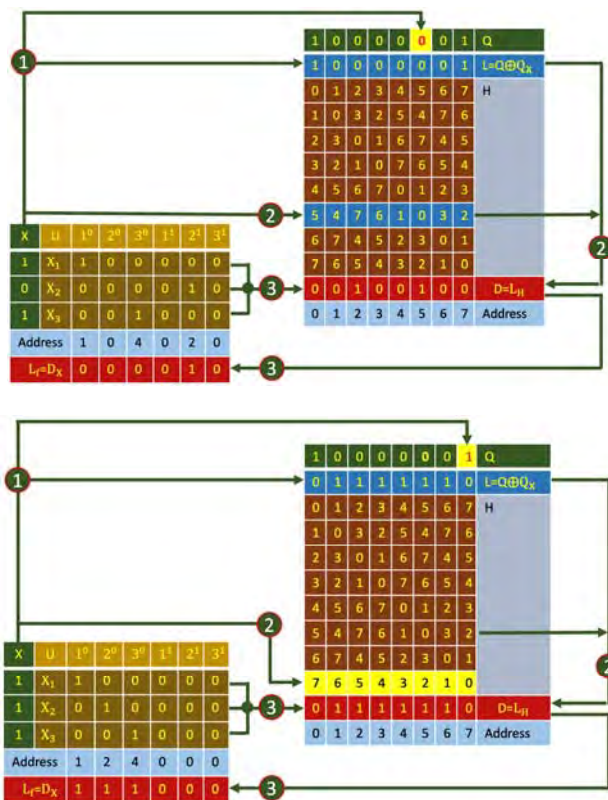


Рисунок 19 – In-мемору автомат векторно-дедуктивного моделювання несправностей логіки

1. Генерація активного вектора $L = (Q \oplus Q_x) = 10000001 \oplus 0 = 10000001$. Вектор $Q = 10000001 \oplus 1 = 01111110$ інвертується (права схема), якщо вхідне слово $x(111)$ адресує комірку $Q_x = 111 = 1$.

2. Генерація дедуктивного вектора на основі координатної переадресації бітів активного вектора $D = L_{Hx} = (10000001)_{54761032} = 00100100$.

3. Моделювання несправностей як адрес:

$$L_f = D_x = (00100100)_{010=1} = 1, (00100100)_{100=4} = 0, (00100100)_{101=5} = 1, \dots$$

Вхідна інформація представлена двома векторами: вхідним $x = 101(5)$, довжиною $n(3)$: логічним $Q = 10000001$, розмірністю $2^n(8)$. Для правої схеми: $x = 111(7)$, решта параметрів однакові з першою схемою.

Структура даних представлені двома блоками або матрицями. Перший блок-матриця формує вектори несправностей як матриці $F = X \times U$ для кожного вхідного двійкового набору у форматі $n \times 2n$, де $2n$ – кількість одиночних константних несправностей на n -входах. Координата матриці несправностей визначається за такою формулою: $F_{ij} = 1 \leftarrow U_j^{z=x_i}$. Напри-

клад, 1^0 – 0-константна несправність на лінії 1, а 2^1 – 1-константна несправність на лінії 2. Інакше $F_{ij} = 0$.

Іншими словами, вхідні несправності, що підлягають моделюванню, є інверсними до справного стану входів.

Стовпці F -матриці несправності формують десяткові адреси клітин дедуктивного вектора за правилом: $X_1 \times 2^0 + X_1 \times 2^1 + X_1 \times 2^2 + \dots$. Результат моделювання несправностей на вхідному тестовому наборі x формується у (червоному) векторі $L_f = D_x$, де одиничними координатами відзначені стовпці, які відповідають несправностям, що перевіряються. X – стовпці матриці несправностей, що розглядаються як адреси комірок дедуктивного Q -вектора для формування L_f -векторів несправностей, що перевіряються на основі read-write транзакцій. Другий блок призначений для генерації дедуктивного D -вектора за вихідними даними: логічний вектор Q , двійкове вхідне слово x , матриця перекодування бітів H . Для синтезу дедуктивного вектора використовується формула: $D = L_H = (Q \oplus Q_x)_H$. Блакитні рядки адрес (Address) використовуються для візуалізації процесу моделювання. Вони не потрібні для написання програмного коду.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У роботі запропоновано векторний метод синтезу дедуктивних матриць для транспортування вхідних векторів несправностей на вихід елемента.

Обчислювальна складність $C = \frac{1}{2} \times k \times n^2$, де k – час зчитування з пам'яті (< 10 ns), n – кількість ліній у схемі (< 1000), $\frac{1}{2}$ – половина таблиці моделювання одного тест-набору. Оброблено 50 комбінаційних схем різної розмірності. Швидкодію методу підтверджено експериментально: схема на 10 входів обробляється на повному тесті за 10 мкс, 20 входів – 18 мкс. Використовувався 4-х ядерний процесор Intel Core i5, 3.8 GHz. Результати експериментів узагальнено на рис. 20.

Circuit	c17	c53	C 432	c865	c953	c1023	c4532	c4378
Test length, sets	32	64	100	255	784	1024	1056	1056
Modeling, ns	22	32	57	59	63	71	88	87
Simulation, ns	21	64	531	855	867	875	1033	1091

Рисунок 20 – Обчислювальна складність моделювання у порівнянні з аналогами

Розроблено структури даних для паралельного моделювання несправностей цифрових схем на основі примітивної read-write транзакції в матричній пам'яті, де поєднання несправностей є стовпцями-адресами.

Запропоновано секвенсор із п'яти блоків, що складають векторно-логічний комп'ютинг, пов'язаний з

дедуктивним моделюванням несправностей на основі read-write транзакцій.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Незважаючи на технологічну простоту запропонованого методу синтезу матриці дедуктивних векторів, даний підхід має очевидний недолік, пов'язаний з розмірністю таблиць при великій кількості вхідних змінних. Його можна усунути, якщо на вхідному тестовому наборі оперативно генерувати лише один дедуктивний вектор для моделювання несправностей. Для цього потрібно використовувати лише оператор $D_i = (Q \oplus Q_i)_{Hij}$, описаний раніше. Обчислювальна

складність цієї процедури дорівнює $C = 2^n$, де n – число змінних логічного елемента, яка визначається перестановками бітів в Q -векторі по H -матриці для отримання D -вектора. У цьому випадку дедуктивне моделювання несправностей не відрізнятиметься швидше за все від справного моделювання цифрової схеми. Дельта час обробки одного логічного елемента $\Delta T = tD + tF = 2^{n+1}$.

Можна дійти висновку, що дедуктивна матриця довільної логіки має таку метрику на вирішення завдань технічної діагностики: 1) матриця дедуктивних векторів-рядків вирішує питання точного моделювання дефектів шляхом транспортування вхідних векторів несправностей на вихід елемента; 2) матриця є впорядкованою сукупністю векторних похідних по вхідним змінним, які визначаються стовпцями матриці; 3) сукупність X_i – похідних по вхідним змінним у матриці є тестом для перевірки одиночних константних несправностей вхідних і вихідних ліній; 4) одиничні координати матриці дедуктивних векторів є умови активізації вектора вхідних даних як адрес для транспортування на вихід схеми; 5) матриця може бути активною моделлю для паралельного пошуку несправностей у безтестовому режимі online діагностування.

Переваги запропонованої технології моделювання несправностей можна описати так (рис. 21): 1) відсутність обмежень на розмір та складність логічних елементів, що підлягають моделюванню; 2) відсутність традиційно складного алгоритму моделювання, тільки операція and-суперпозиції таблиці істинності та дедуктивного вектора; 3) паралельно і одночасно моделюються одиночні та всі комбінації кратних константних несправностей, представлених у вигляді таблиці істинності; 4) відсутня процедура генерації списків вхідних несправностей, оскільки таблиця істинності для будь-якої функціональності на n -входів та ж сама; 5) метод використовує лише одну паралельну логічну and-операцію і має лінійну обчислювальну складність виконання векторних операцій на множині несправностей; 6) для реалізації методу не потрібні потужні процесори та блоки АЛП, достатньо лише read-write транзакції на пам'яті; 7) метод слід розглядати як про-

цесорне ядро для моделювання несправностей IP-core SoC і може бути корисним для ринку електронних технологій; 8) метод орієнтований на технології сучасного in-memory computing обробки великих даних без блоків АЛП та процесора.

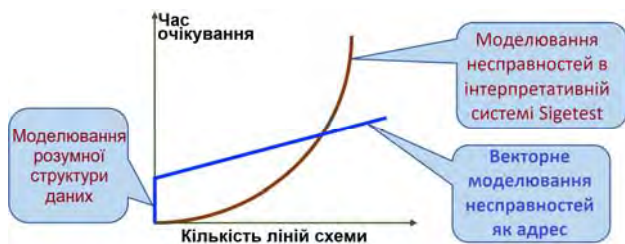


Рисунок 21 – Обчислювальна складність моделювання у порівнянні з аналогами

Переваги автомата векторно-дедуктивного моделювання несправностей полягають у наступному:

1) технологічність синтезу дедуктивного вектора за два автоматні цикли для моделювання несправностей.

2) простота структур даних та алгоритму моделювання несправностей. Чим більше вхідних змінних у логічній схемі, як елементі, тим вищий рівень паралелізму обробки несправностей як адрес. Використовуються тільки read-write транзакції та жодної традиційної логіки CPU.

3) обчислювальна складність алгоритму дедуктивно-векторного моделювання несправностей як адрес: $C = 2^n + 2^n + 2F$, де 2^n – складність виконання координатних операцій для генерації вектора активності $L = Q \oplus Q_x$, 2^n – складність перекодування координат вектора активності з метою отримання дедуктивного вектора $D = L_{H_x}$, $2F$ – число автоматних тактів для моделювання комбінацій вхідних несправностей як адрес.

4) структура даних і алгоритм моделювання несправностей як адрес, орієнтовані на імплементацію як вбудованого BIST SoC, а також для реалізації як програмних за стосунків (software aps) для оцінки якості синтезованого тесту.

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто завдання перенесення архітектури фон Неймана у пам'ять та заміни потужного процесора read-write транзакціями на логічних векторах для зниження енергетичних та часових витрат при моделюванні логічних функціональностей будь-якої розмірності.

В результаті дослідження зроблено крок на шляху створення векторно-логічного in-memory комп'ютингу, що використовує лише read-write транзакції на адресній пам'яті. Використана метрика управління на основі відмов (failure-driven management) $T \oplus F \oplus L = 0$, яка формалізує на макrorівні всі відомі процеси створення комп'ютингу,

включаючи проектування та верифікацію (design and test).

Наукова новизна полягає у розробці наступних інноваційних рішень:

1) вперше запропоновано векторно-логічний метод синтезу матриці дедуктивних векторів для паралельного моделювання комбінацій вхідних несправностей як адрес;

2) вперше запропоновано автомат векторно-дедуктивного моделювання несправностей як адрес на основі read-write транзакцій, орієнтований для імплементації в FPGA LUT, вбудованих online симуляторах SoC, як ядро для моделювання несправностей цифрових систем RTL-рівня;

3) демонстрація технологічних переваг векторно-логічного синтезу дедуктивних матриць виконана на численних прикладах традиційної та RTL-логіки, що підкреслює технологічність векторів у порівнянні з аналітичними дедуктивними формулами для побудови симуляторів;

4) матриця дедуктивних векторів, як сукупність вектор-стовпців булевих похідних використовується для побудови мінімальних тестів для логічних елементів;

5) рекурсивна формула синтезу матриці перестановки координат у логічному векторі активності дозволяє суттєво спростити отримання дедуктивної матриці для моделювання несправностей як адрес.

Практична значимість дослідження полягає у тому, що in-memory симулятор дозволить отримати швидкодію моделювання несправностей реальних цифрових блоків SoC лише на рівні сотень наносекунд [23].

Перспективи дослідження пов'язані з імплементацією даної технології моделювання цифрових пристроїв на ринку EDA, оскільки аналоги таких простих алгоритмів обробки великих проектів відсутні навіть у великих компаніях (Synopsys, Cadence, Mentor Graphics, Aldec).

ПОДЯКИ

Автори вдячні колегам за їх активну участь в обговоренні та підтримці наукової школи «Проектування та технічна діагностика цифрових систем на кристалах, комп'ютерах та мережах», розуміння важливого значення розвитку фундаментальних та прикладних досліджень теорії in-memory computing.

ЛІТЕРАТУРА

1. Vector-deductive memory-based transactions for fault-address simulation / [W. Gharibi, A. Hahanova, V. Hahanov et al.] // Electronic Modeling. – 2023. – V. 45, №1. – P. 3–26. DOI: 10.15407/emodel.45.01.003.
2. Shannon Claude E. Von Neumann's contributions to automata theory / Claude E. Shannon // Bulletin American Mathematical Society. – 1958. – V.64, №3. – P. 123–129. DOI: 10.1090/S0002-9904-1958-10214-1.
3. Davis M. Emil Post's contributions to computer science / M. Davis // Fourth annual symposium on logic in computer

- science, Pacific Grove, CA, USA, 5–8 June 1989. – P. 134–136. DOI: 10.1109/LICS.1989.39167.
4. What's new in the 2022 Gartner hype cycle for emerging technologies [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>. – Access data: 02.08.2023.
 5. RC-NVM: Enabling Symmetric Row and Column Memory Accesses for In-memory Databases / [P. Wang et al.] // IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA), Vienna, Austria, 24–28 February 2018. – P. 518–530. DOI: 10.1109/HPCA.2018.00051.
 6. AI Accelerator Embedded Computational Storage for Large-Scale DNN Models / [B. Ahn, J. Jang, H. Na, et al.] // IEEE 4th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS), Incheon, Korea, Republic, 13–15 June 2022. – P. 483–486. DOI: 10.1109/AICAS54282.2022.9869991.
 7. Reliable ReRAM-based logic operations for computing in memory / [M. Moreau et al.] // IFIP/IEEE International Conference on Very Large-Scale Integration (VLSI-SoC), Verona, Italy, 8–10 October 2018. – P. 192–195. DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2018.8644780.
 8. Kang W. Spintronic memories: from memory to computing-in-memory / W. Kang, H. Zhang, W. Zhao // IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures (NANOARCH), Qingdao, China, 17–19 July 2019. – P. 1–2. DOI: 10.1109/NANOARCH47378.2019.181298.
 9. Memory sizing of a scalable SRAM in-memory computing tile based architecture / [R. Gauchi et al.] // IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large-Scale Integration (VLSI-SoC), Cuzco, Peru, 6–9 October 2019. – P. 166–171. DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2019.8920373.
 10. Pomeranz I. Forward-looking fault simulation for improved static compaction / I. Pomeranz, S. M. Reddy // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 2001. – Vol. 20, No. 10. – P. 1262–1265. DOI: 10.1109/43.952743.
 11. Deductive qubit fault simulation / [V. Hahanov, S. Chumachenko, I. Iemelianov et al.] // 14th International Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017. – P. 256–259. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916129.
 12. Qubit-driven Fault Simulation / [V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova et al.] // IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Santiago, Chile, 11–13 March 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 13. Qubit Test Synthesis Processor for SoC Logic / [W. Gharibi, D. Devadze, V. Hahanov et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 13–16 September 2019. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884476.
 14. Vector-qubit models for SOC logic-structure testing and fault simulation / [V. Hahanov et al.] // 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021. – P. 24–28. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9385266.
 15. Quantum models and method for analysis and testing computing systems / [V. I. Hahanov, S. M. Hyduke, W. Gharibi et al.] // 11th International Conference on Information Technology: New Generations, Las Vegas, 7–9 April 2014. – P. 430–434. DOI: 10.1109/ITNG.2014.125.
 16. Qubit fault detection in SoC logic / [M. Karavay, V. Hahanov, E. Litvinova et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 13–16 September 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884475.
 17. Qubit-driven fault simulation / [V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova et al.] // IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Santiago, Chile, 11–13 March 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 18. Qubit fault detection in SOC logic / [M. Karavay, V. Hahanov, E. Litvinova et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia, 13–16 September 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884475.
 19. Hahanov V. Cyber physical computing for iot-driven services / V. Hahanov. – New York : Springer, 2018. – 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8
 20. Fast RTL fault simulation using decision diagrams and bitwise set operations / [U. Reinsalu, J. Raik, R. Ubar et al.] // IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems, Vancouver, Canada, 3–5 October 2011. – P. 164–170. DOI: 10.1109/DFT.2011.42.
 21. Pomeranz I. A synthesis procedure for flexible logic functions / I. Pomeranz, S. M. Reddy // Design, Automation and Test in Europe, Paris, France, 23–26 February 1998. – P. 973–974. DOI: 10.1109/DATE.1998.655995.
 22. Armstrong D.B. A deductive method for simulating faults in logic circuits / D.B. Armstrong // IEEE Transactions on Computers. – 1972. – Vol. C-21, No. 5. – P. 464–471. DOI: 10.1109/T-C.1972.223542.
 23. Performance Evaluation of LUTs in FPGA in Different Circuit Topologies / [N. Vinod et al.] // International Conference on Communication and Signal Processing (ICCS), 28–30 July 2020. – P. 1511–1515. DOI: 10.1109/ICCS48568.2020.9182074.

Стаття надійшла до редакції 27.04.2023.
Після доробки 19.05.2023.

UDC 681.326

VECTOR-LOGICAL FAULT SIMULATION

Hahanov V. – Doctor of science, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Chumachenko S. – Doctor of science, Professor Head of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Litvinova Y. – Doctor of science, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Hahanova I. – Doctor of science, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Khakhanova A. – PhD, Associated Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Shkil A. – PhD, Associated Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Rakhlis D. – PhD, Associated professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Hahanov I. – Post-graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Shevchenko O. – PhD, Assistant of Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The main idea is the creation of vector-logical in-memory computing (VLC), which uses only read-write transactions on the address memory for faults-as-addresses simulation. There is no traditional logic. VLC is free from processor commands and ALU for computing organization and is therefore focused on implementation in SoC and FPGA. A vector-logical method of deductive matrix synthesis for the transportation of input faults, which has a quadratic computational complexity, is proposed. An in-memory simulator-automata for vector-deductive faults-as-addresses simulation, which based on read-write transactions for implementation in SoC is proposed.

Objective. Development of a vector deductive method of fault simulation based on primitive read-write transactions for the analysis of logic circuits.

Method. An input test set and a logical functionality vector are used. The proposed method is a development of the deductive vectors' synthesis algorithm based on the truth table. The deductive matrix is intended for the synthesis and verification of tests using parallel simulation of faults-as-addresses combinations, based on read-write transactions over bits of deductive vectors in memory.

Results. A vector method of the deductive matrices synthesis for the transportation of input faults vectors to the output of the element, was proposed. Data structures have been developed for parallel faults simulation of digital circuits based on a primitive read-write transaction in matrix memory, where combinations of faults serve as address-columns. A sequencer of five blocks, that constitute a vector-logic computing, connected with deductive faults simulation based on read-write transactions, is proposed. Verification of models and methods on test examples has been performed.

Conclusions. The scientific novelty consists in the development of the following innovative solutions: 1) a vector-logic method of synthesis of the deductive vectors matrix for parallel simulation of combinations of input faults-as-addresses, is proposed for the first time; 2) an automata for vector-deductive faults-as-addresses simulation, on the basis of read-write transactions, which is oriented for implementation in FPGA LUT, embedded online simulator SoC, as a core for faults simulation of RTL-level digital systems, was proposed for the first time; 3) the demonstration of the technological advantages of the vector-logic synthesis of deductive matrices is performed on numerous examples of traditional and RTL-logic, which accentuate the manufacturability of vectors in comparison with analytical deductive formulas during simulators construction; 4) a matrix of deductive vectors, as a set of vector-columns of Boolean derivatives is used to construct minimal tests for logical elements; 5) the recursive formula for the synthesis of the permutation of coordinates matrix in the logical activity vector makes it possible to significantly simplify the obtaining of the deductive matrix for faults-as-addresses simulation. The practical significance lies in the fact that the in-memory simulator will allow to obtain the speed of faults simulation of real digital blocks for SoC at the level of hundreds of nanoseconds. Complexity estimates of the corresponding algorithms are given.

KEYWORDS: vector computing, vector form of logic, matrix of deductive vectors, vector method of deductive matrix synthesis, read-write transaction, vector model of faults, vector-logical deductive faults simulation.

REFERENCES

1. Gharibi W., Hahanova A., Hahanov V. et al. Vector-deductive memory-based transactions for fault-as-address simulation, *Electronic Modeling*, 2023, V. 45, №1, pp. 3–26. DOI: 10.15407/emodel.45.01.003.
2. Shannon Claude E. Von Neumann's contributions to automata theory, *Bulletin American Mathematical Society*, 1958, V.64, №3, pp. 123–129. DOI: 10.1090/S0002-9904-1958-10214-1.
3. Davis M. Emil Post's contributions to computer science, *Fourth annual symposium on logic in computer science*. Pacific Grove, CA, USA, 5–8 June 1989, pp. 134–136. DOI: 10.1109/LICS.1989.39167.
4. What's new in the 2022 Gartner hype cycle for emerging technologies [Electronic resource]. Access mode: <https://www.gartner.com/en/articles/what-s-new-in-the-2022-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies>. Access data: 02.08.2023.
5. Wang P. et al. RC-NVM: Enabling Symmetric Row and Column Memory Accesses for In-memory Databases, *IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture (HPCA)*. Vienna, Austria, 24–28 February 2018, pp. 518–530. DOI: 10.1109/HPCA.2018.00051.
6. Ahn B., Jang J., Na H. et al.] AI Accelerator Embedded Computational Storage for Large-Scale DNN Models, *IEEE 4th International Conference on Artificial Intelligence Circuits and Systems (AICAS)*. Incheon, Korea, Republic, 13–15 June 2022, pp. 483–486. DOI: 10.1109/AICAS4282.2022.9869991.
7. Moreau M. et al. Reliable ReRAM-based logic operations for computing in memory, *IFIP/IEEE International Conference on Very Large-Scale Integration (VLSI-SoC)*. Verona, Italy, 8–10 October 2018, pp. 192–195. DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2018.8644780.
8. Kang W., Zhang H., Zhao W. Spintronic memories: from memory to computing-in-memory, *IEEE/ACM International Symposium on Nanoscale Architectures (NANOARCH)*. Qingdao, China, 17–19 July 2019, pp. 1–2. DOI:10.1109/NANOARCH47378.2019.181298.
9. Gauchi R. et al. Memory sizing of a scalable SRAM in-memory computing tile based architecture, *IFIP/IEEE 27th International Conference on Very Large-Scale Integration*

- (VLSI-SoC). Cuzco, Peru, 6-9 October 2019, pp. 166–171. DOI: 10.1109/VLSI-SoC.2019.8920373.
10. Pomeranz I., Reddy S. M. Forward-looking fault simulation for improved static compaction, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2001, Vol. 20, No. 10, pp. 1262–1265. DOI: 10.1109/43.952743.
 11. Hahanov V., Chumachenko S., Iemelianov I. et al. Deductive qubit fault simulation, *14th International Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. Lviv, Ukraine, 21–25 February 2017, pp. 256–259. DOI: 10.1109/CADSM.2017.7916129.
 12. Hahanov V., Gharibi W., Litvinova E. et al. Qubit-driven Fault Simulation, *IEEE Latin American Test Symposium (LATS)*. Santiago, Chile, 11–13 March 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 13. Gharibi W., Devadze D., Hahanov V. et al. Qubit Test Synthesis Processor for SoC Logic, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, Batumi, Georgia, 13–16 September 2019, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884476.
 14. Hahanov V. et al. Vector-qubit models for SOC logic-structure testing and fault simulation, *16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*. Lviv, Ukraine, 22–26 February 2021, pp. 24–28. DOI: 10.1109/CADSM52681.2021.9385266.
 15. Hahanov V. I., Hyduke S. M., Gharibi W. et al. Quantum models and method for analysis and testing computing systems, *11th International Conference on Information Technology: New Generations*. Las Vegas, 7–9 April 2014, pp. 430–434. DOI: 10.1109/ITNG.2014.125.
 16. Karavay M., Hahanov V., Litvinova E. et al. Qubit fault detection in SoC logic, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Batumi, Georgia, 13–16 September 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884475.
 17. Hahanov V., Gharibi W., Litvinova E. et al. Qubit-driven fault simulation, *IEEE Latin American Test Symposium (LATS)*. Santiago, Chile, 11–13 March 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 18. Karavay M., Hahanov V., Litvinova E. et al. Qubit fault detection in SOC logic, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Batumi, Georgia, 13–16 September 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2019.8884475.
 19. Hahanov V. *Cyber physical computing for iot-driven services*. New York, Springer, 2018, 279 p. DOI: 10.1007/978-3-319-54825-8
 20. Reinsalu U., Raik J., Ubar R. et al. Fast RTL fault simulation using decision diagrams and bitwise set operations, *IEEE International Symposium on Defect and Fault Tolerance in VLSI and Nanotechnology Systems*. Vancouver, Canada, 3–5 October 2011, pp. 164–170. DOI: 10.1109/DFT.2011.42.
 21. Pomeranz I., Reddy S. M. A synthesis procedure for flexible logic functions, *Design, Automation and Test in Europe*. Paris, France, 23–26 February 1998, pp. 973–974. DOI: 10.1109/DATE.1998.655995.
 22. Armstrong D. B. A deductive method for simulating faults in logic circuits, *IEEE Transactions on Computers*, 1972, Vol. C-21, No. 5, pp. 464–471. DOI: 10.1109/T-C.1972.223542.
 23. Vinod N. et al. Performance Evaluation of LUTs in FPGA in Different Circuit Topologies, *International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 28–30 July 2020, pp. 1511–1515. DOI: 10.1109/ICCSP48568.2020.9182074.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 004.93

DETERMINATION AND COMPARISON METHODS OF BODY POSITIONS ON STREAM VIDEO

Bilous N. V. – PhD, Associate professor, Professor of the Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Ahekian I. A. – Senior Lecturer of the Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Kaluhin V. V. – Master of the Software Engineering Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. One of the tasks of computer vision is the task of determining the human body in the image. There are many methods to solve this problem, some are based on specific equipment (motion capture, kinect) and provide the highest accuracy, some give less accuracy but do not require additional equipment and use less computing power. But usually, such equipment has a high cost, so to ensure the low cost of developments designed to determine the body in the image, you should develop algorithms based on computer vision technology. These algorithms can then be applied to various fields to analyze and compare body positions for a variety of purposes.

Objective. The aim of the work is to study the effectiveness of existing libraries to determine the human body position in the image, as well as methods for comparing the obtained poses in terms of speed and accuracy of determination.

Methods. A set of libraries and pose comparison algorithms were analyzed for the purpose of developing a system for determining the correctness of exercise by the user in real time. OpenPose, PoseNet and BlazePose libraries were analyzed for their suitability in recognizing and tracking body parts and movements in real-time video streams. The advantages and disadvantages of each library were evaluated based on their performance, accuracy, and computational efficiency. Additionally, different pose comparison algorithms were analyzed. The effectiveness of each algorithm was evaluated based on their ability to accurately determine and compare body positions.

As a result, the combination of BlazePose and weighted distance method can achieve the best performance in pose recognition, with high accuracy and robustness across a range of challenging scenarios. The weighted distance method can be further enhanced with techniques such as L2 normalization and pose alignment to improve its accuracy and generalization. Overall, the combination of the BlazePose library and weighted distance methods offers a powerful and effective solution for pose recognition, with high F1 index.

Results. Existing models for determining poses have shown similar results in the quality of determination with a run-up of about 2%. When developing a cross-platform software product, the BlazePose library, which has an API for working directly in the browser and on mobile platforms, has a significant advantage in speed and accuracy. Also, as the library uses extended 33 keypoint topology it becomes applicable to a wider list of tasks. In the study of comparison methods, the greatest influence on the results was exerted by the quality of pose determination.

Conclusions. Among the methods of comparison, the method of weighted distances showed the best results. The speed of position determination is inversely proportional to the quality of determination and significantly exceeds the recommended value – 40ms.

KEYWORDS: computer vision, body position, keypoints, pose estimation, pose comparison, blazepose, mediapipe, tensorflow.

ABBREVIATIONS

CNN is a convolutional neural network;
RNN is a recurrent neural network;
OKS is a key points of the object;
PCK is probability of correct keypoint;
API is an application programming interface;
RAM is a random-access memory.

NOMENCLATURE

d_i is a Euclidean distance between the real key point and the estimated key point;
 s is a scale: the area of the boundary field divided by the total area of the image;

k is a constant that is determined separately for each control point;

d is a Euclidean distance;

n is a dimension of the vectors;

x, y are the corresponding coordinates of the two vectors in the measurement plane i ;

G and F are two vectors of poses compared after L2 normalization;

n is a number of defined control points;

F_{ck} is a value of the probability of finding the correct joint for the element number k of the vector F , F_{xy} and G_{xy}

INTRODUCTION

Body position is the alignment of body parts in relationship to one another at any given moment, so the task of determining a person's body position can be defined as the task of finding connection points on the human body, also known as key points – elbows, wrists, knees, and others.

Obtained key points then can be used for the skeletal representation of the human body (see Fig. 1). In this representation, the body is represented as a graph, where each node corresponds to a joint (key point) on the body, and the edges between the nodes represent the bones or limbs [1].

When recognizing pose, usually do not pay much attention to facial recognition, but only to the position of the head. Nevertheless, there are certain scenarios where face recognition can be useful as well. For example, in some applications such as surveillance or security, it may be important to detect the identity of a person based on both posture or body language and their face. There are several classic methods for face recognition that have been used over the years like Eigenface, Fisherface or Viola-Jones algorithms, and wavelet transform [2].



Figure 1 – An example of determining the body pose in the image

Although the purpose of this research is mainly focused on the analysis of the methods for poses determination and comparison, some approaches for face recognition can be used for this aim as well.

Vector-based approach for face analysis involves creating a numerical representation of a person's face in an image, known as a vector. The vector is calculated

using various mathematical techniques that consider the shape and features of the face. One popular way of using this approach is face recognition software, where the vector for a given face can be compared to vectors from other faces to determine if they match.

3D model-based method for head position analysis involves creating a 3D model of a person's head and using it to determine the position of the head in a 2D image. The 3D model is created using a machine learning technique called a regression CNN, which is trained using examples of 3D models and their corresponding 2D projections. The approach is more accurate than the vector-based and is less affected by lighting and partial face closure [3]. However, it requires a calibrated camera and knowledge of the location of 3D points on the head, making it more complex to implement.

Modern methods for pose recognition tasks commonly rely only on "Deep Learning" technologies.

CNN can be used to extract features from the input image, and a following fully connected neural network predicts the pose. The CNN typically includes multiple layers that can learn to recognize and extract different features from the image, such as edges, corners, and textures. The fully connected neural network takes these features as input and produces an output that represents the predicted pose [4].

Another way is to use a RNN to predict the pose over time, by considering the temporal dependencies between frames in a video [5].

To evaluate the performance of the pose estimation algorithm several metrics can be used.

An MS COCO data set [6] is used to assess the quality of the pose definition, using the OKS indicator – match the key points of the object. It is calculated from the distance between the predicted points and the marked points, normalized on a human scale. A constant of scale and key point needed to equalize the importance of each key point: the location of the neck is more accurate than the location of the thigh.

$$OKS = \exp\left(-\frac{d_i^2}{2s^2k_i^2}\right) \quad (1)$$

In the above formula d_i is the Euclidean distance between the real key point and the estimated key point, s is the scale: the area of the boundary field divided by the total area of the image, k is a constant that is determined separately for each control point.

Constants for key points were calculated by a group of researchers with MS COCO.

Another common evaluation metric is PCK and its variant PCKh. PCK measures the percentage of correctly estimated keypoints within a certain distance threshold of the ground truth. PCK is often used in hand pose estimation tasks. The PCK score is computed for each keypoint separately and then averaged over all keypoints to get the final score. PCKh, on the other hand, is a variation of PCK that considers the scale of the person in

the image. It is defined as the percentage of keypoints whose predicted location is within a certain fraction of the head size distance from the ground truth keypoint [7].

However, these metrics cannot be used to compare different people in different images. If we try to use them for this purpose, the results will not accurately reflect the differences between the poses, as the metrics will not be able to account for variations in body size, shape, and position across different people [8]. The proposed means of comparison should consider all these factors.

After choosing the appropriate pose comparison algorithm the aspect of pose recognition library performance should be taken into account. It will directly impact the processing time required for each frame and thus the overall system's ability to keep up with the video feed in real-time [9].

The minimum frame rate for high-quality video display is 24 frames per second. Therefore, the processing time of each frame should take about 40ms for a complete analysis of the video stream. Analysis is possible even if the process takes more time, but in this case some number of frames will be lost, which will deny the possibility of analyzing fast movements.

1 PROBLEM STATEMENT

The purpose of this research is to identify the most effective combination of pose recognition library and pose comparison algorithm for accurately recognizing and comparing human poses to implement a system that determines the correctness of the exercises on streaming video. The research aims to evaluate the performance of different pose recognition library runtimes and pose comparison algorithms using the F1 index as the performance metric. Based on this the problem statement can be divided into several parts.

Firstly, it is necessary to investigate the literature that provides information on the existing libraries for pose recognition and their characteristics like speed, accuracy of determination, robustness to variations in lighting conditions, background clutter, and occlusions, etc. After that, the most appropriate library that will be used for further research should be selected.

The second step is to analyze the possible algorithms applicable to compare the obtained poses.

Finally, the F1 index as performance metric for selected pose recognition library and different pose comparison algorithms can be calculated. To achieve this goal an experimental application must be implemented and a dataset of poses with corresponding labels indicating which poses are similar must be collected.

Since the library analyzes a two-dimensional image and builds a skeleton in two-dimensional space, the poses will be defined as the same only if they are in the photo in the same angle.

As a result, it is necessary to obtain a set of recommendations for the use of the library for determining poses in the context of creating a system of real-time video analysis, as well as a comparative description of methods for comparing poses.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

As a result of research into existing libraries for position determination, it was found that now there is a large list of available solutions. The differences between these libraries primarily lie in the type of model they use, the types of poses they can estimate, their performance on different types of input, etc. OpenPose, PoseNet and BlazePose as the most modern were selected for the review.

OpenPose has an API for python and a plugin for the Unity game engine. Inside, it uses multi-stream optimization, which speeds up image processing speed and accordingly finds more control points in the image in terms of streaming video. According to official documentation, OpenPose can identify 25 key points when assessing the body and legs, 2x21 key points when analyzing the face image [10].

The PoseNet library is based on the TensorFlow Light framework and can distinguish 17 key points in the image. An important detail to note is that the researchers developed both the ResNet and MobileNet PoseNet models. The ResNet model has a higher accuracy, but has a large size and many layers, while the MobileNet model is designed to work on mobile devices [11]. The library can be used in a large number of programming languages, namely Python, C ++, Java, Swift, Objective C and Javascript.

BlazePose is a lightweight convolutional neural network architecture for human pose estimation that is tailored for real-time inference on mobile devices. During inference, the network produces 33 body keypoints for a single person and runs at over 30 frames per second on most modern devices. These additional keypoints provide vital information about face, hands, and feet location with scale and rotation and makes it particularly suited to real-time use cases like fitness tracking and sign language recognition [12].

The main difference of this library is that the neural network uses both heat maps and regression to keypoint coordinates to estimate the body pose. At the same time the new 33 points topology (see Fig. 2) that is a superset of BlazeFace, BlazePalm, and MS COCO[6] allows the library to be consistent with the respective datasets and inference networks.

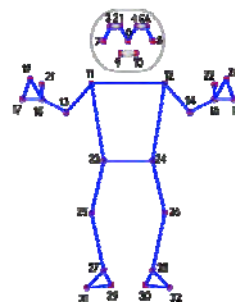


Figure 2 – 33 keypoint topology

Comparative results of testing the quality and performance of these libraries are shown in Table 1.

The table shows the obtained values of PCK as well as the frames per second values on two different datasets. The first dataset, referred to as AR dataset, contains a wide variety of human poses in the wild. The second is comprised of yoga/fitness poses only. As not all libraries support extended topology the MS COCO topology was used for consistency as the most common one. As an evaluation metric, the Percent of Correct Points with 20% tolerance (PCK@0.2) (where we assume the point to be detected correctly if the 2D Euclidean error is smaller than 20% of the corresponding person’s torso size) was used.

Table 1 – The results of comparing performance and accuracy on different datasets

	FPS	AR Dataset	Yoga Dataset
OpenPose	0.4	87.8	83.4
BlazePose Full	10	84.1	84.5
BlazePose Lite	31	79.6	77.6

To solve the problem of variations in starting sizes and different positions of people in the frame when comparing poses, the input images can be preprocessed by resizing them to a fixed size, cropping them to a specific region of interest, and normalizing the pixel values. These techniques can help reduce the impact of image size and position differences and improve the accuracy of pose comparison [9].

Specifically, L2 normalization can be applied to the pose vectors to normalize the joint positions or joint angles. This technique can help to reduce the impact of variations in the magnitude of joint positions or angles, which can occur due to different camera perspectives and subject sizes [13].

When comparing poses, we need to determine the degree of similarity of vectors, because they will never be 100% identical. For this definition, use the concept of distance between vectors. The simplest and most classical way to determine it is the Euclidean distance, calculated by the formula:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}. \quad (2)$$

In the above formula d is the Euclidean distance, n is the dimension of the vectors, x , y are the corresponding coordinates of the two vectors in the measurement plane i .

But due to the normalization of vectors, this method in its pure form loses its representativeness, because the reduction in image size directly affects the results of its calculation. therefore, we can use the concept of cosine

similarity, which is the value of the cosine of the angle between the vectors, calculated by the formula:

$$\cos(a,b) = \frac{a \times b}{|a| \times |b|}. \quad (3)$$

Using the value of cosine similarity, we can calculate the value of the distance between the vectors by the formula:

$$D(F_{xy}, G_{xy}) = \sqrt{2 \times (1 - \text{cosineSimilarity}(F_{xy}, G_{xy}))}. \quad (4)$$

As a result, we obtain a value through which we can assess the similarity of the positions. The smaller this value, the more similar the poses. The resulting similarity ranges from -1 , which means the exact opposite, to 1 means the same, and 0 indicates orthogonality or decorrelation, while the values between them indicate intermediate similarity or dissimilarity.

Another method is the method considering the probability of finding the correct control point. This probability can be provided by the recognition library, and it indicates the level of “confidence” that the joint is at a certain point and not at some other point. Sometimes we know exactly where the joint is, for example, if we can see it clearly; in other cases, we have very low confidence, for example, if the joint is cut or closed. Pre-filtering the image [11] can improve these values, but only in some cases. If we ignore these reliability metrics, we lose valuable information about our data, and can place much more weight and importance on those we are not sure about.

To use this information, researchers from Google George Papandreou and Tyler Zhu have developed a formula that considers the value of the reliability of the definition of a key point [14]:

$$D(F, G) = \frac{1}{\sum_{k=1}^n F_{c_k}} \times \sum_{k=1}^n F_{c_k} \times |F_{xy_k} - G_{xy_k}|. \quad (5)$$

In the above formula G and F are two vectors of poses compared after L2 normalization, n is the number of defined control points, F_{c_k} is the value of the probability of finding the correct joint for the element number k of the vector F , F_{xy} and G_{xy} – x and y positions of the k -th key point for of each vector.

The third method [15] of comparison does not require prior normalization of coordinates, but the vector is built on a different principle. For every three anatomically connected points, the cosine of the angle between the obtained parts of the body by formula (1.8) is calculated. The difference from the cosine similarity used in the first method is that in this case a value is obtained for a two-

dimensional vector describing the position of the two limbs relative to each other.

3 MATERIALS AND METHODS

Based on the literature analysis, it was decided to use the BlazePose library for further research.

To perform the study, a Javascript script must be implemented, which defines poses from images using the BlazePose library and stores the obtained data in the MongoDB database. This database was chosen solely for ease of use to store non-relational data.

The next step is to implement the comparison methods described in the previous section and obtain comparison results. Each of the proposed methods compares all poses defined by a single library configuration. So, if we have 50 images and 3 library configurations, we have 150 defined poses, 50 for each configuration. With each of the three comparison methods, we compare 50 poses defined by one configuration. As a result of each comparison, an entry should be made in the database of compared poses, the method of determining poses, the method of comparing poses and the result, which is the value of the distance between two poses and takes a value from 0 to 1, where the smaller the value.

The last step is to calculate the F1 index [16]. The results obtained from the previous stage are grouped by the values of the configuration and the method of comparison. Poses are considered the same if the value obtained by comparison is less than the threshold value. Values from 0.05 to 0.40 with a step of 0.05 are taken as thresholds. An F1 index is calculated for each threshold value and for each group of comparison results.

Therefore, for each configuration of the pose determination method and for each pose comparison method, 8 values will be obtained that reflect the average correctness of determining whether the poses are the same or not for the 8 similarity thresholds.

Based on the results obtained, it will be possible to draw conclusions about which of the following methods of comparing poses provides greater accuracy. You can also evaluate which of the configurations of the BlazePose library provides a better quality of determining the pose for comparison, as well as determine the speed of its operation in different configurations.

The expected result is a recommendation on the configuration of the BlazePose library and the method of comparing poses, which will be the optimal context for the implementation of the system for comparing poses on streaming video in real time.

4 EXPERIMENTS

BlazePose can flexibly configure the model, which affects the speed and accuracy of its operation. It also includes 2 different runtimes: TensorFlow.js and MediaPipe, the first of which provides the flexibility and wider adoption of JavaScript, optimized for several backends including WebGL (GPU), WASM (CPU), and Node. MediaPipe capitalizes on WASM with GPU

accelerated processing and provides faster out-of-the-box inference speed. When analyzing the comparison methods, different network configurations were used to obtain a description of the pose from the image.

In particular, the network architecture, the model has the following settings. Input resolution refers to the size of the image fed into the model for pose estimation. The default input resolution is 257x257, but this can be changed to lower or higher resolutions. The higher the resolution, the more accurate the pose estimate will be, but also slower to process. The lower the resolution, the faster the processing time but with lower accuracy. The minimum confidence score sets the threshold for accepting a predicted joint. A higher minimum confidence score will result in fewer, but more accurate joints, while a lower score will result in more, but less accurate joints. The confidence score is a value between 0 and 1, where 1 indicates high confidence and 0 indicates low confidence. Pose smoothing refers to the process of filtering the output of the model over time to produce a smoother, more stable result. The smoothing factor can be adjusted to control the amount of smoothing applied. A higher smoothing factor will produce a smoother result but may introduce a delay in the output. A lower smoothing factor will produce a more responsive output but may result in a less stable result. Also, BlazePose supports several different models -Lite, Full and Heavy, each with different accuracy and speed trade-offs.

It is necessary to investigate the difference in the definition of poses in the comparison and the difference in the speed of the network at different settings.

When comparing poses, methods are used to determine the distance between the vectors. Only the methods of vector construction and methods of calculating the distance differ. 3 methods were used for the study: cosine distance, weighted distance and distance at calculated angles. In the implementation of the first two methods, the vectors are built from the values of the coordinates for each key point on the human body. First, the coordinates are listed so that the starting point of the coordinates is not from the edge of the image, but from the edge of the rectangle surrounding the human body. The next step is L2 vector normalization. The distance between the obtained vectors will characterize the similarity of the poses in the image. The weighted distance method also considers the value of confidence, which indicates the accuracy of the obtained prediction of the position of the key point.

The analysis is performed according to the following algorithm: we obtain descriptions of poses using a neural network in different configurations, we obtain normalized vectors that are compared with each other using both comparison methods, the results are stored and used to calculate the F1-index. This indicator is calculated at different threshold values of the distance between the vectors: from 0.05 to 0.40 in steps of 0.05.

During the experiment, data on the processing speed and loading of these models were also collected. The

calculations are performed on a 3.2 GHz AMD Ryzen 7 processor, Nvidia GTX 1060 and 32GB of RAM.

5 RESULTS

The results of the study of the recognition speed collected during the study of the methods of comparison of poses are shown in Table 2. The results are given for such indicators as network load time and the average FPS during the process of poses determination. Studies of both speed and comparison methods were performed for each of the architectures with optimizations for speed and quality. As a result, the quality of work of four configurations of the library was analyzed.

The results clearly reflect that the performance of BlazePose can be greatly influenced by the hardware it is run on, such as the GPU or CPU. When running BlazePose on a GPU (MediaPipe Runtime), the computation is accelerated by the GPU's parallel processing capabilities. This allows for real-time processing of the input video frames, making it faster than running the same model on a CPU. At the same time, the load speed is the same, since the size of the model for different runtimes is also almost the same and does not affect this parameter.

Table 2 – The results of the study of the BlazePose model speed for different runtimes and configurations

	MediaPipe Runtime		TensorFlow.js Runtime	
	High quality	High speed	High quality	High speed
Load	4.82 c	1.91 c	4.82 c	1.91 c
FPS	113	135	38	65

It should be noted that the average values are given, but during the study of the results it was found that the difference in the speed of recognition of different poses can reach 100%.

Table 3 shows the results of the comparison of poses grouped by library configurations for determining poses and methods of determination. The symbols CA, AD and WD indicate the results for the methods of comparing the cosine distance, the distance at the calculated angles and the weighted distance, respectively.

The results of comparing the speed of algorithms were not collected for reasons of expediency. The complexity of O-notation algorithms [17] is constant and the same for all three methods.

Among the methods of comparing poses, the best result was demonstrated by the method of weighted distances. This is because when comparing poses, more weight is given to points that have been detected with greater accuracy and thus the overall pose is compared more correctly, while the value of the details is leveled.

The main disadvantages of this approach to comparing poses are that the result directly depends on the shooting

angle. Thus, the same poses may look different and vice versa at different camera positions. In order to reduce the impact of the angle, it is necessary to build three-dimensional models of poses and compare them. However, this method takes much longer and the accuracy of construction of three-dimensional models of poses on a two-dimensional image is much lower.

6 DISCUSSION

Studies have shown that when comparing poses, the quality of determining poses is of the greatest importance. However, the higher the recognition quality, the lower the speed, and high-speed video recognition is required.

Due to the use of modern methods of determining the pose, it is possible to implement such a project for poses with low detail, ie for those where significant differences from the original.

The best option in terms of speed and quality of determination in the study was the configuration of the BlazePose model, based on the MediaPipe runtime optimized for faster execution. BlazePose is optimized for speed and can run at over 100 fps on modern GPUs, making it well-suited for real-time applications. This library has been shown to achieve state-of-the-art performance on various benchmark datasets, including COCO and MPII. It can accurately detect keypoints even in challenging scenarios, such as when people are occluded or when they have similar poses. It's worth noting that the accuracy and performance of BlazePose can be influenced by several factors, such as the quality of the input data and the specific use case.

Among the methods of comparing poses, the best result was demonstrated by the method of weighted distances. This is due to the fact that when comparing poses, more weight is given to points that have been detected with greater accuracy and thus the overall pose is compared more correctly, while the value of the details is leveled.

The main disadvantages of this approach to comparing poses is that the result directly depends on the shooting angle. Therefore, the same poses may look different and vice versa at different camera positions. In order to reduce the impact of the angle, it is necessary to build three-dimensional models of poses and compare them.

Cameras with depth sensors can solve this problem. This solution is used in Microsoft Kinect technology [18]. A promising solution used by Apple in new mobile devices is the Lidar sensor [19]. By combining lidar data with BlazePose, it is possible to perform 3D human pose estimation, which can provide more information about the position and orientation of people in space.

Table 3 – The results of the comparison of poses grouped by library runtimes and configurations for determining poses and methods of determination

	MediaPipe Runtime						TensorFlow.js Runtime					
	High quality			High speed			High quality			High speed		
	CD	AD	WD	CD	AD	WD	CD	AD	WD	CD	AD	WD
$F_1^{0.05}$	52.467	57.845	67.638	53.922	51.504	51.363	0	13.42	20.815	13.516	13.221	14.706
$F_1^{0.10}$	58.492	63.02	65.102	61.788	57.831	65.637	0	26.07	31.74	23.871	23.166	25.08
$F_1^{0.15}$	59.278	63.63	67.918	68.172	66.6	71.136	36.548	37.73	40.94	29.103	31.707	35.112
$F_1^{0.20}$	63.809	64.895	74.546	69.54	67.155	73.242	34.184	39.38	42.32	31.283	38.844	42.636
$F_1^{0.25}$	64.307	65.47	74.916	70.908	69.264	74.997	36.96	37.51	38.41	32.7	38.727	42.294
$F_1^{0.30}$	63.274	64.63	68.36	68.856	67.488	70.083	36.984	35.2	35.88	34.117	38.025	40.584
$F_1^{0.35}$	58.85	64.595	59.622	58.938	59.052	60.255	33.96	33.66	33.235	34.226	33.93	39.672
$F_1^{0.40}$	52.751	58.615	54.15	51.186	54.834	53.118	33.288	33.11	30.935	32.264	32.877	36.822

However, it's worth noting that lidar data can be more challenging to work with than traditional 2D image data. The data can be noisy and is often sparser, which can make it more difficult to accurately estimate 3D poses. Additionally, lidar data is typically collected from a different perspective than the cameras used by BlazePose, which can make it challenging to align the two data sources and estimate poses accurately.

CONCLUSIONS

As a result of the study, the existing methods of determining the poses in the image were analyzed in the context of developing a system for determining the correctness of the exercises in real time and created a comparative description of the methods of comparing poses.

An analysis of existing libraries for determining human body position in open-source images revealed that they have fairly similar values in terms of definition quality, but the BlazePose library has significant advantages in terms of its implementation in the system due to the wide support of programming languages.

Among the methods of comparing poses, the method of weighted distances showed the best results because it takes into account the value of the accuracy of determining the key point and when comparing gives more weight to those points that are found with greater accuracy.

In researching the capabilities of the BlazePose library, it was determined that the best results in terms of speed and quality of determination are provided by the library configuration based on the runtime of the neural network MediaPipe with optimization towards speed. BlazePose is optimized for real-time performance and can run at over 100 frames per second (fps) on modern GPUs, making it well-suited for applications that require fast and accurate human pose estimation.

In addition, BlazePose is designed to handle multiple people in an image or video, making it well-suited for scenarios where people are moving quickly and near each other.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is carried out in the framework of the scientific directions of the Software Engineering department, the research laboratory "Information Technologies in Learning and Computer Vision Systems" of the Kharkiv National University of Radio Electronics with the support of scientists from the Technical University of Applied Sciences Wildau and the Volkswagen Foundation.

REFERENCES

1. Zhipeng Z., Dong X., Shijie H. A Survey of Body Pose Estimation: Recent Advances and Future Prospects, *Journal of Imaging*, 2021, Vol. 7, No. 3, pp. 1–31. DOI: 10.3390/jimaging7030045
2. Shcherbakova G. Y., Krylov V. N., Bilous N. V. Methods of automated classification based on wavelet-transform for automated medical diagnostics, *2015 Information Technologies in Innovation Business Conference (ITIB)*. Kharkiv, Ukraine, 7–9 October 2015, [S. l.], 2015. DOI: 10.1109/itib.2015.7355048
3. Rakova A. O., Bilous N. V. Research on Methods for Development of Software System for Face Orientation Vector Determining in the Image, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 3(54), pp. 121–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-11
4. Shih-En W. Convolutional Pose Machines, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. [S. l.], 2016. DOI: 10.1109/cvpr.2016.511
5. Kendall A. PoseNet: A Convolutional Network for Real-Time 6-DOF Camera Relocalization [Electronic resource] / Alex Kendall, Matthew Grimes, Roberto Cipolla // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 7–13 December 2015. – [S. l.], 2015. DOI: 10.1109/iccv.2015.336
6. Tsung-Yi L. Microsoft COCO: Common Objects in Context, *Computer Vision – ECCV 2014*. Cham, 2014, pp. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
7. Yang Y., Ramanan D. Articulated Human Detection with Flexible Mixtures of Parts, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2013, Vol. 35, No. 12, pp. 2878–2890. DOI: 10.1109/tpami.2012.261

8. Cao Z. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, P. 1. DOI: 10.1109/tpami.2019.2929257
9. Ge L. Real-Time 3D Hand Pose Estimation with 3D Convolutional Neural Networks, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2019, Vol. 41, No. 4, pp. 956–970. DOI: 10.1109/tpami.2018.2827052
10. Liu Y. OpenPose-Based Yoga Pose Classification Using Convolutional Neural Network, *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2022, Vol. 23, pp. 72–76. DOI: 10.54097/hset.v23i.3130
11. Bilous N. V., Krasov A. I., Vlasenko V. P. Deletion method of image low-frequency components using fast median filter algorithm, *Journal of Engineering Sciences*, 2016, pp. 7–14. DOI: 10.21272/jes
12. Bazarevsky V., Grishchenko I., Raveendran K. BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking, *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2020, P. 4. DOI: 10.48550/arXiv.2006.10204
13. Yu L., Gao Xiao-Shan Improve Robustness and Accuracy of Deep Neural Network with L2 Normalization, *Journal of Systems Science and Complexity*, 2022, pp. 1–26. DOI: 10.1007/s11424-022-1326-y
14. Friedhoff J. Move Mirror: An AI Experiment with Pose Estimation in the Browser using TensorFlow.js [Electronic resource]. Mode of access: <https://blog.tensorflow.org/2018/07/move-mirror-ai-experiment-with-pose-estimation-tensorflow-js.html> (date of access: 18.04.2023). Title from screen.
15. Borkar P. K., Pulinthitha M. M., Pansare A. Match Pose – A System for Comparing Poses, *International journal of engineering research & technology*, 2019, P. 3. DOI: 10.17577/IJERTV8IS100253
16. Dembczyński K., Waegeman W., Cheng W., Hüllermeier E. An exact algorithm for F-measure maximization, *Neural Information Processing Systems*, 2011, P. 9.
17. Rutanen K. O-notation in algorithm analysis. *Data Structures and Algorithms*, 2022, P. 216. DOI: 10.48550/arXiv.1309.3210
18. Malmir B. Exploratory studies of Human Gait Changes using Depth Cameras and Sample Entropy [Electronic resource] : thesis. [S. l.], 2018. Mode of access: <http://hdl.handle.net/2097/38949> (date of access: 18.04.2023). – Title from screen.
19. Bijelic M., Gruber T., Ritter W. A Benchmark for Lidar Sensors in Fog: Is Detection Breaking Down? *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. Changshu, 26–30 June 2018, [S. l.], 2018. DOI: 10.1109/ivs.2018.8500543

Received 14.04.2023.
Accepted 24.05.2023.

УДК 004.93

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПОРІВНЯННЯ ПОЛОЖЕНЬ ТІЛА НА ПОТОКОВОМУ ВІДЕО

Білоус Н. В. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Агемян І. А. – старший викладач кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Калугін В. В. – магістр кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Однією з задач комп'ютерного зору є задача визначення тіла людини на зображенні. Існує багато методів вирішення цієї задачі, деякі базуються на специфічному обладнанні (motion capture, kinect) та надають найбільшу точність, деякі дають меншу точність, але не потребують додаткового обладнання та використовують меншу обчислювальну потужність. Але зазвичай таке обладнання має високу вартість, тож щоб забезпечити низьку вартість розробок створених для визначення тіла на зображенні, слід розробляти алгоритми за бази технологій комп'ютерного зору. Ці алгоритми можна застосовувати до різних областей для аналізу та порівняння положень тіла та досягнення різноманітних цілей.

Мета. Метою роботи є дослідження ефективності роботи існуючих бібліотек для визначення пози людини на зображенні а також методів порівняння отриманих поз з точки зору швидкості та точності визначення.

Методи. Дослідження проводяться в контексті розробки системи визначення правильності виконання фізичних вправ користувачем у режимі реального часу. Бібліотеки OpenPose, PoseNet і BlazePose були проаналізовані на предмет їх придатності для розпізнавання та відстеження частин тіла та рухів на відео у реальному часі. Переваги та недоліки кожної бібліотеки були оцінені на основі їх продуктивності, точності та обчислювальної ефективності. Крім того, були проаналізовані різні алгоритми порівняння поз. Ефективність кожного алгоритму оцінювалася на основі їх здатності точно визначати та порівнювати положення тіла.

У результаті поєднання BlazePose і методу зваженої відстані можна досягти найкращої продуктивності в розпізнаванні пози з високою точністю та надійністю в ряді складних сценаріїв. Метод зваженої відстані можна додатково вдосконалити за допомогою таких методів, як нормалізація L2 і вирівнювання пози для підвищення його точності та узагальнення. Загалом поєднання бібліотеки BlazePose та методів зваженої відстані пропонує потужне та ефективне рішення для розпізнавання пози з високим індексом F1.

Результати. Існуючі моделі визначення поз показали схожі результати якості визначення з розбігом близько 2%. При розробці крос-платформного програмного продукту значну перевагу в швидкості має бібліотека BlazePose, що має API для роботи безпосередньо в браузері та на мобільних платформах. Крім того, оскільки бібліотека використовує розширену топологію з 33 ключовими точками, вона може бути застосована для ширшого списку завдань. При дослідженні методів порівняння найбільший вплив на результати справила якість визначення пози.

Висновки. Серед методів порівняння найкращі результати продемонстрував метод зважених дистанцій. Швидкість визначення поз обернено пропорційна якості визначення і значно перевищує рекомендоване значення – 40мс.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комп'ютерний зір, положення тіла, ключові точки, визначення поз, порівняння поз, blazepose, mediapipe, tensorflow.

ЛІТЕРАТУРА

1. Zhipeng Z. A Survey of Body Pose Estimation: Recent Advances and Future Prospects / Zhang Zhipeng, Xu Dong, Hao Shijie // *Journal of Imaging*. – 2021. – Vol. 7, No. 3. – P. 1–31. DOI: 10.3390/jimaging7030045
2. Shcherbakova G. Y. Methods of automated classification based on wavelet-transform for automated medical diagnostics / G. Y. Shcherbakova, V. N. Krylov, N. V. Bilous // 2015 Information Technologies in Innovation Business Conference (ITIB), Kharkiv, Ukraine, 7–9 October 2015. – [S. l.], 2015. DOI: 10.1109/itib.2015.7355048
3. Rakova A. O. Research on Methods for Development of Software System for Face Orientation Vector Determining in the Image / A. O. Rakova, N. V. Bilous // *Radio Electronics, Computer Science, Control* – 2020. – No. 3(54). – P. 121–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-3-11
4. Shih-En W. Convolutional Pose Machines / Wei Shih-En // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016. – [S. l.], 2016. DOI: 10.1109/cvpr.2016.511
5. Kendall A. PoseNet: A Convolutional Network for Real-Time 6-DOF Camera Relocalization [Electronic resource] / Alex Kendall, Matthew Grimes, Roberto Cipolla // 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 7–13 December 2015. – [S. l.], 2015. DOI: 10.1109/iccv.2015.336
6. Tsung-Yi L. Microsoft COCO: Common Objects in Context / Lin Tsung-Yi // *Computer Vision – ECCV 2014*. – Cham, 2014. – P. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1_48
7. Yang Y. Articulated Human Detection with Flexible Mixtures of Parts / Y. Yang, D. Ramanan // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2013. – Vol. 35, No. 12. – P. 2878–2890. DOI: 10.1109/tpami.2012.261
8. Cao Z. OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields / Z. Cao // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2019. – P. 1. DOI: 10.1109/tpami.2019.2929257
9. Ge L. Real-Time 3D Hand Pose Estimation with 3D Convolutional Neural Networks / L. Ge // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2019. – Vol. 41, No. 4. – P. 956–970. DOI: 10.1109/tpami.2018.2827052
10. Liu Y. OpenPose-Based Yoga Pose Classification Using Convolutional Neural Network / Yuchen Liu // *Highlights in Science, Engineering and Technology*. – 2022. – Vol. 23. – P. 72–76. DOI: 10.54097/hset.v23i.3130
11. Bilous N. V. Deletion method of image low-frequency components using fast median filter algorithm / N. V. Bilous, A. I. Krasov, V. P. Vlasenko // *Journal of Engineering Sciences* – 2016. – P. 7–14. DOI: 10.21272/jes
12. Bazarevsky V. BlazePose: On-device Real-time Body Pose tracking / V. Bazarevsky, I. Grishchenko, K. Raveendran // *Computer Vision and Pattern Recognition* – 2020. – P. 4. DOI: 10.48550/arXiv.2006.10204
13. Yu L. Improve Robustness and Accuracy of Deep Neural Network with L2 Normalization / Lijia Yu, Xiao-Shan Gao // *Journal of Systems Science and Complexity*. – 2022. – P. 1–26. DOI: 10.1007/s11424-022-1326-y
14. Friedhoff J. Move Mirror: An AI Experiment with Pose Estimation in the Browser using TensorFlow.js [Electronic resource] / J. Friedhoff. – Mode of access: <https://blog.tensorflow.org/2018/07/move-mirror-ai-experiment-with-pose-estimation-tensorflow-js.html> (date of access: 18.04.2023). – Title from screen.
15. Borkar P. K. Match Pose – A System for Comparing Poses / P. K. Borkar, M. M. Pulinthitha, A. Pansare // *International journal of engineering research & technology*. – 2019. – P. 3. DOI: 10.17577/IJERTV8IS100253
16. An exact algorithm for F-measure maximization / [K. Dembczyński, W. Waegeman, W. Cheng, E. Hüllermeier] // *Neural Information Processing Systems*. – 2011. – P. 9.
17. Rutanen K. O-notation in algorithm analysis / K. Rutanen // *Data Structures and Algorithms*. – 2022. – P. 216. DOI: 10.48550/arXiv.1309.3210
18. Malmir B. Exploratory studies of Human Gait Changes using Depth Cameras and Sample Entropy [Electronic resource] : thesis / Malmir Behnam. – [S. l.], 2018. – Mode of access: <http://hdl.handle.net/2097/38949> (date of access: 18.04.2023). – Title from screen.
19. Bijelic M. A Benchmark for Lidar Sensors in Fog: Is Detection Breaking Down? / Mario Bijelic, Tobias Gruber, Werner Ritter // 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), Changshu, 26–30 June 2018. – [S. l.], 2018. – DOI: 10.1109/ivs.2018.8500543

INTELLIGENCE ANALYSIS OF EMPIRICAL DATA BASED ON TIME SERIES

Ivanets O. B. – PhD, Associate Professor, Department of Electronics, Robotics, Monitoring Technology and the Internet of Things, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Khrashchevskiy R. V. – Dr. Sc., Professor, Department of Aerodynamics and Flight Safety, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Kulik M. S. – Dr. Sc., Professor, Head of the Aerospace Faculty, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Burichenko M. Yu. – PhD, Associate Professor, Department of Biocybernetics and Aerospace Medicine, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of intelligent data analysis for assessing the stability of operators' functioning as a component of safety management is considered. The object of the study was to verify estimates of the complexity and chaotic nature of physiological processes based on nonlinear dynamics methods.

Objective. The goal of work is intelligent data analysis for assessing the stability of the functioning of a dynamic system based on the methods of non-linear dynamics.

Method. Data intelligence to obtain additional useful information to avoid wrong decisions when deciding on the current state of the operator to be able to perform professional duties. Quantitative assessment of the complexity of physiological dynamics to determine the stability of feedback control processes of body subsystems and their constant adaptation to changes in environmental conditions. The presence of significant nonlinearities in the biomedical signals of the body is associated with the appearance of a chaotic component that describes the chaotic nature of the body's processes. Due to the fact that biomedical signals have both a periodic and a chaotic component, the study of the latter makes it possible to determine the informational component of the nature of the internal organization of the organism and provide information about the possible destabilization of the functional state of the operator. The use of nonlinear dynamics methods to study changes in the operator's body and provide additional independent prognostic information complementing traditional data analysis in the time and frequency domains. Several indices obtained by the methods of nonlinear dynamics are proposed, which contribute to the expansion of the diagnostic solution based on the available data.

Results. The results of the study can be used during the construction of mathematical methods of non-linear dynamics to describe empirical data of this kind.

Conclusions. Experimental studies have suggested recommending the use of non-linear methods dynamics as an additional independent component that allows analyzing the chaotic component of biomedical signals to avoid wrong decisions during professional selection and assessment of the current state of aviation industry operators as one of the causes of adverse events in aviation. Prospects for further research may include the creation of a methodology based on nonlinear dynamics methods that will allow to increase the reliability of predicting a malfunction of the cardiovascular system as an indicator of a change in the balance of the functional state of the operator based on additional informative parameters, which can be used to assess triggers that may cause an adverse event in aviation, as well as an experimental study of the proposed mathematical approaches for a wide range of diagnostic problems.

KEYWORDS: methods of non-linear dynamics, entropy, MATLAB, RR-interval, operator, Hausdorff dimension, highest Lyapunov exponent, attractor.

ABBREVIATIONS

ApEn is an Approximate Entropy;
ECG is an Electrocardiograms;
EEG is an Electroencephalograms;
HRV is a Heart rate variability;
LF is a Low Frequency;
NLD is a Nonlinear dynamics;
SampEn is a Sample Entropy;
SD is a Standard Deviation;
SRM is a Safety risk management;
SRP is a Safety risk portfolio.

NOMENCLATURE

v is a vector function of given smoothness r ;
 M is phase space of system;
 R^n is an area of some set;
 $F^t(x)$ is a smooth function defined for values t ;

Ω is the Poincare mapping;
 Ψ is a global secant the flow F^t ;
 E is a secant surface that the cycle intersects at the point p ;
 U is a neighborhood of a compact subset A ;
 A is a compact subset of the phase space M ;
 $N(\delta)$ is a number of cells of size δ covering the curve;
 λ is a highest Lyapunov exponent;
 H_D is a Hausdorff dimension;
 $\delta(t)$ is a distance between two states of the system;
 $x(t)$ is a time series;
 x is a realization of all observations;
 $x(i)$ is an all readings of x realization;
 ε is a near trajectories;
 τ is a time interval after the start of the comparison;
 $S(t)$ is a steepness of the curve on the linear section which determines the Lyapunov exponent λ ;

R is an absolute range function;
 $B_H(t)$ is a fractal Gaussian function;
 S is a positive constant;
 t_1, t_2 are counts at time points 1 and 2;
 $\xi(t)$ is an existing time series;
 $\langle \xi(t) \rangle$ is an average value.

INTRODUCTION

The results of the analysis of the flight safety risk portfolio (Safety risk portfolio – (SRP)), for the period from 2016 to 2020, and the results of statistical and analytical processing of flight safety data using the web portal <https://rmd.avia.gov.ua/> determine the connection between heart diseases as flight safety problems and key areas of risk in aviation and demonstrate their contribution to the occurrence relevant (potential) dangerous consequences in aviation. In addition, the analysis of the current functional state based on the biomedical signals of the heart (electrocardiogram, heart rate, heart rate variability) allows to make a decision regarding the stability of the balance of the entire body of the aviation operator and, as a result, to determine the probability of erroneous decisions in the professional field. That is, to determine the accompanying factors that can cause aviation events. Therefore, extracting reliable information about the state of the cardiovascular system as an indicator of stability (homeostasis) of the operator's entire body is an urgent task for the intellectual analysis of biomedical data.

The object of study is the process of analysis of heart rate variability (HRV) by methods of non-linear dynamics to improve the reliability of the assessment of the nature of the activity of all systems of the body.

The analysis of complex HRV signals leads to the need to quantify the complexity of physiological dynamics using various indicators that take into account nonlinearity, time irreversibility, fractality and long-term correlations.

The subject of study is the process of evaluation of additional information indicators, what is taken by methods of non-linear dynamics that can be used to predict changes in the functional state of the operator as one of the triggers of an adverse event in the safety risk management (SRM) of aviation.

For this reason, the main task of the study is the analysis of stability, the study of the role of invariant manifolds, the analysis of the geometric structure of trajectories of attractors, the search for invariant measures, and the calculation of invariant characteristics. Although this approach does not make it possible to represent the solution in an explicit form, it allows us to qualitatively describe many important features of the cardiovascular system as an indicator of the dynamism of the whole organism, including randomness.

Due to the variability, unpredictability and instability of the object from which the information indicators are obtained, there are many factors influencing the reliability

decision-making about the functional state of the operator's body and can lead to incorrect conclusions and false extrapolations. This is due to the fact that such information indicators have structural features and therefore cannot be adequately described by standard methods, because different subsystems of the body as control loops operate in a complex relationship with feedback for constant adaptation of the entire system to changing external influences. The subject of the study is the process analysis HRV by methods non-linear dynamics with non-standard approaches to the data quantification of empirical data.

Intelligent data analysis involves obtaining reliable information about a complex system with stochastic influence. Such a complex system is the organism of the operator, which is under the influence of external destabilizing factors when performing his professional duties. Empirical data obtained from a biological object, on the basis of which such an analysis can be carried out, possible presented using time series [1].

Such a presentation allows, in addition to quantitative values of medical and biological parameters, to obtain additional information about dynamic changes in the state of the system at different time intervals. Moreover, the time during which these empirical data were obtained also has an informational component. Most medical and biological parameters such as ECG, electromyograms, HRV, EEG characterize both linear physiological processes and have a component that describes certain non-linear processes in the body as the body's reaction to external destabilizing influences. While the linear component of the system, with a certain reliability, is described by classic methods of intellectual analysis, nonlinear processes in the body are described and investigated insufficiently [1, 2].

The purpose of the work is to increase the hang the reliability of the use of mathematical methods to describe the functional state change of the operator using transformation information indicator in decision-making system.

1 PROBLEM STATEMENT

At present, to study the properties of complex systems, including in experimental studies, the approach is widely used, based on the analysis of the signals generated by the system. This is especially relevant in cases where it is practically impossible to describe the process under study mathematically, but researchers have at their disposal is some characteristic observable quantity. Analysis of this approach constitutes the content of this article.

Therefore, in the presented work, as an example, the formalization of the theory of chaotic dynamic systems for the analysis of the stability of the functional state of a biological object is presented.

Since the time of A. Poincaré, it has become clear that when studying complex behavior, the usual approach such as analytical calculations of individual trajectories of differential equations does not work. For this reason, the main task of the theory is the study of stability, the study

of the role of invariant manifolds, the analysis of the geometric trajectory structures, search for invariant measures, calculation of invariant characteristics, etc. Although this approach does not make it possible to represent the solution in an explicit form, it allows us to qualitatively describe many important features of dynamical systems, including randomness. If there is a set of ordinary differential equations:

$$\dot{x} = v(x, a),$$

where $x(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ – set of dynamic variables, t is time, $v = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ is a vector function of given smoothness r (that is, of class C^r) defined in some domain $M \subseteq R^n$, $v: M \rightarrow R^n$, a is some parameter (or their combination) and M is phase space of system (1).

The function v generates a flow $F^t: M \rightarrow R^n$, where $F^t(x)$ is a smooth function defined for values t from the interval $T \subseteq R$, such that for all $x \in M$ and $\tau \in T$:

$$\left. \frac{d}{dt} F^t \right|_{t=\tau} = v(F^\tau(x)).$$

The flow F^t is sometimes called a shift transformation because it takes the system from the state it was in at the initial time to the state at any other time. It is easy to understand that F^s with $s=-t$ has an inverse function of the same smoothness C^r , i.e. the system is time reversible.

Geometrically, the system of equations (1) can be interpreted as a vector field that associates each point $x \in M$ with the vector v . Then the solution $x(t) = F^t(x(0))$ is a certain curve, which at every point is tangent to this vector field. If the initial state $x(0) = x_0 \in D$ is given system (1), then $F^t(x_0): T \rightarrow R^n$ defines the phase trajectory or phase curve of the original differential equation (1). In some cases, the flow F^t admits a global secant Ω , i.e. a hypersurface of dimension $n-1$, which the phase trajectories intersect transversally. Then the study of the behavior of the original system can be reduced to the analysis of the mapping $\Omega: \Psi \rightarrow \Psi$, which is the Poincaré mapping.

When analyzing dynamical systems, it is also necessary to take into account limit cycles-closed phase trajectories corresponding to the periodic behavior of the system. If $\gamma = x(t)$ is a limit cycle and E is a secant surface that the cycle intersects at the point p . The attractor as a compact subset A of the phase space M satisfies the following conditions: A is invariant with respect to the flow of the dynamical system; there is a neighborhood U that shrinks to A under the action of the flow. If we choose some neighborhood $U \subset E$ of this point and consider the first return of the trajectory that left the point $q \in U$ close to p . Then we can define the Poincaré map $\Omega: U \rightarrow E$ that sends the point q to the point $q' = \Omega(q)$ on the surface E .

The main property of dissipative systems is the compression of the phase volume: over time, according to the dynamic equation, the initial volume occupied by the cloud of phase points decreases. Formally, this is expressed as the inequality $\text{div } v < 0$. In this case, as $t \rightarrow \infty$, all phase trajectories will converge to some subset $A \subset M$
© Ivanets O. B., Khrashchevskiy R. V., Kulyk M. S., Burichenko M. Yu., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-7

of zero (in phase space) volume, which is an attractor of a dynamical system and makes it possible to estimate the stability of its behavior. That is, for a given selection x , it is necessary to construct an attractor of a dynamic system and, simultaneously with the analysis of a cloud of phase points, obtain quantitative characteristics using methods of nonlinear dynamics to confirm the conclusions about the stability of the system.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The nonlinear phenomenon is one of the reasons for the variability of medical and biological parameters, the HRV in particular [3]. If the studies of the twentieth century were devoted to the description of a biological system as a linear one for which a pathological process can be determined with a certain reliability due to comparison with the generally accepted norm – the approach of normology [4, 5]. Thus, employees of the Kyiv Research Institute of Medical Problems of Physical Culture and Sports of the Ministry of Health of Ukraine (1968–1986) worked fruitfully in the direction of studying the state of the body of a practically healthy person, forming a scientific school that is actively working today [6, 7].

At the beginning of the twenty-first century, more and more studies prove the need to study the nonlinear component of biological processes [8, 9] to obtain, firstly, additional information about the transformation of biological processes due to reverse biological connections, to ensure the balance of functioning of the organism [10]. Secondly, they provide information about a sufficient number of internal resources to ensure physiological balance under the influence of destabilizing factors [11, 12]. Thirdly, it is a valuable tool for analyzing the medical and biological indicators of population groups that have already undergone professional selection and their medical and biological parameters are within the normal range, but professional destabilizing factors can deplete the resources available in the body, and for their effective use, non-standard approaches to assessment are required the level of regulation of the stability of the organism's functioning, taking into account their chaotic nature [13, 14].

In the paper, processing by methods of non-linear dynamics (NLD) of HRV, presented in the form of time series, is proposed to obtain visualization of chaotic processes in the body and carry out calculations of the main indicators: estimation of Hausdorff dimension, Hurst's exponent, highest Lyapunov's exponent, sample entropy and approximate entropy. To present the results used Poincaré maps, graphs of the attractor on a small number measurements, singular schedule and trajectories of attractors. Conducting a comparative analysis of the obtained results allows for the development of a complex approach for intelligent data analysis, which can be used to analyze the stability of adaptation processes in the body of operators, the aviation industry, in particular, as one of the triggers for the occurrence of a dangerous event in aviation.

3 MATERIALS AND METHODS

As the analysis of literary sources proves, the analysis of nonlinear biological processes in the body is based on the presentation of empirical data in the n -dimensional space of states. Each of the states characterizes a change in the stability of functioning and the return of its work to a stable state due to biological feedback that characterizes the homeostasis of the organism. The axes in this space are variable states, the description of which changes over time is represented by electrical potentials: electrocardiograms, heart rate variability, electroencephalograms, etc.

The non-stationarity, non-linearity and complexity of the behavior of such data present difficulties in their formalization. Representation of such data as time series allows to evaluate the components of destabilizing factors affecting the stability of the functioning of the biological system. The difficulty in analyzing such time series is that they are traditionally considered as data of a stationary dynamic system, which may have irregular behavior due to its non-linearity. But physiological processes in the body must be considered as non-stationary processes, which necessitates the use of nonlinear dynamics methods for their analysis.

With such an approach, it is advisable to process the biological signal, HRV, in particular, on the basis of time series and divide them into time intervals during which the biological object is in stationary conditions. When using the methods of nonlinear dynamics to process time series, not their representation in the time domain is analyzed, but their vector representation in the phase space. The use of nonlinear dynamics methods allows obtaining additional useful information about the dynamics of biological parameters, which describes the physiological variability of biological processes and allows us to draw a conclusion about the stability of the functioning of this system.

This can be done thanks to the understanding of the complexity of the functioning of the organism, which is associated with the interaction of different subsystems of the organism as separate control circuits that function in a single complex system [15]. Such complexity of the body's structure allows it to be adapted to physiological needs and requirements under the influence of external destabilizing factors [16]. The more complex the phase portrait of the time series, the greater the probability that it may be related to the organism's own variability and its constant adaptation to external factors.

Such complexity of the body's structure allows it to be adapted to physiological needs and requirements under the influence of external destabilizing factors [16]. The more complex the phase portrait of the time series, the greater the probability that it may be related to the organism's own variability and its constant adaptation to external factors [1].

This circumstance leads to the need for a quantitative assessment of the complexity of the dynamics of physiological processes in the body. Such an assessment can be performed using nonlinear dynamics methods using the quantitative assessment of the highest Lyapunov expo-
© Ivanets O. B., Khrashchevskiy R. V., Kulyk M. S., Burichenko M. Yu., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-7

nent, Hurst exponent, approximate and sample entropy. In connection with the fact that the cardiovascular system performs not only the functions of blood supply to the entire body, and serves as a generally accepted indicator of the stability of the functioning of the entire body, the indicators of which evaluate its adaptive capabilities. Therefore, time series of heart rate variability were chosen in the paper to assess the stability of the body's functioning. These series characterize the duration of RR-intervals in ms. Moreover, these time series were obtained from study participants who do not have clinical symptoms of diseases of the cardiovascular system, which made it possible to use them as a control group for determining the dynamics of chaotic pulsation.

In order to study the spectral nonlinear characteristics of the biomedical signal in the interpolation RR =interpl (time, RR, time, 'spline). That made it possible to project this signal (HRV) onto a uniform time grid with cubic spline interpolation. To study the finite set of HRV points, an attractor was built, which in the phase space allows you to study the phase trajectory of the signal. In the work, a so-called "strange" attractor with a complex geometric structure with a fractal structure was built [17].

To determine the dimension of the "strange" attractor, the Hausdorff dimension estimate was introduced in the work, which determines the dimension of subsets in the metric space:

$$H_D = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln(N(\delta))}{\ln(1/\delta)}.$$

In order to obtain quantitative characteristics of chaotic pulsation by methods of nonlinear dynamics, the highest Lyapunov exponent is calculated in the work, which determines the divergence of two initially close trajectories. To estimate the degree of chaoticity according to the highest Lyapunov exponent, it is necessary to consider two states of the biological system measured at the initial moment of time, and this distance changes over time. If the initial distance is:

$$|X_1(0) - X_2(0)| = \delta_0 \ll 1.$$

The change in distance over time t will be equal to:

$$\delta(t) = |X_1(t) - X_2(t)|.$$

The highest Lyapunov exponent is related to distance $\delta(t)$, by the following dependence:

$$\delta(t) = \delta_0 \exp(\lambda t).$$

Due to the fact that the biological object has chaotic behavior, the highest Lyapunov exponent is $\lambda > 0$.

At the same time, the degree of chaoticity of a biological system can be determined by the highest Lyapunov exponent according to the following principle: the larger the value of λ , the higher the chaoticity, lower values of λ characterize a certain determinism in the movement of such a system and this can be associated with complex

adaptive transformations in the organism. At the same time, the tendency of the Lyapunov exponent to zero means strict determinism.

While the tendency of λ to 0 characterizes the reduction of chaos in the biological system and the strict definition of the initial conditions of the functioning of the biological object and the definition of the state of the system. Using analytical methods, determining all Lyapunov exponents is quite a difficult task, which is connected with finding a complex analytical solution of a system of differential equations. Therefore, in the work, the authors used a fairly reliable numerical algorithm for estimating the highest Lyapunov exponent based on one implementation of the tracked process based on the speed λ of the distance change between two trajectories over time. Fixation of one reading of the time series $x(t)$ from the realization of all observations x in which all readings of this realization $x(i)$ for which the following condition is fulfilled:

$$|x(t) - x(i)| < \varepsilon,$$

is the beginnings of ε -near trajectories. Moreover, such readings are considered the beginnings of given trajectories, and the original and neighboring trajectories are formed by sequential recording of readings, starting with t and i , respectively.

In this case, the distance between adjacent trajectories can be defined as:

$$\text{dist}(x(t), x(i), \tau) = |x(t + \tau) - x(i + \tau)|.$$

But this distance has fluctuations, therefore the distance is averaged over all ε -near trajectories and over all counts $x(t)$ of the studied time series. To obtain a stable estimate of the highest Lyapunov exponent, after averaging, S is found, which is equal to:

$$S(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \text{dist}(x(t), x(i); \tau) \right). \quad (1)$$

Lyapunov exponent characterizes the chaotic pulsation of the studied signal as the degree of exponential divergence of two initially close trajectories.

To quantitatively assess the degree of long-term stability of processes in a biomedical signal, the authors used the Hurst index $H \in [0,1]$ to generalize the random function to the case of the fractal Gaussian function $B_H(t)$:

$$\langle \Delta B_H \rangle = \langle B_H(t) - B_H(t_0) \rangle = 0.$$

It follows from equation (1) that the variance of increments $S(t-t_0)$ can be written in the form:

$$S(t-t_0) = \langle [B_H(t) - B_H(t_0)] \rangle = \sigma^2 |t - t_0|.$$

If then $B_H(t)$ has a Gaussian distribution:

$$P(\Delta B_H t < \tau) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma(t_2-t_1)^H}} \int_{-\infty}^{\tau} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t^2}{\sigma(t_2-t_1)^H}\right)^2\right) dt.$$

To analyse the parameters of the cardiovascular system, the Hurst method is used [18]. For the existing time series $\xi(t)$, the average value $\langle \xi(t) \rangle$ on the time interval τ , which has the same dimension as time t , is calculated:

$$\langle \xi(\tau) \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(\tau).$$

The next stage: calculation of the dependence of the accumulated deviation $X(t, \tau)$ on the time interval (τ);

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^{\tau} \left\{ \xi(u) - \langle \xi(t) \rangle_{\tau} \right\}.$$

According to the accumulated deviation, the absolute range function R is calculated:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau).$$

The range depends on the length of the interval and can increase with its increase. The Hurst method is also referred to as the R/S method because it determines the dependence of the dimensionless function R/S on the length of the time interval τ and is calculated by the standard deviation S of the series $\xi(t)$:

$$s(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^{\tau} \left\{ \xi(u) - \langle \xi(t) \rangle_{\tau} \right\}^2}.$$

There is an empirical relationship between the normalized swing R/S and the length of the interval τ through the Hurst exponent according to the classical normalized swing method H :

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{\tau}{2}\right)^H,$$

H can take on values from 0 to 1.

When $H > 0.5$, the time series has a tendency to increase or decrease, and this is both the predicted trend and the one that was in the past. But $H < 0.5$ characterizes the tendency of the series to change the trend, that is, an increase can change with a decrease, and a decrease with an increase, respectively.

The last stage is the evaluation of the sample entropy and approximate entropy. Approximate Entropy/Sample Entropy (ApEn) is a simple measure of the overall complexity and predictability of time series. ApEn quantifies

the probability that time series patterns that are close will remain similar for subsequent incremental comparisons. High values of ApEn indicate high irregularity and complexity of the time series data. For healthy people, ApEn values range from about 1.0 to 1.2, for patients after a heart attack, ApEn values are about 1.2 [18]. The improved sample entropy method (SampEn) improves on ApEn and quantifies the conditional probability that two sequences of m -consecutive data points that are similar to each other (within a given tolerance r) will remain similar if one consecutive point is included [19].

The specified approach allows synthesizing the process of HRV processing by methods of nonlinear dynamics for evaluating the dynamics of information parameter transformation processes.

In the work, calculations of all the described stages were carried out in the MATLAB environment, which allows obtaining quantitative indicators for evaluating heart rate variability according to the following stages: Hausdorff variability, Lyapunov and Hurst indicators, approximation and sample entropy.

The described approach provides an improved assessment of time series and should be a useful tool in studies of the dynamics of the functioning of the cardiovascular system, and due to the comprehensive assessment of several parameters of nonlinear dynamics, they contribute to advanced decision-making regarding the stability of the functioning of the entire organism.

4 EXPERIMENTS

In the work, HRV time series were processed from the database of biomedical signals from the website Physionet.org [20]. The time series contained in this database is compiled from long-term time series of healthy volunteers. Holter recordings of participants without clinical symptoms of the disease who did not take medication were used to form this database. In the data of the study participants, the ECG was normal according to the criteria: the minimum nighttime rate is more than 60 beats per minute; night pauses – less than 3 seconds; ventricular extrasystoles – less than 100 in 24 hours, without bursts or polymorphism; supraventricular extrasystoles - less than 100 in 24 hours, without connections; lack of blocks or conduction disturbances. Biological signals were obtained using Holter monitoring by specialized recorders within 24 hours. The recorder data had a reading sampling frequency of 512 and 1024 Hz and a recording sampling frequency of 128 Hz. Signal analyses was performed using Galix and CardioScan software. Time series with artefacts over 8% were not included in the database, and those with artefacts longer than 20 s can be used as a control group to determine the stability of the functioning of the cardiovascular system.

5 RESULTS

To increase the accuracy of biomedical signal processing, it is necessary to remove possible artefacts of various natures. In the work, RR intervals whose duration exceeds the average value by more than two or three standard deviations are considered artefacts. Using the software code in the work, biological signals were cleaned of artefacts. A study of the dependence of the number of removed artefacts on the input parameters of the filter was conducted, the results are presented in Table 1.

Table 1 – Number of removed artifacts for some files

Files name	Parametr of window, k	The standard deviation threshold, ns	Number of artifacts, $N(a)$
RR002	3	2	503
	5	2	453
	7	2	471
	3	3	207
	5	3	142
	7	3	112
RR003	3	2	618
	5	2	468
	7	2	419
	3	3	447
	5	3	239
	7	3	175

To visualize the process of removing artifacts, Fig. 1 and Fig. 2 show signals R002 and R003 from the database from the website Physionet.org and signal data artifacts. Examples of the resulting graphs are shown in Fig. 1 and Fig. 2.

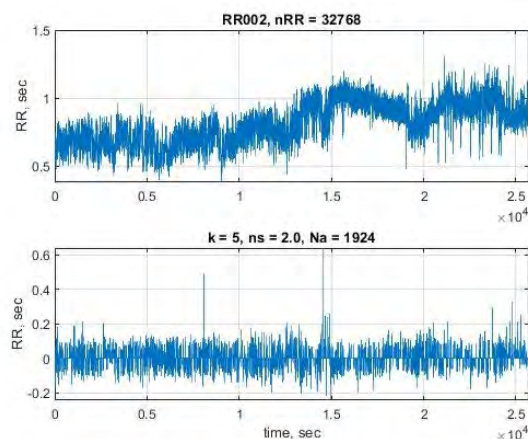


Figure 1 – Graphs of the RR002 signal and its artifacts

In the work, there were “strange” attractors for signals that are being used. Today, a “strange” attractor has acquired a collective meaning, using which the chaotic nature of the system under study is emphasized.

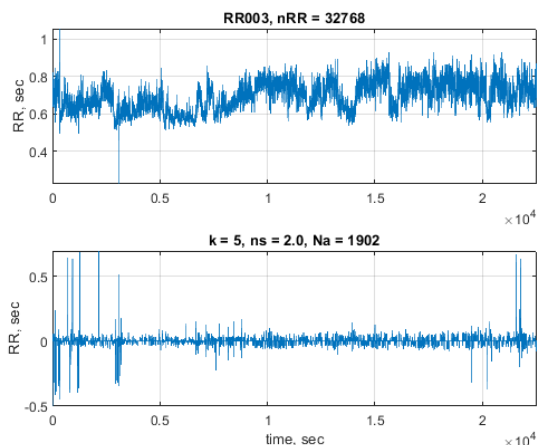


Figure 2 – Graphs of the RR003 signal and its artifacts

According to Takens' theorem [21], the main properties of the attractor will be the same as those of the object under study, and its characteristics can be determined based on the similarity. Graphs of attractors of the studied HRV signals are shown in Fig. 3 and Fig. 4.

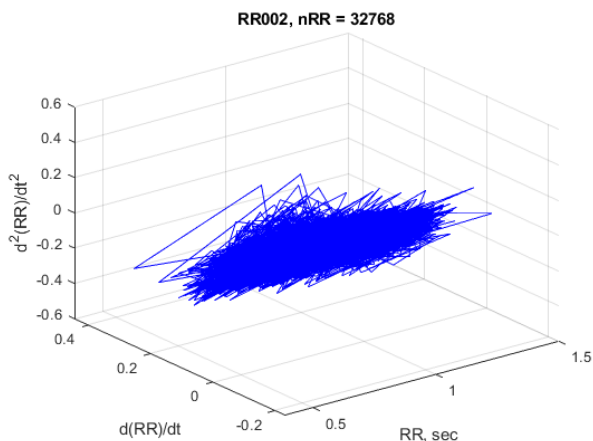


Figure 3 – Attractor of the signal RR002

A strange attractor, unlike a regular attractor, is not a curve or a surface, its geometric structure is very complex, and its structure is fractal. Such attractors are endowed with geometric (scale) invariance. The criteria of a “strange” attractor are trajectory instability in the form of exponential divergence from the attraction zone and fractional dimension. The analysis of the HRV attractor type is an analysis of integral processes based on interactions between individual HRV components or between these components and related characteristics in other organs and systems, occurring as a self-adaptation phenomenon. Three-dimensional histograms of pairs of successive intervals of RR signals were constructed in the MATLAB environment. The results of the obtained histograms in the three-dimensional coordinate space are shown in Fig. 5 and Fig. 6.

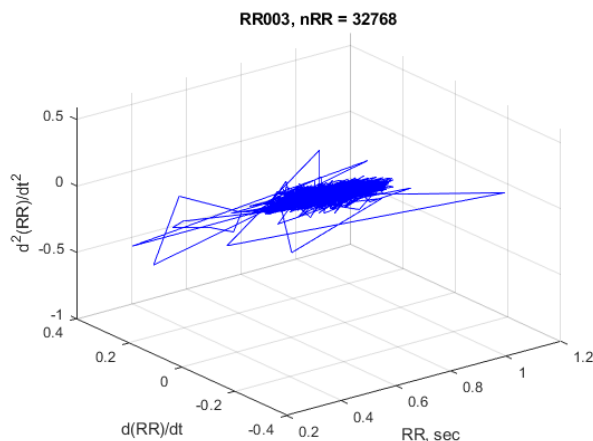


Figure 4 – Attractor of the signal RR003

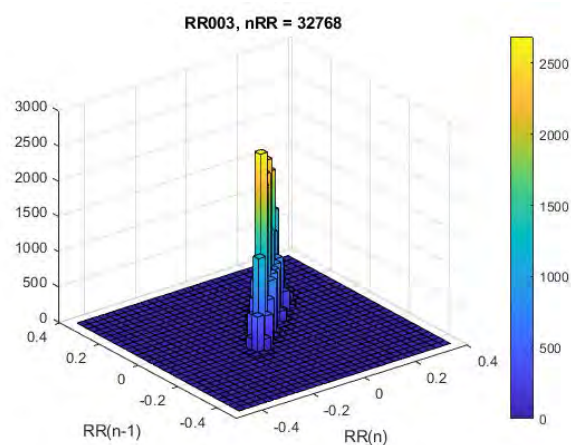


Figure 5 – The three-dimensional histograms RR003 signal

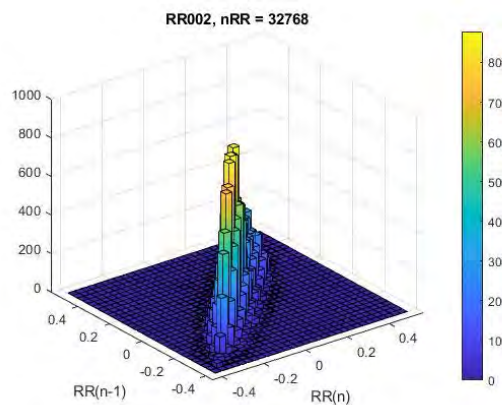


Figure 6 – The three-dimensional histograms RR002. signal

Poincaré maps (graphs) allow you to evaluate the dynamics of the heartbeat based on a simplified embedding of the phase space. Poincaré plot analysis is a quantitative visual technique that classifies the shape of the diagram into functional classes and provides detailed, beat-by-beat information about the heart's behavior. Usually, Poincaré graphs are used for two-dimensional graphic and quantitative representation (scatter diagrams), where the values

$RR(n)$ and $RR(n+1)$ are plotted along the axes. Most often, three indices are calculated from Poincaré plots: the standard deviation of the short-term variability of the RR interval (small axis of the cloud, SD1), the standard deviation of the long-term variability of the RR interval (the large axis of the cloud, SD2) and the ratio of the axes (SD1/SD2). For a healthy heart, the Poincaré plot shows a cigar-shaped cloud of points oriented along the line of identity.

These indices are correlated with linear indices. An increased ratio of SD1/SD2 is the most powerful indicator of a disturbance in the stability of the cardiovascular system. Poincaré graphs for the studied HRV signals are shown in the Fig. 7 and Fig. 8.

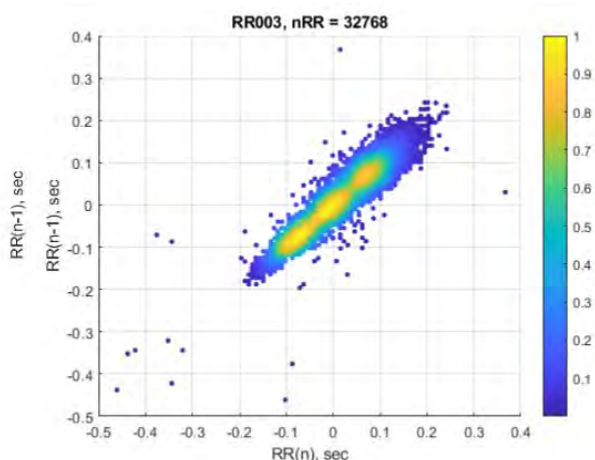


Figure 7 – A Poincaré plot for RR003signal

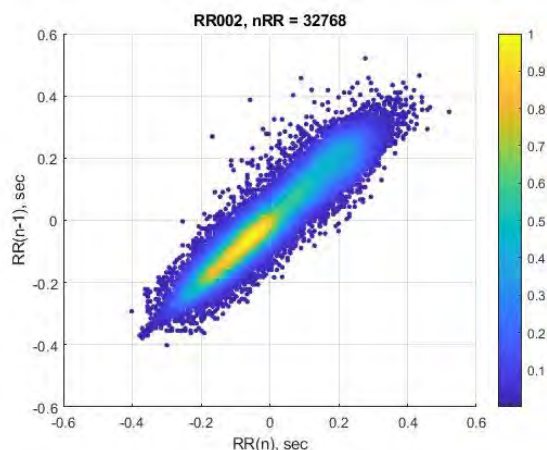


Figure 8 – A Poincaré plot for RR002signal

6 DISCUSSION

As can be seen from Fig. 1 and Fig. 2, real empirical data obtained from biological objects with stochastic influence are difficult to represent and process only by classical standard methods.

Thus, a linear, stationary, time-invariant component can be described using classical frequency and time methods. But non-stationary and non-linear processes that are characteristic of biological systems contain additional

information about the chaotic nature and dynamics of changes in the states of this system, requiring the use of non-standard approaches, methods of non-linear dynamics, in particular.

This gave impetus to the search for non-standard approaches to the processing of such empirical data as heart rate variability, which contain information both about the state of the cardiovascular system and about the stability of the functioning of the entire organism.

The importance of reliable processing of empirical data obtained from real biological data is related to the content in these values of an important component that can serve as an indicator of a violation of the functional state of a biological object and plays an important role in forming a decision about the state of the operator as a possible trigger in aviation safety management. Because according to the flight safety risk portfolio, report for the period from 2016 to 2020, of the web portal <https://rmd.avia.gov.ua/> cardiovascular diseases are identified as one of the triggers of aviation safety violations. Therefore, the use of nonlinear dynamics methods to obtain additional useful information for assessing the nature of the chaotic nature of processes in the body allows for a visual assessment of the stability of the functioning of the entire system of the operator's body, as a biological system with the stochastic influence of professional destabilizing factors.

Thus, due to the fact that the complex chaotic nature of biological processes describes the constant mechanisms of adaptation of the system to external factors, the RR 002 signal has a visually greater chaoticity than the processes in Fig. 4 and Fig. 5, which can be a sign of healthy adaptation, which is confirmed by the quantitative calculations in Table 2.

Table 2 – The results of the calculation of the main indicators

Signal file	Hausdorff dimension	Highest Lyapunov exponent	Hurst index	ApEn	SaEn
RR002	1.9693	7.6865e-05	0.02608	1.075	0.83034
RR003	1.9727	0.0012	0.21964	0.909	0.68035

The three-dimensional histogram of the studied signals of pairs of consecutive RR intervals in Fig. 6 also confirms the presence of a greater number of chaotic pulsations in the RR 002 signal.

To construct a scatter plot of the RR 002 variable relative to its delay, Poincaré graphs were used to eliminate the limitation of three-dimensional histograms, which consists in the absence of information about the correlation between data points.

The inclusion of the relative frequency of pairs of consecutive data points in the standard Poincaré graph allows you to build a two-dimensional histogram with $RR(n)$, $RR(n+1)$, having received information about the density of data points (Fig. 7 and Fig. 8 light (yellow) color).

From Fig. 4, it can be seen that the extreme right point is longer by 0.6 s than the n th interval, while the error of determining the RR interval is 8 ms, which may indicate a

significant imbalance of the body at this moment in time. The same phenomenon can be determined on the Poincaré map of Fig. 7–8, where you can see a significant scatter of individual points at the origin of the coordinates. While for the RR002 signal, there is the presence of repetition of intervals of such a duration that can serve as evidence of the “normality” of such outbreaks for a given organism and serves as evidence of the “normality” of such a situation and a sufficient number of adaptation resources to return to stable functioning, as well as a description of daily variability.

CONCLUSIONS

A component of a comprehensive approach with a defined level of human safety is a timely and reliable assessment of its functional state [22]. The application of human security contributes to a comprehensive response to the multidimensional causes and consequences of the impact of professional destabilizing factors [23].

The scientific novelty of obtained is the fact that for the first time a combination of traditional methods of measurement and processing of biomedical signals in combination with alternative methods for forecasting and diagnosis of biomedical data of individuals, which can be used as a control sample, capable of effectively supplementing the specified methods due to the use of modern methods of signal processing in the time and frequency domains.

The article proposes the use of nonlinear dynamics methods for the analysis of heart rate variability, which allowed a new understanding of heart rate changes in various physiological states, including in the presence of external factors.

The practical significance of obtained results is that the use of the proposed approach provides additional prognostic information and complements the traditional analysis of heart rate variability, since it is the change in the dynamics of heart rate variability that has prognostic value regarding the progression of the impairment of the stability of the functional state of the operator.

Prospects for further research are to study the proposed set of indicators for a broad class of practical problems and use for diagnosis and forecasting in aviation medical.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses gratitude to Yevhen Romanenko, Doctor of Public Administration Professor Vice-Rector for Research for support and a fruitful paper discussion. The work is supported by the state budget scientific research project National Aviation University “Development of a prototype fatigue damage indicator” code 357-X-20.

REFERENCES

1. Ivanets O. B., Morozova I. V. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters, *Advanced Computer Information Technologies, 11th International Conference, 15–17 September 2021, proceedings.*

2. Deggendorf, IEEE, 2021, pp. 159–162. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548579.
3. Thayer J. F., Sternberg E. Beyond heart rate variability: vagal regulation of allostatic systems, *Neuroendocrine and Immune Crosstalk*, 2006, Vol. 1088, Issue 1, pp. 361–372. DOI:10.1196/annals.1366.014.
4. Francesco B., Grazia M., Emanuele G. et al. Linear and nonlinear heart rate variability indexes in clinical practice, *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2012, Vol. 2012, pp. 219080–219085. DOI: 10.1155/2012/219080.
5. Ganster D. C., Schaubroeck J, Sime W. E. et al. The nomological validity of the Type A personality among employed adults, *Journal of Applied Psychology*, 1991, Vol. 76, No. 1, pp. 143–68. DOI: 10.1037/0021-9010.76.1.143.
6. Kupper N., Denollet J. J. Type D personality as a prognostic factor in heart disease: assessment and mediating mechanisms, *Personality Assessment*, 2007, Vol. 89, No. 3, pp. 265–76. DOI: 10.1080/00223890701629797.
7. Petlenko V. P., Caregorod-cev G. I. *Filozofie medicíny*. Avicenum, 1984, 240 p.
8. Apanasenko G. L. A health of man in aspect of evolution, *Nursing and Care Open Acces Journal*, 2020, Vol. 7, No. 2. pp. 54–56. DOI: 10.15406/ncoaj.2020.07.00218.
9. Apanasenko G. L. Problems of Strategy of Healthcare, *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences*, 2020, No. 63, pp. 265–268. DOI: 10.36348/sjmps.2020.v06i03.002.
10. Seely A. J., Christou N. V. Multiple organ dysfunctions syndrome: exploring the paradigm of complex nonlinear systems, *Critical care medicine*, 2000, Vol. 28, No. 7, pp. 2193–2200.
11. Goldberger A. L., Amaral L. A., Hausdorff J. M. et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging, *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA*, 2002, Vol. 99, pp. 2466–2472. DOI:10.1073/pnas.012579499.
12. Deka D., Deka B. An improved multiscale distribution entropy for analyzing complexity of real-world signals, *Chaos, Solitons and Fractals*, 2022, Vol. 158, P. 112101. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112101.
13. Marshall J. C. Complexity, chaos, and incomprehensibility: parsing the biology of critical illness, *Critical Care Medicine*, 2000, Vol. 28, No. 7, pp. 2646–8.
14. Norris P. R., Anderson S. M., Jenkins J. M. et al. Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3,154 trauma patients, *Shock*, 2008. Vol. 30, No. 1, pp. 17–22. DOI: 10.1097/SHK.0b013e318164e4d0.
15. Norris P. R., Morris J. A., Ozdas A. Jr. et al. Heart rate variability predicts trauma patient outcome as early as 12 h: implications for military and civilian triage, *Journal of Surgical Research*, 2005, Vol. 129, No. 1, pp. 122–130. DOI:10.1016/j.jss.2005.04.024.
16. Gao J. B., Hu J., Tung W. W. Entropy measures for biological signal analysis, *Nonlinear Dynamics*, 2012, No. 68, pp. 431–444. DOI: 10.1007/s11071-011-0281-2
17. Ivanets O. B., Kosheva L. O. Approach to the evaluation of the functional state of the human body taking into account the variability of medical and biological indicators, *Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, International Conference, Sozopol, 06–08 September 2019, proceedings, IEEE*, 2019, pp. 661–665. DOI:10.1109/CAOL46282.2019.9019500.

17. Brin M., Stuck G. Introduction to Dynamical Systems. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 254 p.
18. Richman J. S., Moorman J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy, *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology*, 2000, Vol. 278, No. 6, pp. 2039–2049. DOI:10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039
19. Henriques T., Ribeiro M., Teixeira A. et al. Nonlinear Methods Most Applied to Heart-Rate Time Series: A Review, *Entropy*, 2020, Vol. 22, No. 3, P. 09. DOI:10.3390/e22030309.
20. URL: <http://physionet.org/physiobank/database/nsr2db/>
21. Takens F., Eds.: Rand D. A., Young L.-S. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Syst. and Turbulence*. Berlin, Springer, 1981, Vol. 898, pp. 366–381. DOI:10.1007/BFb0091924.
22. Kuzmin V. M., Khrashchevskiy R. V., Kulik M. S. et al. Mathematical model for decision making system based on three-segmented linear regression, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022. No. 3, pp. 38–49.
23. Romanenko Ye. O., Chaplay I. V. The essence and specifics of the services marketing system in the mechanisms of public administration, *Actual Problems of Economics*, 2016, No. 12, pp. 81–89.

Received 09.02.2023.

Accepted 23.04.2023.

УДК 004.942(045)

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕМПІРИЧНИХ ДАНИХ НА ОСНОВІ ЧАСОВИХ РЯДІВ

Іванець О. Б. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електроніки, робототехніки, технологій моніторингу та Інтернету речей Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Хращевський Р. В. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри аеродинаміки та безпеки польотів Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Кулик М. С. – д-р техн. наук, професор, декан аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Буриченко М. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри біокібернетики та аерокосмічної медицини Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему інтелектуального аналізу даних для оцінки стабільності функціонування операторів як складової управління безпекою в авіації. Дослідження присвячене аналізу складності та хаотичності фізіологічних процесів на основі методів нелінійної динаміки. Об'єктом дослідження є процес аналізу варіабельності серцевого ритму методами нелінійної динаміки.

Мета роботи – оброблення біомедичних сигналів для оцінювання хаотичності процесів із використанням нелінійних методів. Результати дослідження можуть бути використані під час побудови математичних методів нелінійної динаміки для опису емпіричних даних такого роду. Експериментальні дослідження надають змогу рекомендувати використання методів нелінійної динаміки в якості додаткової незалежної інформації, що дозволяє проаналізувати хаотичну складову біомедичних сигналів для уникнення хибних рішень при професійному відборі та оцінюванні поточного стану операторів авіаційної галузі як одну з причин несприятливих подій в авіації.

Перспективами подальших досліджень може бути створення методології на основі методів нелінійної динаміки, яка дозволить підвищити достовірність прогнозування дисфункції серцево-судинної системи, як індикатора зміни рівноваги функціонального стану оператора на основі додаткових інформативних параметрів, що можуть бути використані для оцінки тригерів несприятливих подій в авіації, а також експериментальне дослідження запропонованих математичних підходів для широкого кола діагностичних задач.

Метод. Проведено аналіз біомедичних даних для отримання додаткової корисної інформації при оцінюванні хаотичних процесів для визначення стабільності функціонування біологічної системи при прийнятті рішення про поточний стан оператора. Проведена кількісна оцінка складності фізіологічної динаміки для визначення стійкості процесів управління підсистемами організму та їх постійної адаптації до змін зовнішнього середовища. Наявність значних нелінійностей у біомедичних сигналах пов'язана з появою динамічної складової, яка описує хаотичний характер процесів організму. Завдяки тому, що біомедичні сигнали мають як періодичну, так і хаотичну складову, вивчення останньої дає змогу визначити інформаційну складову характеру внутрішньої організації організму та надати інформацію про можливу дестабілізацію функціонального стану оператора. Використання методів нелінійної динаміки для вивчення змін в організмі оператора та надання додаткової незалежної прогностичної інформації доповнює традиційний аналіз даних у часовій та частотній областях. Запропоновано декілька показників, отриманих методами нелінійної динаміки, що сприяють розширенню діагностичного рішення на основі емпіричних даних.

Результати. Результати дослідження можуть бути використані під час побудови математичних моделей для опису емпіричних даних такого роду.

Висновки. Застосування запропонованого підходу надає додаткову прогностичну інформацію та доповнює традиційний аналіз варіабельності серцевого ритму, оскільки саме зміна динаміки варіабельності серцевого ритму має прогностичне значення щодо прогресування порушення стабільності функціонування стану оператора. Зміни в динаміці варіабельності серцевого ритму мають прогностичне значення щодо прогресування біологічного дисбалансу на основі аналізу функціонування серцево-судинної системи. При застосуванні до окремої біологічної системи протягом певного періоду часу ці показники можуть бути діагностично корисними, диференціюючи прогресування функціональної нестабільності. Крім того, вони можуть бути цінним доповненням до сучасних систем моніторингу людського фактору. Перспективами подальших досліджень може бути створення методології із поєднанням використання класичних методів аналізу даних з додатковим використан-

ням методів нелінійної динаміки для підтвердження адекватності прийняття рішення про поточний стан оператора за інформативними параметрами, а також експериментальне вивчення запропонованих математичних підходів для широкого кола практичних задач різного характеру та розмірності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: методи нелінійної динаміки, карти Пуанкаре, аттрактор, старший показник Ляпунова, вибіркова ентропія, варіабельності серцевого ритму, стабільність функціонування, оператор.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ivanets O. B. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters / O. B. Ivanets, I. V. Morozova // *Advanced Computer Information Technologies: 11th International Conference, 15–17 September 2021 : proceedings.* – Deggendorf: IEEE, 2021. – P. 159–162. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548579.
2. Thayer J. F. Beyond heart rate variability: vagal regulation of allostatic systems / J. F. Thayer, E. Sternberg // *Neuroendocrine and Immune Crosstalk.* – 2006. – Vol. 1088, Issue 1. – P. 361–372. DOI:10.1196/annals.1366.014.
3. Francesco B. Linear and nonlinear heart rate variability indexes in clinical practice / [B. Francesco, M. Grazia, G. Emanuele et al.] // *Computational and Mathematical Methods in Medicine.* – 2012. – Vol. 2012. – P. 219080–219085. DOI: 10.1155/2012/219080.
4. The nomological validity of the Type A personality among employed adults / [D. C. Ganster, J. Schaubroeck, W. E. Sime et al.] // *Journal of Applied Psychology.* – 1991. – Vol. 76, No. 1. – P. 143–68. DOI: 10.1037/0021-9010.76.1.143.
5. Kupper N. Type D personality as a prognostic factor in heart disease: assessment and mediating mechanisms / N. Kupper, J. J. Denollet // *Personality Assessment.* – 2007. – Vol. 89, No. 3. – P. 265–76. DOI: 10.1080/00223890701629797.
6. Petlenko V. P. *Filozofie medicíny* / V. P. Petlenko, G. I. Caregorod-cev. – Avicenum, 1984. – 240 p.
7. Apanasenko G. L. A health of man in aspect of evolution / G. L. Apanasenko // *Nursing and Care Open Acces Journal.* – 2020. – Vol. 7, No. 2. – P. 54–56. DOI: 10.15406/ncoaj.2020.07.00218.
8. Apanasenko G.L. Problems of Strategy of Healthcare / G.L. Apanasenko // *Saudi Journal of Medical and Pharmaceutical Sciences.* – 2020. – No. 63. – P. 265–268. DOI: 10.36348/sjimps.2020.v06i03.002.
9. Seely A. J. Multiple organ dysfunctions syndrome: exploring the paradigm of complex nonlinear systems / A. J. Seely, N. V. Christou // *Critical care medicine.* – 2000. – Vol. 28, No. 7. – P. 2193–2200.
10. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging / [A. L. Goldberger, L. A. Amaral, J. M. Hausdorff et al.] // *Proceedings of the National Academy of Sciences. USA.* – 2002. – Vol. 99. – P. 2466–2472. DOI:10.1073/pnas.012579499.
11. Deka D. An improved multiscale distribution entropy for analyzing complexity of real-world signals / D. Deka, B. Deka // *Chaos, Solitons and Fractals.* – 2022. – Vol. 158. – P. 112101. DOI: 10.1016/j.chaos.2022.112101.
12. Marshall J. C. Complexity, chaos, and incomprehensibility: parsing the biology of critical illness / J. C. Marshall // *Critical Care Medicine.* – 2000. – Vol. 28, No. 7. – P. 2646–8.
13. Norris P. R. Heart rate multiscale entropy at three hours predicts hospital mortality in 3,154 trauma patients / P. R. Norris, S. M. Anderson, J. M. Jenkins et al.] // *Shock.* – 2008. – Vol. 30, No. 1. – P. 17–22. DOI: 10.1097/SHK.0b013e318164e4d0.
14. Norris P. R. Heart rate variability predicts trauma patient outcome as early as 12 h: implications for military and civilian triage. / [P. R. Norris, J. A. Morris, A. Jr. Ozdas et al.] // *Journal of Surgical Research.* – 2005. – Vol. 129, No. 1. – P. 122–130. DOI:10.1016/j.jss.2005.04.024.
15. Gao J. B. Entropy measures for biological signal analysis / J. B. Gao, J. Hu, W. W. Tung // *Nonlinear Dynamics.* – 2012. – No. 68. – P. 431–444. DOI: 10.1007/s11071-011-0281-2
16. Ivanets O. B. Approach to the evaluation of the functional state of the human body taking into account the variability of medical and biological indicators / O. B. Ivanets, L. O. Kosheva // *Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019: International Conference, Sozopol, 06–08 September 2019: proceedings.* – IEEE, 2019. – P. 661–665. DOI:10.1109/CAOL46282.2019.9019500.
17. Brin M. *Introduction to Dynamical Systems* / M. Brin, G. Stuck. – Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – 254 p.
18. Richman J. S. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy / J. S. Richman, J. R. Moorman // *American Journal of Physiology. Heart and Circulatory Physiology.* – 2000. – Vol. 278, No. 6. – P. 2039–2049. DOI:10.1152/ajpheart.2000.278.6.H2039
19. Henriques T. Nonlinear Methods Most Applied to Heart-Rate Time Series: A Review / [T. Henriques, M. Ribeiro, A. Teixeira et al.] // *Entropy.* – 2020. – Vol. 22, No. 3. – P. 09. DOI:10.3390/e22030309.
20. URL: <http://physionet.org/physiobank/database/nsr2db/>
21. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical Syst. and Turbulence* / Eds.: D. A. Rand, L.-S. Young. – Berlin : Springer). – 1981. – Vol. 898. – P. 366–381. DOI:10.1007/BFb0091924.
22. Kuzmin V. M. Mathematical model for decision making system based on three-segmented linear regression / [V. M. Kuzmin, R. V. Khrashchevskiy, M. S. Kulik et al.] // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2022. – № 3. – P. 38–49.
23. Romanenko Ye. O. The essence and specifics of the services marketing system in the mechanisms of public administration / Ye. O. Romanenko, I. V. Chaplay // *Actual Problems of Economics.* – 2016. – № 12. – P. 81–89.

OBJECT DETECTION PERFORMANCE INDICATOR IN VIDEO SUIVEILLANCE SYSTEMS

Katerynychuk I. S. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems, Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine, Khmelnytskyi, Ukraine.

Babaryka A. O. – PhD, Associate Professor of the Department of Telecommunication and Information Systems, Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine, Khmelnytskyi, Ukraine.

Khoptynskiy R. P. – PhD, Associate Professor of the Department of Telecommunications and Information Systems of the National Academy of the State Border Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi, Khmelnytskyi, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The probability of detecting the object by the operator of the video surveillance system depends on a number of parameters (geometric dimensions of the object of observation, distance to the object of observation, parameters of the video surveillance camera, monitor parameters, etc.).

Objective. The purpose of the article is to develop an indicator of the effectiveness of detecting dynamic objects when evaluating the functioning of video surveillance systems.

Method. An indicator of the effectiveness of object detection when evaluating the functioning of video surveillance systems is proposed. The proposed indicator is expressed in the probability of detection of the object of interest by the i -th operator thanks to the person's own visual apparatus or with the help of a software algorithm. This indicator differs from the existing ones by taking into account the parameters of the optical system, the parameters of the information display device (monitor), the number of video surveillance cameras, etc. The developed indicator makes it possible to estimate the probability of detection of an object by a video surveillance system operator thanks to a person's own visual apparatus or with the help of a software algorithm, depending on the distance to such an object.

Results. According to the results of experimental calculations, it has been proven that the effectiveness of the use of video surveillance systems with the use of video analytics functions (using the example of the dynamic object detection algorithm).

Conclusions. The conducted experimental calculations confirmed the efficiency of the proposed mathematical apparatus and allow us to recommend it for use in practice when solving problems of evaluating the effectiveness of the functioning of video surveillance systems.

KEYWORDS: probability, detection, human operator, criterion, efficiency, indicator, task, performance, calculations, mathematical apparatus.

ABBREVIATIONS

VSS is a video surveillance systems;
TTP is a Targeting Task Performance;
CTF is a contrast threshold function;
MTF is a modulating transfer function;
ViBe is a Visual Background Extractor;
NVESD is a Night Vision and Electronic Sensors Directorate.

NOMENCLATURE

P_{op} is a probability of detection of an alarming event by the actual operator of the video surveillance system;
 K_{op} is a coefficient of readiness of the VSS operator;
 K_{Ψ} is a coefficient of psychophysiological reliability of the VSS operator;
 K_{bio} is a coefficient of biological reliability, including functional suitability of VSS operator;
 T_0 is a time during which the operator was not at workplace;
 T_{oth} is a the time during which the operator was at workplace but did not monitoring the situation;
 T is a total operating time of the operator;
 P_{TTP} is a probability of object detecting (TTP);

N_{res} is a число пар штрихів, що розміщуються на об'єкті;

E is a емпірично визначена константа;

A_{obj} is a the area of the observed object;

R is a distance to the object;

V is a resolvable cycles across target;

V_{50} is a number of cycles for 50% detection;

$TTPH$ is a horizontal components of TTP;

$TTPV$ is a vertical components of TTP;

ξ_{max} is a maximum horizontal spatial frequencies at a given contrast;

η_{max} is a maximum vertical spatial frequencies at a given contrast;

ξ_{min} is a minimum horizontal spatial frequencies at a given contrast;

η_{min} is a minimum vertical spatial frequencies at a given contrast;

C_{obj} is a contrast target relative to background;

$CTFH_{sys}$ is a the CTF of the system for the horizontal plane;

$CTFV_{sys}$ is a the CTF of the system for the vertical plane;

CTF_{eye} is a CTF of the operator's eye;

MTF_{dys} is a MTF of the display;
 MTF_{sys} is a MTF of video surveillance system;
 QH is a the noise bandwidth in the horizontal plane;
 QV is a the noise bandwidth in the vertical plane;
 α is a coefficient of proportionality;
 σ is a the root-mean-square value of the display

noise;

L is a display brightness;

α is a angle of view of the operator;

h is a linear monitor size;

l is a the distance from the eye to the plane of the monitor;

K_{periph} is a complex coefficient;

P_{alg} is a probability of object detection by a software algorithm;

$P_{op/alg}$ is a probability of detection alarming event (object of interest) by VSS operators using a software algorithm;

$H_{mon\%}$ is a height of the observed object, as a percentage of the height of the monitor;

H_{obj} is a the height of the observed object;

H_{sceny} is a the height of the observed scene;

R_{obj} is a distance to the object (m);

H_{matr} is a the height of the matrix of the VSS camera;

f is a focal length;

P_{jonson} is a probability of object detection by the VSS operator without use of video analytics algorithms, calculated using the Johnson criteria;

P_{ttp} is a probability of object detection by the VSS operator without use of video analytics algorithms, calculated using success rate of the TTP;

P_{obj} is a the probability of object detection by the operator video surveillance system using video analytics algorithms, calculated using the proposed indicator.

INTRODUCTION

VSS are the main components of integrated security systems. The main function of VSS is to monitor certain objects. The installation of video analytics functions in such systems, obviously, increases the efficiency of their application. Thus, the urgent task is to study and develop a mathematical apparatus to assess the effectiveness of VSS.

The object of study is the process of evaluating the effectiveness of video surveillance systems.

The subject of study is an indicator of object detection efficiency.

The purpose of the work is to develop an indicator of the effectiveness of detecting dynamic objects when evaluating the functioning of video surveillance systems.

1 PROBLEM STATEMENT

Let's take the raw data: video surveillance cameras (I) function as part of the video surveillance system, operators (J) monitor the situation in the inspection sectors of the specified cameras. It is necessary to find: 1) the probability of detecting the object (alarming event) by the operator using his own visual observation (Pop); the

probability of detecting an object (an alarming event) using a software algorithm (Pop/alg).

Accepted assumptions: the psycho-emotional characteristics of the human operators, their fatigue and level of training are not taken into account in the experimental calculations.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The research of a number of scientists is devoted to the study of the effectiveness of the functioning of optoelectronic surveillance systems as a complex technical system. So for example, in article [1] proposed the concept of performance indicators of target tasks by operators. However, these indicators do not take into account the characteristics of the device for receiving optical signals (VSS cameras) and display parameters. Johnson's model provided definitive criteria for calculating the maximum range at which "Detection, Recognition, and Identification" could take place, with a 50% probability of success. (Orientation was also discussed, but this parameter is not used or recognized today) [2]. Nevertheless, Johnson's criterion does not take into account a number of important parameters that also affect the probabilistic performance of the target: the characteristics of the human visual system, lighting characteristics, and so on. Vollmerhausen R. H. [3] described targeting task performance, which takes into account the parameters of the optical system, human visual system, lighting characteristics, etc. In [4] proposed an analytical expression to determine the probability of object recognition in VSS. The methods described in works [3] and [4] do not take into account the level of professional training of the human operator, the level of his fatigue and the number of simultaneously observed video channels. Therefore, it is important to develop an performance indicator of the object detection in VSS.

3 MATERIALS AND METHODS

When computing efficiency of VSS, we can identify a number of criteria that can be divided into the following groups:

- economic criteria (the ratio of the actual cost of the already deployed system with the level of probable losses is estimated);
- functional criteria (assess how the functionality of the system meets the requirements of the security concept, etc.);
- criteria of efficiency (conformity is estimated that the configuration of the deployed video surveillance system will give the chance to reach necessary probabilities of detection of threats).

The effectiveness of detecting an object of interest or alarm in the surveillance sectors of VSS cameras is determined by such indicators as:

- the probability of object detection directly by the operator;
- the probability of object detection by a software algorithm;

– the probability of object detection by a human operator with the software algorithm.

We use the concept of performance indicators for the targets performance by VSS operator. The probability of detecting an alarming event by the actual people-operators of the video surveillance system can be expressed as:

$$P_{op} = K_{op} \cdot K_{\Psi} \cdot K_{bio}, \quad (1)$$

$$K_{op} = 1 - \frac{T_0 + T_{oth}}{T}. \quad (2)$$

The observation process also depends from many random factors, we used Johnson’s criteria [2], [6] to calculate the probability of detection object by the VSS operator. This technique involves comparing the minimum size of the observed object with the number of periods of the dashed measure in which the specified object falls. Johnson compared the observer’s ability to distinguish between images of a test measure and his ability to distinguish between objects such as humans and vehicles. The Johnsons method divided the observation tasks into some levels: detection, recognition and identification (see Tab. 1) [7].

This set of data, known as the Johnson’s criteria, represents the number of cycles (or pixels in horizontal projection) across a target for an ensemble of observers to have a 50% chance of completing the discrimination task.

Table 1 – Values of Johnson’s criteria for performance of tasks by the operator of system of video surveillance (50% probability tasks performance)

Discrimination Level	Cycles on Target	Pixels on Target
Detection	2	3
Recognition	4	6
Identification	6	9

Conversion coefficients are used to obtain other probabilities [8], [9] (see Tab. 2).

Table 2 – Conversion coefficients for the Johnson’s criteria

Probability of detection	100	95	80	50	30	10
Conversion coefficient	3	2	1.5	1	0.75	0.5

However, Johnson’s criteria does not take into account a number of important parameters that also affect the probabilistic performance of the target: the characteristics of the human visual system, lighting characteristics, and so on. The NVESD laboratory has proposed a Targeting Task Performance. The empirical equation for calculating the probability of object detecting has the form [3], [10]:

$$P_{TTP} = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}, \quad (3)$$

$$N_{res} = \frac{\sqrt{A_{obj}} \cdot TTP}{R}, \quad (4)$$

$$E = 1.51 + 0.24 \cdot \frac{V}{V_{50}}, \quad (5)$$

$$TTP = \sqrt{TTPH \cdot TTPV}, \quad (6)$$

$$TTPH = \int_{\xi_{min}}^{\xi_{max}} \left[\frac{C_{obj}}{CTFH_{sys}(\xi)} \right]^{1/2} d\xi, \quad (7)$$

$$TTPV = \int_{\eta_{min}}^{\eta_{max}} \left[\frac{C_{obj}}{CTFV_{sys}(\eta)} \right]^{1/2} d\eta, \quad (8)$$

$$CTFH_{sys}(\xi) = \frac{CTF_{eye}}{MTF_{dys} \cdot MTF_{sys}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot QH \cdot QV}{L^2} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$$CTFV_{sys}(\eta) = \frac{CTF_{eye}}{MTF_{dys} \cdot MTF_{sys}} \cdot \left(1 + \frac{\alpha^2 \cdot \sigma^2 \cdot QH \cdot QV}{L^2} \right)^{1/2}. \quad (10)$$

So, the probability of object detection depends not only on the coefficients of readiness, psychophysiological and biological reliability, but also on such an indicator as the physically possible probability of object detection, which takes into account the parameters of the optical system, human visual system, distance to the object observation, etc. Then the probability of detecting an alarm event (object of interest) by the VSS operator of will take the form:

$$P_{op} = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op} \cdot K_{\Psi} \cdot K_{bio}. \quad (11)$$

Eq. (11) will be valid for a single-channel VSS. If we use a multi-channel video surveillance system, the probability of detecting an alarm event (object of interest) will decrease as the number of VSS cameras increases. If the operator chooses the tactics of sequential viewing of each video channel, the observation time in seconds for each video channel is about 2 s. [11]. The time of fixation of vision on each video channel is about 0.3 s. [11] Therefore, in this case, the remaining video channels are ignored by the operator. But physiological features of the person allow to observe objects and by means of peripheral sight. The whole zone of human vision can be divided into the following zones: the zone of central vision (5°), the zone of clear vision (up to 30°), the zone

of peripheral vision (up to 110°) (see Fig. 1). To calculate the angle of view of the operator uses the equation:

$$\alpha = \arctg\left(\frac{h}{2l}\right). \quad (12)$$

Operator angle determines the angle between the lines connecting the extreme points of the monitor (horizontally or vertically) and the operator's eye.

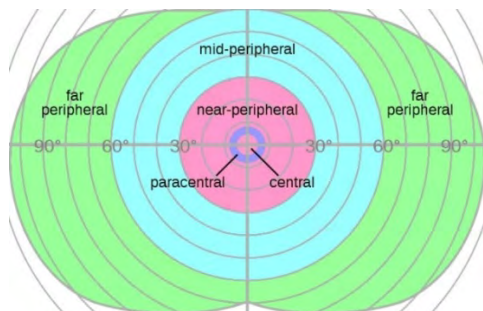


Figure 1 – Zones of human vision [12]

The probability of detecting objects at a distance from the central zone of human vision will decrease. Then, to take into account the number of VSS cameras and the peculiarities of human peripheral vision, we introduce into Eq. (12) a complex coefficient K_{periph} . Then Eq. (11) will look like:

$$P_{op} = \frac{\left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E}{1 + \left(\frac{N_{res}}{V_{50}}\right)^E} \cdot K_{op} \cdot K_{\Psi} \cdot K_{bio} \cdot K_{periph}. \quad (13)$$

The probability of object detection by a software algorithm depends on the algorithm itself, application conditions, and so on. Let us denote this probability as P_{alg} . However, the detection of an alarm event by a software algorithm is not a result indicator of the whole system, because the algorithm notifies the operator of the VSS about a certain event, and the operator makes a decision.

The probability of detection alarming event (object of interest) by VSS operators using a software algorithm:

$$P_{op/alg} \leq P_{alg} \text{ and } P_{op/alg} \rightarrow P_{alg}.$$

Therefore, the criterion for the effectiveness of object detection, which is expressed in the probability of detecting an alarm event will take the following form:

$$P_{obj} = P_{op} \cdot P_{op/alg} + P_{op} \cdot (1 - P_{op/alg}) + P_{op/alg} \cdot (1 - P_{op}). \quad (14)$$

4 EXPERIMENTS

A numerical experiment was conducted to verify the adequacy of the proposed performance indicator and comparative analysis of methods for assessing the © Katerynychuk I. S., Babaryka A. O., Khoptinskiy R. P., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-8

effectiveness of object detection by VSS operators (Johnson criteria, TTP task success rate) [13].

We consider a conditional software and hardware complex consisting of 8 VSS cameras. Number of VSS operators – one. Surveillance is performed using a monitor with a diagonal of 21 inch. (16 : 9 aspect ratio). Resolution – 1920x1080 px. Monitor width – 46.49 cm. Monitor height – 26.15 cm. The distance from the operator's eye to the monitor is 80 cm. The frame rate is 25 Hz. α – 169.6; σ – 0.02; L – 100 cd/m².

Suppose that when placed on the monitor with the parameters of the information windows of the eight video channels, the resolution of each of them will be 480x272 (CIF) (see Fig. 2).

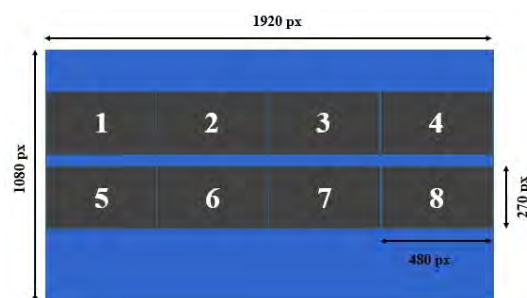


Figure 2 – Example of placing information windows of eight video channels on the monitor screen

VSS cameras of the same type with the basic parameters: 1/3 matrix (4.92 mm x 2.77 mm), focal length – 10 mm.

Object of observation: a person (1.7m x 0.5 m).

Viewing area: horizontal plane – 26 m, vertical plane – 14 m.

The probability distribution function of the correct classification of dynamic objects by software is obtained empirically because of experimental studies of the dynamic object detection algorithm ViBe [14].

To calculate the height of the observed object, as a percentage of the height of the monitor (one of the eight video channels in our experiment), the Eq. [12]:

$$H_{mon\%} = \frac{100\% \cdot H_{obj}}{H_{sceny}}, \quad (15)$$

$$H_{sceny} = \frac{H_{matr} \cdot R_{obj}}{f}. \quad (16)$$

The graph of the height of the observed object (as a percentage of the height of the monitor) from the distance to this object (with the above parameters) is shown in Fig. 3.

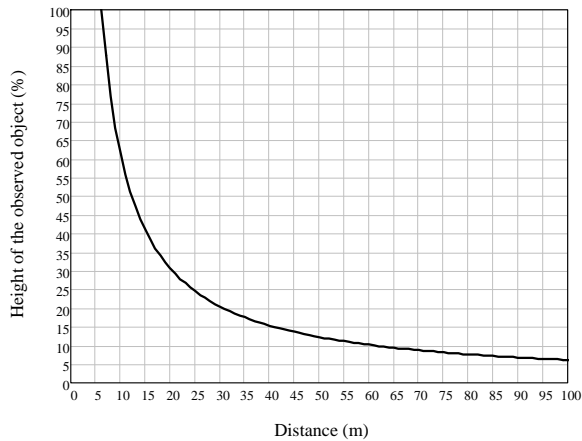


Figure 3 – Graph of the dependence of the height of the observed object (as a percentage of the height of the monitor) on the distance to this object

Johnson’s criterion makes it possible to evaluate the effectiveness of the task with a 50% probability, and the use of conversion factors (see Tab. 2) to obtain probabilistic characteristics. The graph of the number of pixels on which the object is displayed (in the horizontal plane) on the distance to this object is shown in Fig. 4.

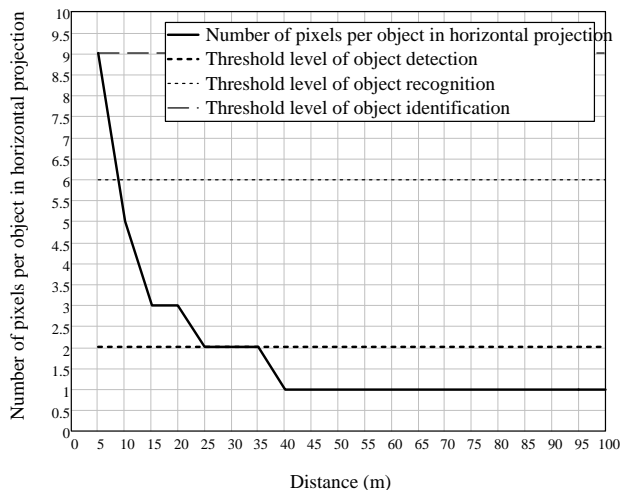


Figure 4 – Graph of calculations of the number of pixels on which the observed object is displayed in the smallest projection (in the horizontal plane)

To perform calculations estimate the probability of detection object by the VSS operator using the success rate of the TTP task (see Eq. 3 and Eq. 14). The CTF of the eye operator is calculated by the formula from [15], [16], MTF of the video surveillance system, MTF of the display are calculated by the Eq. from [3]. The contrast of the target relative to the background C_{obj} is calculated by the formula presented in [15]. The spectral range is equal to $0.5 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$.

Take the values of the coefficients: $K_{op} = 1$, $K_{\Psi} = 1$,

$K_{bio} = 1$, $K_{periph} = 1$.

5 RESULTS

After modelling the obtained results using the software package MathCad, there was a graphical representation of the function dependence of the probability detection observed object (person) on the observation range (see Fig. 5).

On the Fig. 5: P_{jonson} , P_{ttp} calculated using the Johnson criteria (taking into account conversion coefficients (see Tab. 3)) and the success rate of the TTP, respectively. P_{obj} calculated using the proposed indicator (see Eq. 14).

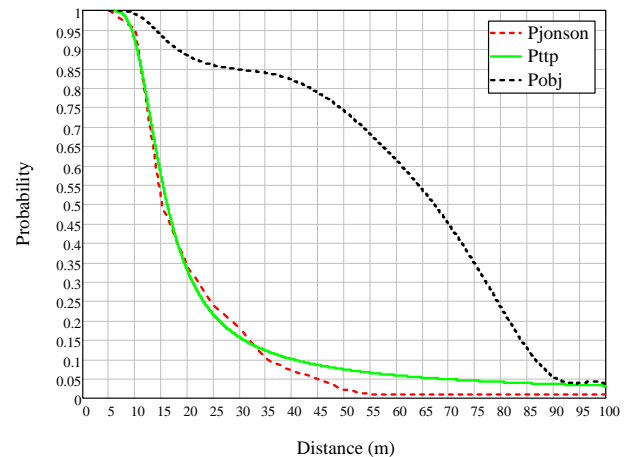


Figure 5 – Object detection probabilities are calculated using the Johnson criterion (P_{jonson}), the success rate of the TTP task (P_{ttp}), and the proposed performance indicator of the object detection (P_{obj}) (in the case of use video analytics algorithms)

6 DISCUSSION

After modeling the obtained expressions in the Mathcad software package and using the main characteristics of the conditional software and hardware complex, it is obvious that the probability of detecting an object (person) by the VSS operator depends on a number of parameters (geometric dimensions of the observed object, distance to the object to be observed, parameters of the VSS camera, parameters devices for displaying information (monitor), atmospheric characteristics, visual system of a human operator, psychoemotional characteristics of a human operator, level of fatigue and level of training). In accordance with the recommendations of EN 62676, the object detecting is possible at a distance of 35 m. (see Fig. 4). The probability of object detecting, calculated using the TTP (P_{obj}) task success indicator in the case of using video analytics algorithms (see Fig. 5), depends on the parameters of the software algorithm. The accepted assumptions in experimental calculations do not take into account the psychoemotional characteristics of the human operator, his fatigue and level of training.

CONCLUSIONS

In this article, an indicator for assessing the effectiveness of object detection in VSS was proposed. The results of experimental calculations (see Fig. 5)

indicate an increase the efficiency of using VSS with video analytics functions (for example we used the algorithm for dynamic objects detection).

The scientific novelty of the obtained results lies in the development of an indicator of the effectiveness of object detection in video surveillance systems. The proposed indicator is expressed in the probability of detection of the object of interest (an alarming event) by the i -th operator thanks to the person's own visual apparatus or with the help of a software algorithm. This indicator differs from the existing ones by taking into account the parameters of the optical system, the parameters of the information display device (monitor), the number of video surveillance cameras, etc.

The practical significance of the obtained results is that the developed indicator makes it possible to estimate the probability of detection of an object by the operator of the video surveillance system thanks to the person's own visual apparatus or with the help of a software algorithm, depending on the distance to such an object.

Prospects for further research is determined by the software implementation of the proposed criterion, and the analysis of models for assessing the effectiveness of optoelectronic observation systems such as TOD, ORACLE, MTDP, FLIR92, NVThermIP etc.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of the National Academy of the State Border Service of Ukraine "Features of using video surveillance systems with automated video information processing functions and performance criteria" (state registration number 0121U11425).

REFERENCES

1. Pikaar R., Dick L. Human factors guidelines for CCTV control center design introduction to a symposium, *11th International Symposium on Human Factors in Organisational Design and Management*, 2014, pp. 135–140. DOI: 10.4122/DTU:2131.
2. Johnson J. Analysis of image forming systems, *Proceedings of the Image Intensifier Symposium*. USA, Virginia, 1958, pp. 249–273.
3. Vollmerhausen R. H., Jacobs E. The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance. Technical report. AMSEL-NV-TR-230, 2004, 125 p.
4. Barela J., Kastek M., Firmanty K., Trzaskawka P., Dulski R., Kucharz J. Determination of range parameters of

- observation devices, *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications*, IX, 85411D, 2012. DOI: 10.1117/12.974487.
5. IEC 62676-4:2014. Video surveillance systems for use in security applications. Part 4, Application guidelines, 2014, 143 p.
6. Logan Des Autels G. A modern review of the johnson image resolution criterion, *Optik*, 2022, Vol. 249. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.168246.
7. Hollands J. G., Terhaar P., Pavlovic N. J. Effects of Resolution, Range, and Image Contrast on Target Acquisition Performance, *Human Factors*, 2018, Vol. 60(3). pp. 363–383. DOI: 10.1177/0018720818760331.
8. Waldman G., Wootton J. Electro-optical Systems modeling, 1992, 256 p.
9. Gerald C. Electro-Optical Imaging System Performance, fifth edition, JCD, Publishing and SPIE Press, 2008, 538 p.
10. Packard C. D., Curran A. R., Saur N. E., Rynes P. L. Simulation-based sensor modeling and at-range target detection characterization with MuSES, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing*, 2015, Vol. 9452, P. 143–157. DOI : 10.1117/12.2177310.
11. Xiaoqian Z., Hanshan L. Research on target capture probability calculation model of composite photoelectric detection imaging sensor system, *Optik*, 2018, Vol. 166, pp. 161–168. DOI : 10.1016/j.ijleo.2018.04.037.
12. Younis O., Al-Nuaimy W., Alomari M., Rowe F. A hazard detection and tracking system for people with peripheral vision loss using smart glasses and augmented reality, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2019, Vol. 10, No. 2, pp. 1–9. DOI : 10.14569/IJACSA.2019.0100201.
13. Babaryka A. et al. Research of the efficiency dynamic objects detecting on the video sequence from video surveillance cameras, *Paradigm of Knowledge*, 2020, Vol. 6 (44), pp. 35–44. DOI : 10.26886/2520-7474.6(44)2020.3.
14. Barnich O., Droogenbroeck M. Van ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences, *IEEE Transactions on Image Processing : proceedings*, 2011, Vol. 20, No. 6, pp. 1709–1724. DOI : 10.1109/TIP.2010.2101613.
15. Chevalier P. On the specification of the DRI requirements for a standard NATO target, 2015, 14 p. DOI : 10.13140/RG.2.1.4833.9604.
16. Triantaphillidou S. et al. Contrast sensitivity in images of natural scenes, *Signal Processing : Image Communication*, Vol. 75, 2019, pp. 64–75. DOI : 10.1016/j.image.2019.03.002.

Received 29.01.2023.

Accepted 03.05.2023.

УДК 004.93

ПОКАЗНИК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИЯВЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ У СИСТЕМАХ ВІДЕОПОСТЕРЕЖЕННЯ

Катеринчук І. С. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри телекомунікаційних та інформаційних систем Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького, Хмельницький, Україна.

Бабарика А. О. – д-р філософії, доцент кафедри телекомунікаційних та інформаційних систем Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького, Хмельницький, Україна.

Хоптинський Р. П. – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікаційних та інформаційних систем Національної академії Державної прикордонної служби України ім. Б. Хмельницького, Хмельницький, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Ймовірність виявлення об'єкта оператором системи відеоспостереження залежить від ряду параметрів (геометричних розмірів об'єкта спостереження, дальності до об'єкта спостереження, параметрів камери відеоспостереження, параметрів монітору тощо.

Метод. Запропоновано показник ефективності виявлення об'єктів при оцінці функціонування систем відеоспостереження із застосуванням функцій відеоаналітики (наприкладі алгоритму виявлення динамічних об'єктів) власному зоровому апарату людини чи за допомогою програмного алгоритму. Вказаний показник відрізняється від існуючих врахуванням параметрів оптичної системи, параметрів пристрою відображення інформації (монітору), кількості камер відеоспостереження тощо. Розроблений показник дає можливість оцінити ймовірність виявлення об'єкта оператором системи відеоспостереження завдяки власному зоровому апарату людини чи за допомогою програмного алгоритму, в залежності від відстані до такого об'єкта.

Результати. За результатами експериментальних розрахунків доведено підвищення ефективності застосування систем відеоспостереження із застосуванням функцій відеоаналітики (наприкладі алгоритму виявлення динамічних об'єктів).

Висновки. Проведені експериментальні розрахунки підтвердили працездатність запропонованого математичного апарату і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач з оцінки ефективності функціонування систем відеоспостереження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ймовірність, виявлення, людина-оператор, критерій, ефективність, показник, завдання, продуктивність, розрахунки, математичний апарат.

ЛІТЕРАТУРА

1. Pikaar R. Human factors guidelines for CCTV control center design introduction to a symposium. / R. Pikaar, L. Dick // 11th International Symposium on Human Factors in Organisational Design and Management. – 2014. – P. 135–140. DOI: 10.4122/DTU:2131.
2. Johnson J. Analysis of image forming systems / J. Johnson // proceedings of the Image Intensifier Symposium. – USA, Virginia. – 1958. – P. 249–273.
3. Vollmerhausen R. H. The targeting task performance (TTP) metric. A new model for predicting target acquisition performance. / R. H. Vollmerhausen, E. Jacobs // Technical report. AMSEL-NV-TR-230, 2004. – 125 p.
4. Determination of range parameters of observation devices / J. Barela, M. Kastek, K. Firmanty et al // Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications. – IX, 85411D. – 2012. DOI: 10.1117/12.974487.
5. IEC 62676-4:2014. Video surveillance systems for use in security applications. – Part 4: Application guidelines. – 2014. – 143 p.
6. Logan Des Autels G. A modern review of the johnson image resolution criterion / G. Logan Des Autels // Optik. – 2022. – Vol. 249. DOI: 10.1016/j.ijleo.2021.168246.
7. Hollands J. G. Effects of Resolution, Range, and Image Contrast on Target Acquisition Performance / J. G. Hollands, P. Terhaar, N. J. Pavlovic // Human Factors. – 2018. – Vol. 60(3). – P. 363–383. – DOI: 10.1177/0018720818760331.
8. Waldman G. Electro-optical Systems modeling / G. Waldman, J. Wootton, 1992. – 256 p.
9. Gerald C. Electro-Optical Imaging System Performance, fifth edition. / C. Gerald. – JCD. – Publishing and SPIE Press, 2008. – 538 p.
10. Simulation-based sensor modeling and at-range target detection characterization with MuSES / [C. D. Packard, A. R. Curran, N. E. Saur, P. L. Rynes] // Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing. – 2015. – Vol. 9452. – P. 143–157. DOI : 10.1117/12.2177310.
11. Xiaoqian Z. Research on target capture probability calculation model of composite photoelectric detection imaging sensor system / Z. Xiaoqian, L. Hanshan // Optik. 2018. – Vol. 166. – P. 161–168. DOI: 10.1016/j.ijleo.2018.04.037.
12. A hazard detection and tracking system for people with peripheral vision loss using smart glasses and augmented reality / [O. Younis, W. Al-Nuaimy, M. Alomari, F. Rowe] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2019. – Vol. 10, No. 2. – P. 1–9. DOI : 10.14569/IJACSA.2019.0100201.
13. Babaryka A. Research of the efficiency dynamic objects detecting on the video sequence from video surveillance cameras / A. Babaryka et al. // Paradigm of Knowledge. – 2020. – Vol. 6 (44). – P. 35–44. DOI : 10.26886/2520-7474.6(44)2020.3.
14. Barnich O. ViBe: A universal background subtraction algorithm for video sequences / O. Barnich, M. Van Droogenbroeck // IEEE Transactions on Image Processing : proceedings. – 2011. – Vol. 20, No. 6. – P. 1709–1724. – DOI : 10.1109/TIP.2010.2101613.
15. Chevalier P. On the specification of the DRI requirements for a standard NATO target / P. Chevalier. – 2015. – 14 p. – DOI : 10.13140/RG.2.1.4833.9604.
16. Triantaphillidou S. Contrast sensitivity in images of natural scenes / S. Triantaphillidou et al. // Signal Processing : Image Communication. – 2019. – Vol. 75. – P. 64–75. DOI : 10.1016/j.image.2019.03.002.

MODEL-AGNOSTIC META-LEARNING FOR RESILIENCE OPTIMIZATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEM

Moskalenko V. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Science department, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of optimizing the resilience of artificial intelligence systems to destructive disturbances has not yet been fully solved and is quite relevant for safety-critical applications. The task of optimizing the resilience of an artificial intelligence system to disturbing influences is a high-level task in relation to efficiency optimization, which determines the prospects of using the ideas and methods of meta-learning to solve it. The object of current research is the process of meta-learning aimed at optimizing the resilience of an artificial intelligence system to destructive disturbances. The subjects of the study are architectural add-ons and the meta-learning method which optimize resilience to adversarial attacks, fault injection, and task changes.

Objective. Stated research goal is to develop an effective meta-learning method for optimizing the resilience of an artificial intelligence system to destructive disturbances.

Method. The resilience optimization is implemented by combining the ideas and methods of adversarial learning, fault-tolerant learning, model-agnostic meta-learning, few-shot learning, gradient optimization methods, and probabilistic gradient approximation strategies. The choice of architectural add-ons is based on parameter-efficient knowledge transfer designed to save resources and avoid the problem of catastrophic forgetting.

Results. A model-agnostic meta-learning method for optimizing the resilience of artificial intelligence systems based on gradient meta-updates or meta-updates using an evolutionary strategy has been developed. This method involves the use of tuner and meta-tuner blocks that perform parallel correction of the building blocks of a original deep neural network. The ability of the proposed approach to increase the efficiency of perturbation absorption and increase the integral resilience indicator of the artificial intelligence system is experimentally tested on the example of the image classification task. The experiments were conducted on a model with the ResNet-18 architecture, with an add-on in the form of tuners and meta-tuners with the Conv-Adapter architecture. In this case, CIFAR-10 is used as a base set on which the model was trained, and CIFAR-100 is used as a set for generating samples on which adaptation is performed using a few-shot learning scenarios. We compare the resilience of the artificial intelligence system after pre-training tuners and meta-tuners using the adversarial learning algorithm, the fault-tolerant learning algorithm, the conventional model-agnostic meta-learning algorithm, and the proposed meta-learning method for optimizing resilience. Also, the meta-learning algorithms with meta-gradient updating and meta-updating based on the evolutionary strategy are compared on the basis of the integral resilience indicator.

Conclusions. It has been experimentally confirmed that the proposed method provides a better resilience to random bit-flip injection compared to fault injection training by an average of 5%. Also, the proposed method provides a better resilience to L_∞ -adversarial evasion attacks compared to adversarial training by an average of 4.8%. In addition, an average 4.8% increase in the resilience to task changes is demonstrated compared to conventional fine-tuning of tuners. Moreover, meta-learning with an evolutionary strategy provides, on average, higher values of the resilience indicator. On the downside, this meta-learning method requires more iterations.

KEYWORDS: Meta-learning, Evolutionary Strategies, Parameter-Efficient Transfer Learning, Robustness, Resilience, Adversarial Attacks, Faults Injection, Few-Shot Learning.

ABBREVIATIONS

AIS is an Artificial Intelligence System;
CIFAR is a Canadian Institute for Advanced Research dataset;
CMA-ES is the covariance matrix adaptation evolution strategy optimization algorithm;
MAML is a Model-Agnostic Meta-Learning;
PID is a proportional-integral-derivative controller.

NOMENCLATURE

\bar{acc} is an accuracy averaged over set of disturbance implementations;
 α is a step size hyperparameter for inner loop of meta-learning;
 β is a step size hyperparameters for outer loop of meta-learning;
 γ is a tuner' hyperparameter which regulates channel compression by 1, 2, 4, or 8 times;

D is a dataset for sampling few-shot learning tasks;
 D_{base} is a dataset for main task;
 D_{base}^{tr} is a training subset for main task;
 D_{base}^{val} is an evaluation subset for main task;
 D_k^{tr} is a training subset for k -th few-shot learning task;
 D_k^{val} is an evaluation subset for k -th few-shot learning task;
 F is an expected value of resilience criterion;
 ϕ is a set of parameters of tuners;
 ϕ^* is a set of optimal parameters of tuners;
 g is a perturbation vector formed for the parameters that being meta-optimized;
 K is a number of few-shot learning tasks;

k_{shot} is a number of images per class in few-shot task;

L_0 -norm is a count the number of non-zero elements in an adversarial perturbation vector;

L_∞ -norm is a largest magnitude among each element of an adversarial perturbation vector;

L_{τ_i} is a loss function for current task;

N is a number of disturbance implementations;

n is a number of implementations of disturbances of the same type on one meta iteration;

n_{way} is a number of classes in few-shot task;

P_0 is a model performance before disturbance impact;

$p(\tau)$ is a distribution of disturbance implementations;

P_{τ_i} is a performance metric for current state of model parameters and evaluation data;

\bar{R} is an integral resilience indicator averaged over set of disturbance implementations;

R_{τ_i} is a function that calculates the value of the integral resilience indicator for τ_i disturbance implementation;

σ is a precision parameter for evolution strategies of meta-learning;

θ are parameters of pretrained and frozen base AIS model;

Ξ is a set of all parameters of AIS model;

T is a maximum number of adaptation steps;

τ_i is an i -th implementation of disturbance;

U_{τ_i} is an operator that combines disturbance generation and adaptation;

ω is a set of parameters of meta-tuners;

ω^* is a set of optimal parameters of meta-tuners;

W is a task specified parameters;

W_{base} is a head weights for the main task.

INTRODUCTION

AIS are vulnerable to various types of disturbances. The most studied types of disturbances are fault injection, adversarial attacks, drift, and out-of-distribution data [1]. These disturbances can lead to financial and human life losses in safety-critical applications. This amplifies the need for research on vulnerabilities and resilience aspects of AISs.

There are many papers devoted to protecting AIS against fault injection, adversarial attacks, various types of drift, and out-of-distribution [2, 3, 4]. However, few studies have investigated the compatibility of protection mechanisms against different types of disturbances. There is a lack of research on simultaneous protection against the impact of different types of disturbing factors.

Since the main goal of machine learning of AIS is to ensure their maximum performance, the task of increasing the resilience of an AIS to disturbing influences can be considered an additional, higher-level task. In this case,

© Moskalenko V. V., 2023

DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-9

the use of ideas and methods of meta-learning to ensure the resilience of an artificial intelligence system seems to be the most reasonable and promising approach. In addition, different mechanisms for protecting against disturbances may be incompatible or unbalanced, and meta-learning can be seen as a way to harmonize the effect of different machine learning mechanisms to enhance a high-level goal of resilience.

The concept of resilience includes both architectural aspects related to system redundancy and mechanisms of graceful degradation, and behavioral aspects related to the ability to absorb disturbances (robustness) and the ability to quickly adapt and evolve [5, 6]. All these aspects are interconnected in neural networks, especially in the context of defense against various types of disturbing factors. However, conventional meta-learning methods usually take into account only one aspect of resilience and only one type of disturbance.

Conventional methods for optimizing AIS parameters typically aim to maximize the performance metric, sometimes with simultaneous improvements in robustness [7]. Meta-learning algorithms usually solve the problem of learning in a few shots and the problem of convergence in a minimum number of iterations [8]. However, there is a lack of research on meta-learning application to simultaneously optimize different components of resilience, especially in the context of different types of disturbances.

As the size of neural networks grows, more and more attention is focused on parameter-efficient fine-tuning methods for rapid adaptation to new tasks and domains [9]. This approach does not change the original AIS model, but instead adds additional elements that are fine-tuned to improve the resulting model. Parameter-efficient fine-tuning is also relevant for adapting to disruptive influences in the context of affordable resilience, as there are always resource constraints in practice.

The object of research is the process of meta-learning for artificial intelligence system which functions under influences of destructive perturbations and is subject to resource constraints.

The subjects of the research are model-agnostic method of meta-learning of an artificial intelligence system that provide resilience to adversarial attacks, fault injection attacks and task changes.

The goal is a development parameter-efficient model-agnostic meta-learning method of artificial intelligence system which provides resilience to adversarial attacks, fault injections and task changes.

1 PROBLEM STATEMENT

Let $\{\tau_i | i=1, N\}$ is set of disturbance implementations for AIS. Disturbances τ_i can be considered as adversarial attacks, fault injection, or switching to a new task. Let $\{D_{base} = \{D_{base}^{tr}; D_{base}^{val}\}\}$ is a dataset on which the model was trained to perform the main task under known conditions. It is also given a dataset

$D = \{D_k^{tr}; D_k^{val} | k = \overline{1, K}\}$ for K few-shot learning tasks, where fine-tuning data D_k^{tr} is used in the fine-tuning stage and validation set D_k^{val} is used in the meta-update stage. There is also a given set of parameters θ , ϕ , ω and W , where θ are parameters of a pretrained and frozen base AIS model, ϕ and ω are adaptation parameters of AIS model backbone, and W are task specified parameters (model head parameters). Head weights W_{base} for the main task are pre-trained on the data D_{base} .

It is necessary to find such values of the parameters ω^* , ϕ^* which ensure the maximum expected resilience of AIS to the impact of various types of disturbances

$$\max_{\omega, \phi} E_{\tau_i \sim p(\tau)} [R_{\tau_i}(U_{\tau_i}(\theta, \phi, \omega, W, D))]. \quad (1)$$

The operator U should combine a disturbing influence and adaptation in T steps, which maps the current state of ϕ to new state of ϕ . Adversarial attacks, fault injection, or switching to new tasks may be considered as i -th disturbance τ_i

The function R_{τ_i} calculates the value of the integral resilience indicator for a particular disturbance implementation over model parameters ω during its adaptation and the test sample $D_{\tau_i}^{val}$. R_{τ_i} is a function of the performance metric P_{τ_i} .

$$R_{\tau_i} = \frac{1}{P_0 T} \sum_{t=1}^T P_{\tau_i}(\theta, \omega, \phi_t, W_t, D_{\tau_i}^{val}). \quad (2)$$

Gradient-based meta-learning requires finding such values of the parameters ω^* , ϕ^* that will ensure the minimum expected loss function L on the set of implementations of different types of disturbances τ_i

$$\min_{\omega, \phi} E_{\tau_i \sim p(\tau)} [L_{\tau_i}(U_{\tau_i}(\theta, \phi, \omega, W, D))]. \quad (3)$$

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The problem of the resilience of AIS to various types of disturbances was highlighted in [1, 5, 6]. In [10, 11] it is noted that the two main characteristics of the behavior of a resilient system are the simultaneous absorption of disturbances (robustness) and rapid adaptation to new disturbances. However, the majority of machine learning methods focus on maximizing performance under normal conditions, and sometimes one aspect of resilience [12, 13].

Increasing the robustness of AIS to adversarial attacks is based on gradient masking [14], robustness optimization [15], and adversarial attack detection [16].

Fault tolerance is implemented through the application of fault masking methods [17], explicit redundancy input methods [18], and error detection methods [19]. The most popular method is adversarial training, which is related to robustness optimization. It consists in generating perturbations of training samples during training. Increasing the robustness to small domain shifts or task changes is provided by Out-of-domain generalization methods [20]. However, there is a lack of methods that ensure optimal robustness to the complex effects of various types of disturbances.

Increasing the speed of adaptation is usually implemented by improving optimizers or by reducing the requirements for the amount of training data. Research [21, 22] considers the use of PID control principles that can increase the stability and speed of the process of optimizing system parameters. In [23], methods for training neural network optimizers to increase the learning speed are considered.

One of the ways to increase the generalization capability of the network and reduce the requirements for training data while adapting to changes is meta-learning. In [24], various model-agnostic meta-learning methods for implementing Few-Shot Learning are considered. In [7], an attempt was made to integrate different methods for increasing the robustness of a neural network with meta-learning for Few-Shot Learning. As a result, it has been demonstrated that the incorporation of regularization and the introduction of perturbative effects can be effectively executed in both the internal loop and the external loop of meta-learning. Another study [25] demonstrated that the outer loop of meta-learning could be implemented using an evolutionary strategy, enabling the use of even non-differentiable, non-smooth, and non-decomposable meta-objectives. However, there is a lack of research examining meta-objectives such as robustness, adaptation speed, or integral resilience indicators.

Study [26], has shown that ensuring resilience may require significant resources, and it is advisable to consider approaches for providing affordable resilience. In the works [9], it is proposed to perform model adaptation for specific tasks or domains within the framework of parameter-efficient transfer learning. In this approach, the large AIS model remains unchanged (frozen). Instead, the frozen model is modulated by adding adapters with a small number of parameters. In the study [27], the use of adapters in conjunction with meta-adapters was considered to further enhance adaptation efficiency. However, the possibility of using adapters for optimizing model robustness and adaptation speed to new types of disturbances has not yet been explored.

Thus, there is a lack of research on the use of meta-learning for ensuring the resilience of AIS to the combined impact of various types of disturbances. However, existing studies demonstrate the possibility of optimizing individual aspects of resilience. Therefore, it is relevant to investigate the potential for combining different mechanisms to ensure the resilience of AIS in the full sense of this concept.

3 MATERIALS AND METHODS

The larger the model, the more computationally complex it is to fine-tune for adaptation to new conditions. Moreover, there is a potential risk of catastrophic forgetting under the influence of new information. Therefore, it is proposed to attach tuners to the model, which can be computationally efficient in fine-tuning [9]. In this case, the weight coefficients of the model remain frozen. The original model usually consists of certain blocks or modules, such as Convolutional Residual Block, Multi-layer Perceptron Block, Multi-head Self-Attention Block, and others. To generalize, we will refer to these blocks as frozen operations and denote them as $OP(x)$. The parallel method of connecting a tuner (adapter) to the frozen blocks of the model is the most convenient and versatile approach (Fig. 1a) [28]. In this case, to ensure the properties of resilience, it is proposed to use three consecutive blocks of tuners at once, two of which are tuned during meta-training (Fig. 1a) [27]. To balance between different modules, we introduce a channel-wise scaling factor.

For the same frozen model block, the architecture of the tuners is chosen to be identical. Various tuner (adapter) architectures have become popular in the literature, with the most computationally efficient ones shown in Fig. 1b, Fig. 1c, and Fig. 1d. The architectures depicted in Fig. 1b and Fig. 1c are based on convolutional layers, making them computationally simpler on the one hand and characterized by lower capacity for absorbing disturbances on the other hand. However, convolutional

tuners have proven themselves effective in correcting frozen convolutional blocks [29]. The convolutional tuner shown in Fig. 1c has a hyperparameter γ , which regulates channel compression by 1, 2, 4, or 8 times.

If we reject the specialization of different parameters of the AI model and denote the set of all parameters as $\Xi = \langle \theta, \phi, \omega, W \rangle$, then the process of meta-learning using gradient learning methods can be described by the formula

$$\Xi^* = \arg \min_{\Xi} E_{\tau_i \sim p(\tau)} [L_{\tau_i}(U_{\tau_i}(\Xi, D_{\tau_i}))]. \quad (4)$$

If we use the SGD stochastic gradient descent algorithm with T steps in the U operator and use gradient meta-update in the outer loop, we will get the algorithm shown in Fig. 2. Moreover, to simplify computations and increase stability, the tunable and meta-tunable parameters can be updated using the REPTIL algorithm [30].

If we do not restrict ourselves to gradient algorithms in the outer loop, then the meta-learning for direct maximization of the expected resilience criterion can be described by the formula

$$\begin{aligned} \Xi^* &= \arg \max_{\Xi} E_{\tau_i \sim p(\tau)} [R_{\tau_i}(U(\Xi, D))] = \\ &= \arg \max_{\Xi} F(\Xi). \end{aligned} \quad (5)$$

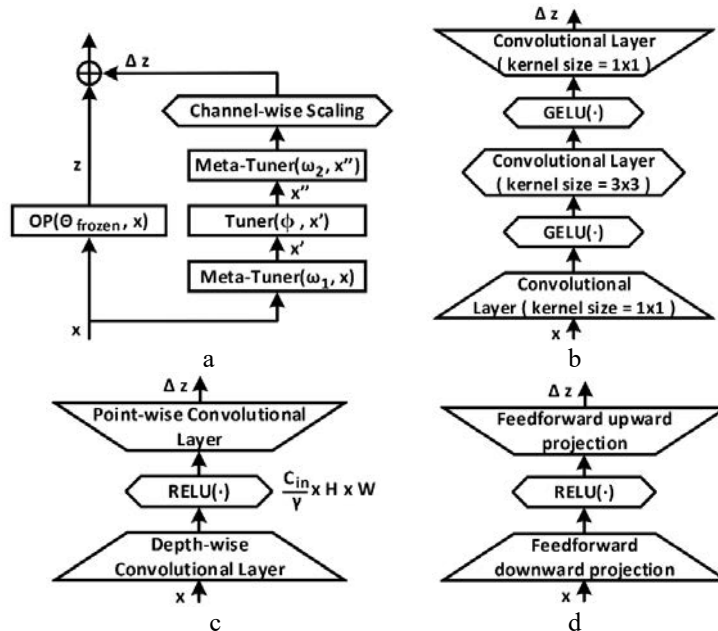


Figure 1 – Parallel tuning scheme and tuner architectures: a – parallel tuning scheme for the frozen block; b – tuner or meta-tuner based on ResNet-like convpass; c – tuner or meta-tuner based on two-layer convolutional network with channel dimension down-sampling bottleneck; d – tuner or meta-tuner based on two-layer feed-forward network with a downward projection bottleneck

Require: Distribution over disturbances $p(\tau)$; Step size hyperparameters α, β ;
Number of adaptation steps T .

- 1 Pretrain ϕ, ω on original data D_{base}
- 2 **While not done do:**
- 3 Select type of disturbance from set {fault injection, evasion adversarial attack, task change}
- 4 Sample disturbance implementations $\tau_i \sim p(\tau), i = \overline{1, n}$
- 5 **For** $i=1,2,\dots,n$ **do:**
- 6 Clone the current parameters: $\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i}, \hat{\phi}_{\tau_i}, \hat{W}_{\tau_i} \leftarrow copy(\theta, \omega, \phi, W_{base})$
- 7 **If** disturbance type is a task change:
- 8 Sample the training and validation data $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val}$ from new task
- 9 **else:**
- 10 Sample the training and validation data $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val}$ from D_{base}
- 11 **If** disturbance type is a fault injection:
- 12 $\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i}, \hat{\phi}_{\tau_i} \leftarrow Fault_injection(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i}, \hat{\phi}_{\tau_i}, \hat{W}_{\tau_i})$
- 13 **If** disturbance type is an evasion adversarial attack:
- 14 $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val} \leftarrow Adversarial_perturbation(D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val})$
- 15 $\phi_{\tau_i} \leftarrow SGD_{\phi, W}(L_{\tau_i}(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i}, \hat{\phi}_{\tau_i}, \hat{W}_{\tau_i}, D_{\tau_i}^{tr}), T, \alpha)$
- 16 $\omega \leftarrow \omega - \beta \nabla_{\omega} \sum_{\tau_i \sim p(\tau)} L_{\tau_i}(\theta, \omega, \phi_{\tau_i}, D_{\tau_i}^{val})$
- 17 $\phi \leftarrow \phi + \beta \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_{\tau_i} - \phi)$

Figure 2 – Pseudocode of model-agnostic gradient-based meta-learning for AIS resilience optimization

Require: Distribution over disturbances $p(\tau)$; Step size hyperparameters α, β ;
Precision parameter σ ; Number of adaptation steps T .

- 1 Pretrain ϕ, ω on original data D_{base}
- 2 **While not done do:**
- 3 Select type of disturbance from set { fault injection, evasion adversarial attack, task change}
- 4 Sample disturbance implementations $\tau_i \sim p(\tau), i = \overline{1, n}$
- 5 Sample perturbation vectors $g_{\phi, \tau_i} \sim N(0, I), i = \overline{1, n}; g_{\omega, \tau_i} \sim N(0, I), i = \overline{1, n}$
- 6 **For** $i=1,2,\dots,n$ **do:**
- 7 Clone the current parameters: $\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i}, \hat{\phi}_{\tau_i}, \hat{W}_{\tau_i} \leftarrow copy(\theta, \omega, \phi, W_{base})$
- 8 $\hat{\phi}_{\tau_i+} \leftarrow \hat{\phi}_{\tau_i} + \sigma g_{\phi, \tau_i}; \hat{\phi}_{\tau_i-} \leftarrow \hat{\phi}_{\tau_i} - \sigma g_{\phi, \tau_i}$
- 9 $\hat{\omega}_{\tau_i+} \leftarrow \hat{\omega}_{\tau_i} + \sigma g_{\omega, \tau_i}; \hat{\omega}_{\tau_i-} \leftarrow \hat{\omega}_{\tau_i} - \sigma g_{\omega, \tau_i}$
- 10 **If** disturbance type is a task change:
- 11 Sample the training and validation data $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val}$ from new task
- 12 **else:**
- 13 Sample the training and validation data $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val}$ from D_{base}
- 14 **If** disturbance type is a fault injection:
- 15 $\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i+}, \hat{\omega}_{\tau_i-}, \hat{\phi}_{\tau_i+}, \hat{\phi}_{\tau_i-} \leftarrow Fault_injection(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i+}, \hat{\omega}_{\tau_i-}, \hat{\phi}_{\tau_i+}, \hat{\phi}_{\tau_i-})$
- 16 **If** disturbance type is an evasion adversarial attack:
- 17 $D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val} \leftarrow Adversarial_perturbation(D_{\tau_i}^{tr}, D_{\tau_i}^{val})$
- 18 $\{\hat{\phi}_{\tau_i+, t} | t = \overline{1, T}\} \leftarrow SGD_{\phi, W}(L_{\tau_i}(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i+}, \hat{\phi}_{\tau_i+}, \hat{W}_{\tau_i}, D_{\tau_i}^{tr}), T, \alpha)$
- 19 $\{\hat{\phi}_{\tau_i-, t} | t = \overline{1, T}\} \leftarrow SGD_{\phi, W}(L_{\tau_i}(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i-}, \hat{\phi}_{\tau_i-}, \hat{W}_{\tau_i}, D_{\tau_i}^{tr}), T, \alpha)$
- 20 $R_{+, \tau_i} \leftarrow R(\{P_t(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i+}, \hat{\phi}_{\tau_i+, t}, D_{\tau_i}^{val})\})$
- 21 $R_{-, \tau_i} \leftarrow R(\{P_t(\hat{\theta}_{\tau_i}, \hat{\omega}_{\tau_i-}, \hat{\phi}_{\tau_i-, t}, D_{\tau_i}^{val})\})$
- 22 $R_{\tau_i} \leftarrow \frac{1}{2} (R_{+, \tau_i} - R_{-, \tau_i})$
- 23 $\omega \leftarrow \omega + \beta \frac{1}{\sigma n} \sum_{i=1}^n R_{\tau_i} g_{\omega, \tau_i}$
- 24 $\phi \leftarrow \phi + \beta \frac{1}{\sigma n} \sum_{i=1}^n R_{\tau_i} g_{\phi, \tau_i}$

Figure 3 – Pseudocode of model-agnostic meta-learning with evolution strategies for AIS resilience optimization

It is proposed to use an evolutionary strategy for the direct maximization of the resilience criterion due to the possible non-differentiability of the criterion. In this case, the gradient estimation can be performed over the Gaussian-smoothed version of the outer loop objective, which is calculated by the formula [8]

$$\begin{aligned} \nabla_{g \sim N(0, I)} E [F(\Xi + \sigma g)] &= \\ &= \frac{1}{2\sigma} E[R(\Xi + \sigma g) - R(\Xi - \sigma g)]. \end{aligned} \quad (6)$$

If, in the meta-optimization algorithm with an evolutionary strategy, a single perturbation vector g is formed for the meta-optimized parameters at the beginning of each meta-optimization iteration, the resulting algorithm will be as shown in Fig. 3.

The analysis of Fig. 2 shows that the type of disruptive influence does not change within a single meta-adaptation step. However, each meta-adaptation step begins with the selection of a disruptive influence type, followed by the generation of n implementations of the disruptive influence with a subsequent nested adaptation loop for each of them. Simultaneously combining disturbances may be ineffective. For example, after adding fault injection to the weights, we will have an outdated model, and applying adversarial attacks to it may be irrelevant.

The formation of adversarial samples is based on the *Adversarial_perturbation()* function. For differentiated models, FGSM attacks or PGD attacks can be used [31]. It is proposed to use adversarial attacks based on the search algorithm of the covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES) for non-differentiable models [32]. The level of perturbation is limited by the L_∞ -norm or L_0 -norm. In this case, if the image is normalized by dividing pixel brightness by 255, then the specified disturbance level is also divided by 255.

The formation of fault injections is performed by the *Fault_injection()* [33]. It is suggested to choose the most difficult fault type to absorb, which involves generating an inversion of a randomly selected bit (bit-flip injection) in the weight coefficient of the model. For non-differentiable models, it is proposed to generate up to 100 damaged weight versions, selecting the one providing the greatest reduction in accuracy. For differentiable models, it is suggested to pass the test dataset through the network and calculate the gradients, which can then be sorted by their absolute values. In the top- k weights with the highest gradient, one bit is inverted in a random position. The proportion of weights for which one random bit is inverted can be denoted as the fault rate.

Task change is needed to simulate concept drift and out-of-distribution. Forming a sample of other tasks can be done by randomizing the domain of the same task or by selecting tasks from relevant domains but sampling truly different tasks. These two approaches can also be

combined. In any case, an attempt should be made to sample data from larger and more diverse sets than D_{base} .

The analysis of Fig. 3 shows that, to calculate the resilience indicator, it is necessary to calculate the intermediate values of the performance metric for T adaptation steps, which in most cases is not differentiated.

4 EXPERIMENTS

For simplicity of experiments, we will use the Resnet-18 as the base model, pretrained on CIFAR-10 [34]. The architecture of the tuner and meta-tuner is chosen to be the same in the form of a two-layer convolutional network with channel dimension down-sampling bottleneck ($\gamma = 2$). To generate new tasks, CIFAR-100 is used, from which data is sampled for randomly selected 10 classes ($n_{way} = 10$) [34]. It is proposed to use 16 images per class ($k_{shot} = 16$), which are sent in mini-batches of 4 images (*mini_batch_size* = 4) during adaptation. Thus, the number of adaptation steps is $T = (k_{shot} * n_{way}) / \text{mini_batch_size} = 40$ iterations. The base task is used during meta-learning along with new tasks. The learning rate of the inner and outer loop of meta-learning are $\alpha = 0.001$ and $\beta = 0.0001$, respectively. The maximum number of meta-iterations is 300. However, the Early Stopping algorithm is used to stop meta-learning, which terminates the execution if the criterion does not change for more than 10 consecutive iterations by more than 0.001.

During the experiments, it is necessary to determine whether the connection of a meta-trained tuners can improve the ability to absorb disturbances such as faults and adversarial attacks, even if they are formed in a way different from what is used during training. It is also planned to determine whether meta-learning improves the speed of adaptation to faults and adversarial attacks compared to training under the influence of disturbances without meta-learning.

When calculating the integral indicator of resilience to disturbance (2), it is proposed to use the accuracy metric as the performance criterion P_{τ_i} . It is necessary to determine the advantages and disadvantages of the gradient-based meta-adaptation algorithm and the meta-adaptation algorithm with an evolutionary strategy.

The experimental research is proposed to be carried out in the following sequence:

1. Testing the pre-trained model without tuners and meta-tuners on disturbances of varying intensity.
2. Adding tuners and meta-tuners trained on data during fault injection into the entire model with a fixed *fault_rate* for testing the resulting model on different *fault_rate* values.
3. Adding tuners and meta-tuners trained on data with adversarial disturbances with a fixed perturbation level

for L_∞ for testing the resulting model on different perturbation levels for L_∞ .

4. Adding tuners and meta-tuners trained using the proposed gradient-based meta-learning algorithm for optimizing resilience (Fig. 2) followed by testing of the resulting model on disturbances of varying amplitude.

5. Adding tuners and meta-tuners trained using the proposed meta-learning algorithm with an evolutionary strategy for optimizing resilience (Fig. 3) followed by testing of the resulting model on disturbances of varying level.

6. Adding tuners and meta-tuners and calculating the average resilience value during adaptation to new tasks sampled from CIFAR-100.

7. Adding tuners and meta-tuners trained using the proposed gradient-based meta-learning algorithm for optimizing resilience (Fig. 2) and calculating the average resilience value during adaptation to new tasks sampled from CIFAR-100 but not used during meta-learning.

During the studies of the pre-trained model without tuners, only the average accuracy value on the test set is calculated. During testing of the pre-trained model with tuners and meta-tuners, the meta-tuners remain fixed, and the tuner is used to restore performance and calculate the average resilience value (2).

For training tuners with meta-tuners, fault injection is carried out by selecting weights with the largest absolute gradient values. The proportion of modified weights is $fault_rate = 0.3$. For testing the resulting model, fault injection will be performed by random bit-flips in randomly selected weights, the proportion of which ($fault_rate$) ranges from 0.1 to 0.6.

The training of the tuners and meta-tuners involves generating adversarial samples using the FGSM algorithm with $perturbation_level$ according to L_∞ up to 3. However, to test the resulting model against adversarial attacks, the adversarial samples are generated using the CMA-ES algorithm with $perturbation_level$ according to L_∞ -norm from 1 to 10.

Taking into account the elements of randomization, it is proposed to use their average values when assessing the accuracy and resilience of the model. To this end, 100 implementations of a certain type of disturbance are generated and applied to the same model or data. The average value of resilience during adaptation to new tasks is estimated on 5 task implementations (combinations of classes from CIFAR-100 that did not participate in the training of the meta-tuners).

5 RESULTS

The results of testing the impact of fault injection on model performance are shown in Table 1. When adding tuners and meta-tuners, before testing, they are pre-trained using gradient-based algorithms with and without disturbances until the base model's accuracy is reached. The average accuracy \overline{Acc} and the integral resilience

indicator \overline{R} for the model are evaluated on 100 implementations of fault injection with a given fault rate. During testing, meta-tuners are fixed, and tuners can be used for adaptation to disturbances and calculation of the resilience indicator. Meta-learning is performed using a gradient-based algorithm, where the early stopping condition occurred at the 150-th iteration (Fig. 2).

The analysis of Table 1 shows that tuners with meta-tuners can increase the robustness of the pre-trained model to faults by absorbing the impact. Moreover, the proposed resilience-aware meta-learning method provides a better resilience indicator compared to fault-tolerance training, on average by 5%. This means that during 40 iterations of tuning, performance recovery occurs faster on average if the model was prepared based on resilience-aware meta-learning. The resilience measurements in the experiment have standard deviation not exceeding 1.0.

Table 1 – Experimental data of model resilience to the faults injection testing

Fault rate	Only Pre-trained model	Pretrained model with tuners and meta-tuners trained under fault injection		Pretrained model with tuners and meta-tuners meta-trained for resilience optimization	
	\overline{Acc}	\overline{Acc}	\overline{R}	\overline{Acc}	\overline{R}
0.0	92.5%	92.8%	–	93.1%	–
0.1	90.2%	91.1%	0.971	92.2%	0.986
0.3	85.1%	87.6%	0.944	89.1%	0.971
0.5	83.0%	85.5%	0.883	86.5%	0.955
0.6	75.4%	80.1%	0.831	84.9%	0.917

The results of testing the impact of adversarial attacks on the model's performance are shown in Table 2. Tuners and meta-tuners are trained without and with perturbations until the resulting model reaches the accuracy of the base model for the next resiliency test. The average value of the accuracy \overline{Acc} and the integral indicator of resilience \overline{R} for the model is estimated on 100 implementations of adversarial perturbations of the dataset with a given perturbation level. After freezing the parameters of the meta-tuners, the tuners can be used to adapt to the disturbance and calculate the resilience indicator. Meta-learning is performed using a gradient-based algorithm (Fig. 2).

Table 2 – Experimental data of model resilience to the adversarial attack testing

Perturbation level	Only Pre-trained model	Pretrained model with tuners and meta-tuners trained under adversarial attack		Pretrained model with tuners and meta-tuners meta-trained for resilience optimization	
	\overline{Acc}	\overline{Acc}	\overline{R}	\overline{Acc}	\overline{R}
0	92.5%	92.8%	–	92.7%	–
1	91.6%	91.1	0.965	92.0%	0.981
3	88.1%	88.9	0.934	90.1%	0.980
5	82.5%	82.7	0.865	84.8%	0.922
10	74.8%	75.9	0.821	77.7%	0.897

The analysis of Table 2 shows that meta-tuners can increase the robustness of a trained model to adversarial attacks by absorbing part of the disturbance. Moreover, the proposed method of resilience-aware meta-learning provides a better resilience indicator compared to adversarial training by an average of 4.8%. That is, within 40 iterations of tuning, performance recovery is faster after resilience-aware meta-learning. The resilience measurements in the experiment have standard deviation not exceeding 1.1.

The results of resilience testing of the model with tuners and meta-tuners that were meta-trained with the evolutionary strategy (Fig. 3) are shown in Table 3 and Table 4. In this case, the meta-learning was performed with 233 iterations until the Early Stopping condition was reached.

The analysis of Table 3 and Table 4 shows that meta-learning with an evolutionary strategy also improves the perturbation absorption and the integral resilience indicator. A comparison of the results from Tables 1 and 2 with the results from Tables 3 and 4 shows that the results are comparable, but with a slight advantage in resilience (more than 1.5%) for the evolutionary optimization strategy. It is also worth noting that the evolutionary strategy required 83 additional iterations to achieve the optimal result.

Table 3 – Experimental data of model resilience to the faults injection testing after resilience aware meta-learning with evolution strategies

Fault rate	\overline{Acc}	\overline{R}
0.0	93.1%	–
0.1	93.3%	0.988
0.3	89.9%	0.979
0.5	87.5%	0.971
0.6	85.0%	0.941

Table 4 – Experimental data of model resilience to the adversarial attack testing after resilience aware meta-learning with evolution strategies

Perturbation level	\overline{Acc}	\overline{R}
0	92.7%	–
1	93.5%	0.986
3	91.6%	0.984
5	86.7%	0.954
10	83.5%	0.919

The advantage of using meta-learning instead of conventional fine-tuning of tuners was evaluated based on the experiment results which are shown in Table 5.

Table 5 – Experimental data of model resilience to the task change testing

Pretraining method of tuners and meta-tuners	\overline{R}
Pre-trained on the base dataset until the accuracy of the base model is achieved	0.933
Meta-trained for resilience optimization	0.981

The analysis of Table 5 shows that when adapting to new tasks, the meta-trained tuners and meta-tuners provide on average a 4.8% higher value of the integrated resilience indicator over 40 iterations of adaptation than a simple pre-training on the base task.

Thus, the proposed meta-learning algorithm for optimizing the AIS resilience ensures an increase in the AIS model’s resilience to disturbances compared to conventional approaches such as fault-tolerant training, adversarial training, and fine-tuning.

6 DISCUSSION

Experimental data confirm the increase in the resilience of the AI system to disturbing influences on the example of image classification with the use of the proposed meta-learning method. However, it is not clear exactly what effect the use of different types of perturbations in the internal optimization loop would have on the resilience. It is not known whether the conventional Model-Agnostic Meta-Learning (MAML) algorithm for Few Shot Learning will be inferior to the proposed method. Therefore, it is proposed to compare the results of testing meta-trained tuners and meta-tuners using the conventional MAML and the proposed algorithm (Fig. 2). Table 6 and Table 7 show the results of testing meta-trained tuners with meta-tuners using conventional MAML and the proposed Resilient-aware MAML. In this case, Table 6 illustrates the result of testing for fault injection, and Table 7 illustrates the result of testing for adversarial evasion attacks.

Table 6 – Experimental data of model resilience to the faults injection testing for Conventional MAML and Proposed Resilient-aware MAML

Fault rate	Gradient-based Conventional MAML		Proposed Resilient-aware MAML	
	\overline{Acc}	\overline{R}	\overline{Acc}	\overline{R}
0.0	92.8%	–	93.1%	–
0.1	90.7%	0.962	92.2%	0.986
0.3	84.9%	0.938	89.1%	0.971
0.5	82.9%	0.877	86.5%	0.955
0.6	75.6%	0.838	84.9%	0.917

Table 7 – Experimental data of model resilience to the adversarial attack testing for Conventional MAML and Proposed Resilient-aware MAML

Perturbation level	Gradient-based Conventional MAML		Proposed Resilient-aware MAML	
	\overline{Acc}	\overline{R}	\overline{Acc}	\overline{R}
0	92.5%	–	92.7%	–
1	91.3%	0.961	92.0%	0.981
3	88.6%	0.921	90.1%	0.980
5	81.9%	0.847	84.8%	0.922
10	73.7%	0.811	80.7%	0.907

The analysis of Table 6 shows that tuners and meta-tuners trained with the conventional MAML algorithm for few-shot learning are inferior on average by more than 5% to the proposed algorithm in terms of resilience. Moreover, a comparison with Table 1 shows that the results of conventional MAML are on average 0.3% lower in terms of resilience than fault-tolerant training algorithms.

The analysis of Table 7 shows that tuners and meta-tuners trained with the conventional MAML algorithm for

few-shot learning are inferior on average by more than 6% to the proposed algorithm in terms of resilience. Moreover, a comparison with Table 2 shows that the results of conventional MAML are inferior in terms of resilience on average by more than 1% to the adversarial training algorithm.

Thus, the proposed Resilient-aware MAML for model pre-training with tuners and meta-tuners ensures better absorption of fault injection and adversarial attacks and faster adaptation to them. Moreover, the proposed approach provides a higher resilience indicator compared to training separately under the influence of each type of perturbation or on the basis of conventional MAML.

CONCLUSIONS

The **scientific novelty** of the obtained result is the new MAML method for optimizing resilience to fault injection, adversarial attacks, and task change is developed. The method involves the use of tuners and meta-tuners which perform parallel correction of the building blocks of the deep neural network. The proposed meta-learning method consists of generating n implementations of a certain type of disturbance at each iteration of meta-optimization and using the results of adaptation for meta-updating tuners and meta-tuners. In this case, meta-updates can be calculated based on gradients or on an evolutionary strategy

It is experimentally proven that the Proposed Resilient-aware MAML improves the ability of the basic model to absorb disturbances and increases the speed of adaptation compared to conventional approaches. The proposed method provides a better fault injection resilience indicator compared to fault-tolerance training on average by 5%. Also, the proposed method provides a better resilience to evasion adversarial attack compared to adversarial training on average by 4.8%. It has also demonstrated an average improvement by 4.8% in task change resilience compared to conventional fine-tuning of tuner blocks.

The results of the conventional MAML and the Proposed Resilient-aware MAML are compared in terms of the impact on resilience to disturbances. The advantage of the proposed method is confirmed. In addition, meta-learning with an evolutionary strategy provides on average higher values of the resilience indicator, although it requires more iterations.

The practical significance of the achieved results lies in the formation of a new methodological basis for the development of algorithms for optimizing the resilience of AIS, which is important for safety-critical applications. Moreover, the method has a fairly unified structure and can be applied to a wide range of AIS model architectures and tasks, which brings it closer to the concept of providing resiliency as a service.

The limitations of the research are related to testing this approach only on the ResNet-18 convolutional network with blocks of tuners and meta-tuners based on the Conv-Adapter architecture. Nevertheless, the paper shows the fundamental possibility of increasing the

© Moskalenko V. V., 2023

DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-9

resilience of the original model by using tuners, meta-tuners, and meta-learning with a perturbation generator.

Future research should focus on the architecture of the tuner blocks and the application of the proposed approach to other machine learning tasks, such as regression, reinforcement learning, and generative models.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was concluded in the Intellectual Systems Laboratory of Computer Science Department at Sumy State University with the financial support of the Ministry of Education and Science of Ukraine in the framework of state budget scientific and research work of DR No. 0122U000782 “Information technology for providing resilience of artificial intelligence systems to protect cyber-physical systems”.

REFERENCES

1. Moskalenko V., Kharchenko V., Moskalenko A., and Kuzikov B. Resilience and Resilient Systems of Artificial Intelligence: Taxonomy, models and methods, *Algorithms*, Vol. 16, No. 3, pp. 1–44, 2023. DOI:10.3390/a16030165.
2. Chakraborty A., Alam M., Dey V., Chattopadhyay A. and D. Mukhopadhyay, *A survey on adversarial attacks and defences, CAAI Transactions on Intelligence Technology*, 2021. Vol. 6, No. 1, pp. 25–45. DOI:10.1049/cit2.12028.
3. Hoang L.-H., Hanif M. A. and Shafique M. Tre-map: Towards reducing the overheads of fault-aware retraining of deep neural networks by merging fault maps, *Proceedings of the 2021 24th Euromicro Conference on Digital System Design (DSD)*. Palermo, Italy, 1–3 September 2021, 8 p. DOI:10.1109/dsd53832.2021.00072.
4. Lu J., Liu A., Dong F., Gu F., Gama J. and Zhang G., Learning under Concept Drift: A Review, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2019, Vol. 31, No. 12, pp. 2346–2363, DOI: 10.1109/TKDE.2018.2876857.
5. Dymond J., Graceful degradation and related fields, ePrints Soton, <https://eprints.soton.ac.uk/455349/> (accessed May 18, 2023).
6. Eigner O., Xu K., Liu S., Chen Pin-Yu, Weng Tsui-Wei, Gan Ch. and Wang M., Towards resilient artificial intelligence: Survey and research issues, *2021 IEEE International Conference on Cyber Security and Resilience (CSR)*, 2021. Rhodes, Greece, 26–28 July 2021. pp. 536–542. DOI:10.1109/csr51186.2021.9527986.
7. Wang R., Xu K., Liu S., Chen Pin-Yu et al. On Fast Adversarial Robustness Adaptation in Model-Agnostic Meta-Learning, *ArXiv*, Vol. abs/2102.10454, 2021, pp. 1–16. DOI: 10.48550/arXiv.2102.10454.
8. Son X., Yang Y., Choromanski K., Caluwaerts K., Gao W., Finn C. and Tan J. Rapidly adaptable legged robots via evolutionary meta-learning, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Las Vegas, NV, USA, 24 October 2020 – 24 January 2021, pp. 1–11. DOI:10.1109/iros45743.2020.9341571.
9. Ding N., Qin Y., Yang G. et al. Parameter-efficient fine-tuning of large-scale pre-trained language models, *Nature Machine Intelligence*, 2023, Vol. 5, No. 3, pp. 220–235. DOI:10.1038/s42256-023-00626-4.
10. Fraccascia L., Giannoccaro I., and Albino V. Resilience of Complex Systems: State of the art and directions for future



- research, *Complexity*, 2018, Vol. 2018, pp. 1–44. DOI:10.1155/2018/3421529.
11. Drozd O., Kharchenko V., Rucinski A., Kochanski T., Garbos R. and Maevsky D. Development of models in resilient computing, *2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 2019, Leeds, United Kingdom, 5–7 June 2019, pp. 1–6. DOI:10.1109/dessert.2019.8770035.
 12. Inouye B. D., Brosi B. J., Le Sage E. H., and M. T. Lerdau, Trade-offs among resilience, robustness, stability, and performance and how we might study them, *Integrative and Comparative Biology*, 2021, Vol. 61, No. 6, pp. 2180–2189. DOI:10.1093/icb/icab178.
 13. Santos S. G. T. d. C., Gonçalves Júnior P. M., Silva G. D. d. S. and de Barros R. S. M. Speeding Up Recovery from Concept Drifts, *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, pp. 179–194. DOI: 10.1007/978-3-662-44845-8_12.
 14. Xie C., Wang J., Zhang Z., Ren Z. and Yuille A. Mitigating Adversarial Effects Through Randomization, *Proceedings of the International Conference on Learning Representations*, Toulon, France, 24–26 April 2017, pp. 1–16. DOI: 10.48550/arXiv.1711.01991.
 15. Kwon H., and Lee J. Diversity Adversarial Training against Adversarial Attack on Deep Neural Networks, *Symmetry*, 2021, Vol. 13, No. 3, pp. 1–14, DOI: 10.3390/sym13030428.
 16. Abusnaina A., Wu Y., Arora S. et al. Adversarial example detection using latent neighborhood graph, *2021 IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Montreal, QC, Canada, 10–17 October 2021, pp. 7687–7696. DOI:10.1109/iccv48922.2021.00759.
 17. Li W., Ning X., Ge G., Chen X., Wang Y. and Yang H. FTT-NAS: Discovering Fault-Tolerant Neural Architecture, *2020 25th Asia South Pacific Des. Automat. Conf. (ASP-DAC)*. Beijing, China, 13–16 Jan. 2020. IEEE, 2020, pp. 2011–2016. DOI: 10.1109/asp-dac47756.2020.9045324.
 18. Xu H., Chen Z., Wu W., Jin Z., Kuo S.-Y. and Lyu M. NV-DNN: Towards Fault-Tolerant DNN Systems with N-Version Programming, *2019 49th Annu. IEEE/IFIP Int. Conf. Dependable Syst. Netw. Workshops (DSN-W)*. Portland, OR, USA, 24–27 Jun. 2019. IEEE, 2019, pp. 44–47. DOI: 10.1109/dsn-w.2019.00016.
 19. Javaheripi M. and Koushanfar F. HASHTAG: Hash Signatures for Online Detection of Fault-Injection Attacks on Deep Neural Networks, *2021 IEEE/ACM Int. Conf. Comput. Aided Des. (ICCAD)*. Munich, Germany, 1–4 Nov. 2021. IEEE, 2021, pp. 1–9. DOI: 10.1109/iccad51958.2021.9643556.
 20. Volpi R., Namkoong H., Sener O. et al. Generalizing to unseen domains via adversarial data augmentation, *Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems*. Montréal, QC, Canada, 2–8 December 2018, pp. 1–11. DOI: 10.5555/3327345.3327439.
 21. Kulichenko H. V., Drozdenko O. O., Leontiev P. V. and Hrek V. M. Pressure Regulator for Low Temperature Separation Process, *2021 IEEE 12th Int. Conf. Electron. Inf. Technol. (ELIT)*. Lviv, Ukraine, 19–21 May 2021. IEEE, 2021, pp. 315–319. DOI: 10.1109/ELIT53502.2021.9501143.
 22. An W., Wang H., Sun Q., Xu J., Dai Q. and Zhang L. A PID controller approach for stochastic optimization of Deep Networks, *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2018, Salt Lake City, UT, 18–23 June 2018, pp. 8522–8531. DOI:10.1109/cvpr.2018.00889.
 23. Tian Y., Zhao X. and Huang W. Meta-learning approaches for learning-to-learn in deep learning: A survey, *Neurocomputing*, 2022, Vol. 494, pp. 203–223. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.04.078.
 24. Yang X. and Xu J., Few-shot Classification with First-order Task Agnostic Meta-learning, *2022 3rd International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA)*. Changchun, China, 20–22 May 2022, pp. 2017–2020. DOI:10.1109/cvidliccea56201.2022.9824307.
 25. Song X., Yang Y., Choromanski K. et al. Rapidly Adaptable Legged Robots via Evolutionary Meta-Learning, *2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Las Vegas, NV, USA, 24 October 2020 – 24 January 2021, pp. 3769–3776. DOI:10.1109/iros45743.2020.9341571.
 26. Wheaton M. and Madni Azad M. Resiliency and Affordability Attributes in a System Tradespace, *AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition*, Pasadena, California. Reston, Virginia, 31 Aug-2 Sep 2015. DOI:10.2514/6.2015-4434.
 27. Bansal T., Alzubi S., Wang T., Lee Jay-Yoon and McCallum A., Meta-Adapters: Parameter Efficient Few-shot Fine-tuning through Meta-Learning, *First Conference on Automated Machine Learning*, 2022, 18 p. Available at: <https://openreview.net/pdf?id=bQt8dWksfso>.
 28. Jiang Z., Jiang Z., Mao Ch. et al. Rethinking Efficient Tuning Methods from a Unified Perspective (Version 1), *arXiv*, 2023. DOI:10.48550/ARXIV.2303.00690.
 29. Chen H., Tao R., Zhang H. et al. Conv-Adapter: Exploring Parameter Efficient Transfer Learning for ConvNets (Version 3), *arXiv*, 2022. DOI:10.48550/ARXIV.2208.07463.
 30. Wu N., Hou H., Jia X., Chang X. and Li H. Low-Resource Neural Machine Translation Based on Improved Reptile Meta-learning Method, *Communications in Computer and Information Science*. Singapore, 2021. pp. 39–50. DOI: 10.1007/978-981-16-7512-6_4.
 31. Park S. and So J., On the Effectiveness of Adversarial Training in Defending against Adversarial Example Attacks for Image Classification, *Applied Sciences*, 2020, Vol. 10, No. 22, pp. 1–16. DOI: 10.3390/app10228079.
 32. Kotyan Sh., and Vargas D. Vasconcellos, Adversarial robustness assessment: Why in evaluation both L0 and L ∞ attacks are necessary, *PLOS ONE*, 2022, Vol. 17, No. 4, pp. e0265723, DOI: 10.1371/journal.pone.0265723.
 33. Li G., Pattabiraman K. and DeBardeleben N. TensorFI: A Configurable Fault Injector for TensorFlow Applications, *2018 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*. Memphis, TN, 15–18 October 2018, pp. 1–8. DOI: 10.1109/issrew.2018.00024.
 34. Foldy-Porto T., Venkatesha Y. and Panda P. Activation Density Driven Efficient Pruning in Training, *2020 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR)*, Milan, Italy, 10–15 January 2021, pp. 8929–8936. DOI: 10.1109/icpr48806.2021.9413182.

Received 05.05.2023.
Accepted 31.05.2023.

НЕЗАЛЕЖНИЙ ВІД МОДЕЛІ АЛГОРИТМ МЕТА-НАВЧАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЗІЛЬЄНТНОСТІ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

Москаленко В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Суми, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Задача оптимізації резильєнтності систем штучного інтелекту до деструктивних збурень досі не була повністю вирішена і є досить актуальною для критичних до безпеки застосувань. Задача оптимізації резильєнтності системи штучного інтелекту до збурюючих впливів є високорівневою по відношенню до оптимізації ефективності, що обумовлює перспективність використання ідей і методів мета-навчання для її вирішення. Тому об'єктом дослідження є процес мета-навчання для оптимізації резильєнтності системи штучного інтелекту до деструктивних збурень. Предметом дослідження є архітектурні надстройки та метод мета-навчання, що забезпечують оптимізацію резильєнтності до протиборчих атак, інжекції несправностей і зміни задач.

Мета дослідження – розроблення ефективного методу мета-навчання для оптимізації резильєнтності системи штучного інтелекту до деструктивних збурень.

Методи дослідження. Оптимізація резильєнтності реалізується шляхом поєднання ідей і методів протиборчого навчання, навчання з ін'єкцією несправностей, незалежного від моделі мета-навчання, навчання за обмеженою кількістю зразків, методів градієнтної оптимізації та ймовірнісних стратегій апроксимації градієнту. При цьому вибір архітектурних надстроек базується на ефективному щодо параметрів трансфері знань для економії ресурсів та уникнення проблеми катастрофічного забування.

Результати. Розроблено незалежний від моделі метод мета-навчання для оптимізації резильєнтності систем штучного інтелекту на основі градієнтних мета-оновлень, або мета-оновлень за еволюційною стратегією. При цьому метод передбачає використання тюнерів і мета-тюнерів, що здійснюють паралельну корекцію будівельних модулів (блоків) глибокої нейромережі. На прикладі задачі класифікації зображень експериментально протестовано здатність запропонованого підходу підвищувати ефективність поглинання збурень та підвищувати інтегральний показник резильєнтності системи штучного інтелекту. Експерименти проводились на моделі з архітектурою ResNet-18, з надстройкою у вигляді тюнерів і мета-тюнерів з архітектурою Conv-Adapter. При цьому CIFAR-10 використовується як базовий набір, на якому була навчена модель, а CIFAR-100 використовується як набір для формування вибірок, на яких здійснюють адаптацію за обмеженою кількістю зразків. Порівнюється показники резильєнтності системи штучного інтелекту після попереднього навчання тюнерів і мета-тюнерів за алгоритмом протиборчого навчання, алгоритмом навчання з ін'єкцією несправностей, традиційним алгоритмом незалежного від моделі мета-навчання та за запропонованим методом мета-навчання для оптимізації резильєнтності. Також порівнюються за інтегральним показником резильєнтності алгоритм мета-навчання з мета-градієнтним оновленням та мета-оновленням на основі еволюційної стратегії.

Висновки. Експериментально підтверджено, що запропонований метод забезпечує кращий показник резильєнтності до ін'єкції випадкових інверсій біт порівняно з навчанням з ін'єкцією несправностей в середньому на 5%. Також запропонований метод забезпечує кращий показник резильєнтності до L_{∞} протиборчих атак ухилення порівняно з протиборчим навчанням всередньому на 4.8%. Так само продемонстровано підвищення всередньому на 4.8% резильєнтності до зміни задач порівняно зі звичайною точною настройкою тюнерів. При цьому мета-навчання з еволюційною стратегією забезпечує всередньому більші значення показника резильєнтності, однак попереднє мета-навчання потребує більше ітерацій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мета-навчання, еволюційна стратегія, ефективний стосовно параметрів трансфер знань, робастність, резильєнтність, протиборчі атаки, інжекція несправностей, навчання з декількох зразків.

ЛІТЕРАТУРА

1. Resilience and Resilient Systems of Artificial Intelligence: Taxonomy, Models and Methods / [V. Moskalenko, V. Kharchenko A. Moskalenko, B. Kuzikov] // Algorithms. – 2023. – Vol. 16, No. 3. – P. 1–44. DOI: 10.3390/a16030165.
2. A survey on adversarial attacks and defences / [A. Chakraborty, M. Alam, V. Dey et al.] // CAAI Transactions on Intelligence Technology. – 2021. – Vol. 6, No. 1. – P. 25–45. DOI: 10.1049/cit2.12028.
3. Hoang L.-H. TRe-Map: Towards Reducing the Overheads of Fault-Aware Retraining of Deep Neural Networks by Merging Fault Maps / Le-Ha Hoang, M. Abdullah Hanif, M. Shafique // Digital System Design (DSD) : 24th Euromicro Conference, Palermo, Italy, 1–3 September 2021 : proceedings. – 8 p. DOI: 10.1109/dsd53832.2021.00072.
4. Learning under Concept Drift: A Review / [J. Lu, A. Liu, F. Dong et al.] // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2018. – Vol. 31, No. 12. – P. 2346–2363. DOI: 10.1109/tkde.2018.2876857.
5. Dymond J. Graceful Degradation and Related Fields-ePrints Soton. Welcome to ePrints Soton-ePrints Soton [Electronic resource]. – Access mode: <https://eprints.soton.ac.uk/455349/>.
6. Towards Resilient Artificial Intelligence: Survey and Research Issues / [O. Eigner, S. Eresheim, P. Kieseberg et al.] // Cyber Security and Resilience (CSR) : IEEE International Conference, Rhodes, Greece, 26–28 July 2021 : proceedings. – P. 536–542. DOI: 10.1109/csr51186.2021.9527986.
7. On Fast Adversarial Robustness Adaptation in Model-Agnostic Meta-Learning / [R. Wang, K. Xu, S. Liu, Pin-Yu Chen et al.] // ArXiv. – Vol. abs/2102.10454. – 2021. – P. 1–16. DOI: 10.48550/arXiv.2102.10454.
8. Rapidly Adaptable Legged Robots via Evolutionary Meta-Learning / [X. Song, Y. Yang, K. Choromanski et al.] // Intelligent Robots and Systems (IROS) : IEEE/RSJ International Conference, Las Vegas, NV, USA, 24 October 2020 – 24 January 2021 : proceedings. – P. 1–11. DOI: 10.1109/iros45743.2020.9341571.
9. Parameter-efficient fine-tuning of large-scale pre-trained language models / [N. Ding, Y. Qin, G. Yang et al.] // Nature Machine Intelligence. – 2023. – Vol. 5. – P. 220–235. DOI: 10.1038/s42256-023-00626-4.

10. Fraccascia L. Resilience of Complex Systems: State of the Art and Directions for Future Research / L. Fraccascia, I. Giannoccaro, V. Albino // *Complexity*. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–44 DOI: 10.1155/2018/3421529.
11. Development of Models in Resilient Computing / [O. Drozd, V. Kharchenko, A. Rucinski et al.] // *Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)* : 10th International Conference, Leeds, United Kingdom, 5–7 June 2019 : proceedings. – P. 1–6. DOI: 10.1109/dessert.2019.8770035.
12. Trade-offs Among Resilience, Robustness, Stability, and Performance and How We Might Study Them / [Brian D. Inouye, Berry J. Brosi, Emily H. Le Sage, M. T. Lerdau] // *Integrative and Comparative Biology*. – 2021. – Vol. 61, No. 6. – P. 2180–2189. DOI:10.1093/icb/icab178.
13. Speeding Up Recovery from Concept Drifts / [S. G. Teixeira de Carvalho Santos, P. M. Gonçalves Júnior, G. D. dos Santos Silva et al.] // *Machine Learning and Knowledge Discovery in Databases*. – Berlin, Heidelberg, 2014 : proceedings. – P. 179–194. DOI: 10.1007/978-3-662-44845-8_12.
14. Mitigating Adversarial Effects Through Randomization / [C. Xie, J. Wang, Z. Zhang et al.] // *Learning Representations : International Conference, Toulon, France, 24–26 April 2017* : proceedings. – Openreview.net, 2017. – P. 1–16. DOI: 10.48550/arXiv.1711.01991.
15. Kwon H. Diversity Adversarial Training against Adversarial Attack on Deep Neural Networks / H. Kwon, J. Lee // *Symmetry*. – 2021. – Vol. 13, no. 3. – P. 1–14. DOI: 10.3390/sym13030428.
16. Adversarial Example Detection Using Latent Neighborhood Graph / [A. Abusnaina, Y. Wu, S. Arora et al.] // *Computer Vision (ICCV) : IEEE/CVF International Conference, Montreal, QC, Canada, 10–17 October 2021* : proceedings. – P. 7687–7696. DOI: 10.1109/iccv48922.2021.00759.
17. FTT-NAS: Discovering Fault-Tolerant Neural Architecture / [W. Li, X. Ning, X. Ning et al.] // *2020 25th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC)*, Beijing, China, 13–16 January 2020 : proceedings. – P. 2011–2016. DOI: 10.1109/asp-dac47756.2020.9045324.
18. NV-DNN: Towards Fault-Tolerant DNN Systems with N-Version Programming / [H. Xu, Zh. Chen, W. Wu et al.] // *Dependable Systems and Networks Workshops (DSN-W) : 49th Annual IEEE/IFIP International Conference, Portland, OR, USA, 24–27 June 2019* : proceedings. – P. 44–47. DOI: 10.1109/dsn-w.2019.00016.
19. Javaheripi M. HASHTAG: Hash Signatures for Online Detection of Fault-Injection Attacks on Deep Neural Networks / M. Javaheripi, F. Koushanfar // *Computer Aided Design (ICCAD) : IEEE/ACM International Conference, Munich, Germany, 1–4 November 2021* : proceedings. – P. 1–9. DOI: 10.1109/iccad51958.2021.9643556.
20. Generalizing to unseen domains via adversarial data augmentation / [R. Volpi, H. Namkoong, O. Sener et al.] // *Neural Information Processing Systems : 32nd International Conference, Montréal, QC, Canada, 2–8 Dec. 2018* : proceedings. – P. 1–11. DOI: 10.5555/3327345.3327439.
21. Pressure Regulator for Low Temperature Separation Process / [H. V. Kulichenko, O. O. Drozdenko, P. V. Leontiev et al.] // *Electronics and Information Technologies (ELIT) : IEEE 12th International Conference, Lviv, Ukraine, 19–21 May 2021* : proceedings. – IEEE, 2021. – P. 315–319. DOI: 10.1109/ELIT53502.2021.9501143.
22. A PID Controller Approach for Stochastic Optimization of Deep Networks / [W. An, H. Wang, Q. Sun et al.] // *Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) : IEEE/CVF Conference, Salt Lake City, UT, 18–23 June 2018* : proceedings. – IEEE, 2018. – P. 8522–8531. DOI: 10.1109/cvpr.2018.00889.
23. Tian Y. Meta-learning approaches for learning-to-learn in deep learning: A survey / Y. Tian, X. Zhao, W. Huang // *Neurocomputing*. – 2022. – Vol. 494. – P. 203–223. DOI: 10.1016/j.neucom.2022.04.078.
24. Yang X. Few-shot Classification with First-order Task Agnostic Meta-learning / X. Yang, J. Xu // *Computer Vision, Image and Deep Learning & International Conference on Computer Engineering and Applications (CVIDL & ICCEA) : 3rd International Conference, Changchun, China, 20–22 May 2022* : proceedings. – Los Alamitos, IEEE, 2022. – P. 2017–2020 DOI:10.1109/cvidliccea56201.2022.9824307.
25. Rapidly Adaptable Legged Robots via Evolutionary Meta-Learning / [X. Song, Y. Yang, K. Choromanski et al.] // *Intelligent Robots and Systems (IROS) : IEEE/RSJ International Conference, Las Vegas, NV, USA, 24 October 2020 – 24 January 2021* : proceedings. – P. 3769–3776. DOI:10.1109/iro545743.2020.9341571.
26. Wheaton M. Resiliency and Affordability Attributes in a System Tradespace / M. Wheaton, Azad M. Madni // *AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, Pasadena, California, 31 Aug-2 Sep., 2015* : proceedings. DOI:10.2514/6.2015-4434.
27. Meta-Adapters: Parameter Efficient Few-shot Fine-tuning through Meta-Learning / [T. Bansal, S. Alzubi, T. Wang et al.] // *Automated Machine Learning : First Conference* : proceedings. – 2022. – P. 18. – Access mode : <https://openreview.net/pdf?id=bQt8dWksfso>.
28. Rethinking Efficient Tuning Methods from a Unified Perspective (Version 1) / [Z. Jiang, Z. Jiang, Ch. Mao et al.] // *arXiv*. – 2023. DOI:10.48550/ARXIV.2303.00690.
29. Conv-Adapter: Exploring Parameter Efficient Transfer Learning for ConvNets (Version 3) / [H. Chen, R. Tao, H. Zhang et al.] // *arXiv*. – 2022. – DOI:10.48550/ARXIV.2208.07463.
30. Low-Resource Neural Machine Translation Based on Improved Reptile Meta-learning Method / [N. Wu, H. Hou, X. Jia et al.] // *Communications in Computer and Information Science*. – Singapore, 2021. – P. 39–50. DOI: 10.1007/978-981-16-7512-6_4.
31. Park S. On the Effectiveness of Adversarial Training in Defending against Adversarial Example Attacks for Image Classification / S. Park, J. So // *Applied Sciences*. – 2020. – Vol. 10, no. 22. – P. 1–16. – DOI: 10.3390/app10228079.
32. Kotyan Sh. Adversarial robustness assessment: Why in evaluation both L0 and L∞ attacks are necessary / Sh. Kotyan, D. Vasconcellos Vargas // *PLOS ONE*. – 2022. – Vol. 17, no. 4. – P. e0265723. DOI: 10.1371/journal.pone.0265723.
33. Li G. TensorFI: A Configurable Fault Injector for TensorFlow Applications / G. Li, K. Pattabiraman, N. DeBardleben // *Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW) : IEEE International Symposium, Memphis, TN, 15–18 October 2018* : proceedings. – Los Alamitos, IEEE, 2018. – P. 1–8. DOI: 10.1109/issrew.2018.00024.
34. Foldy-Porto T. Activation Density Driven Efficient Pruning in Training / T. Foldy-Porto, Y. Venkatesha, P. Panda // *Pattern Recognition (ICPR) : 25th International Conference, Milan, Italy, 10–15 January 2021* : proceedings – P. 8929–8936. DOI: 10.1109/icpr48806.2021.9413182.

ВИДАЛЕННЯ КОМПОНЕНТІВ ДОЩУ З ОДИНОЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕКУРЕНТНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Петров К. Е. – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних управляючих систем, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Кириченко В. В. – магістр кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Видалення небажаних наслідків дощових ефектів з одиночних зображень є актуальною проблемою в багатьох задачах комп'ютерного зору, оскільки смуги дощу можуть суттєво погіршувати візуальну якість зображень та серйозно перешкоджати роботі різноманітних інтелектуальних систем, які використовуються для їх обробки та подальшого аналізу.

Мета роботи полягає у розробці методу виявлення і видалення небажаних наслідків впливу ефекту дощу з одиночних зображень, який базується на використанні згорткової нейронної мережі з рекурентною структурою.

Метод. Головною складовою запропонованого методу є згорткова нейронна мережа, яка має рекурентну багатоетапну структуру. Особливістю саме такої архітектури мережі є використання повторюваних блоків (шарів), на виході яких можна отримати проміжний результат «очищення» вихідного зображення. Причому на виході кожного наступного шару мережі отримуємо зображення з меншим впливом компонентів дощу ніж на попередньому. Кожен шар мережі містить дві незалежні підмережі (гілки) для паралельної обробки зображення. Головна гілка призначена для виявлення і видалення ефекту дощу з зображення, а гілка уваги використовується для покращення і пришвидшення процесу виявлення небажаних компонентів дощу (для формування карти уваги дощу).

Результати. Розроблено підхід до автоматичного виявлення та видалення наслідків впливу ефекту дощу з одиночних зображень. Процес «очищення» вихідного зображення здійснюється на основі використання згорткової нейронної мережі з рекурентною структурою, навчання якої було проведено на наборах даних Rain100H і Rain100L. Наведено результати комп'ютерних експериментів, які свідчать про ефективність та доцільність використання запропонованого методу для вирішення практичних завдань з попередньої обробки «забруднених» зображень.

Висновки. Перевагою розробленого методу видалення небажаних компонентів дощу з зображень є те, що рекурентна багатоетапна архітектура мережі, на якій він базується, дозволяє потенційно застосовувати його для вирішення завдань в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Запропонований метод може бути успішно використаний при розробці інтелектуальних систем для моніторингу територій за допомогою камер спостереження, автономного керування транспортними засобами, обробки результатів аерофотозйомки тощо. В перспективі слід розглянути можливість формування окремої підмережі для усунення розмитості на зображенні та провести навчання мережі на наборах даних, які містять зразки зображень з різними компонентами дощу, що зробить метод більш «стійким» до різних форм ефекту дощу і підвищить якість «очищення» зображень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: обробка зображень, ефект дощу, смуги дощу, глибинне навчання, згорткова нейронна мережа, механізм уваги.

АБРЕВІАТУРИ

CNN – convolutional neural network (згорткова нейронна мережа);

GAN – generative adversarial network (генеративна змагальна мережа);

LSTM – long short-term memory (довга короткострокова пам'ять);

MAE – mean absolute error (середня абсолютна похибка);

MSE – mean squared error (середня квадратична похибка);

PSNR – peak signal-to-noise ratio (співвідношення пікового рівня сигналу до шуму);

RAB – residual attention block (залишковий блок уваги);

ReLU – rectified linear units (зрізаний лінійний вузол);

RNN – recurrent neural network (рекурентна нейронна мережа);

SSIM – structural similarity index measure (індекс структурної подібності).

НОМЕНКЛАТУРА

a_i – підсумкова карта уваги зображення i на етапі t ;

F – «чистий» фон зображення;

L – функція загальних втрат;

L_M – функція втрат для головної гілки;

L_{SSIM} – функція втрат структурної подібності для головної гілки;

L_A – функція втрат гілки уваги;

m_i – бінарна карта регіонів дощу зображення i ;

N – кількість зображень;

P – зображення з ефектом дощу;

R – компоненти дощу (смуги чи краплі дощу або туман);

y_{ti} – вихід мережі на останньому етапі t (передбачене зображення i);

\tilde{y}_i – цільове «чисте» зображення i ;

$\|\cdot\|_1$ – L_1 -норма;

$\|\cdot\|_2$ – L_2 -норма.

ВСТУП

Серед наслідків природного впливу на зображення можна виокремити ефект дощу. Це можуть бути окремі краплі на об'єктиві камери, що зафіксовані на зображенні; рідкі чи навпаки щільні смуги (краплі в момент руху) дощу або ефект туману на задньому фоні.

Наявність смуг або крапель дощу на зображеннях та відео часто є небажаним. Негативний вплив ефекту дощу найбільш відчутний у сферах, які мають справу із обробкою зображень, що отримані зовні, наприклад, з камер зовнішнього спостереження, транспортних засобів, дронів, супутників тощо.

Задача виявлення та компенсації ефекту дощу є частиною більш глобальної проблеми «очищення» зображень від наслідків впливу погодних умов, таких як дощ, сніг або туман, яка в свою чергу відноситься до задач попередньої обробки.

Сам ефект дощу може по-різному впливати на зображення.

Це, по-перше, смуги дощу, які представляють собою краплі в момент руху, і перекривають об'єкти позаду, а щільні смуги можуть значною мірою закрити собою задній фон зображення. Їх побічним ефектом, у зв'язку з проходженням крізь них світла, є суттєве збільшення інтенсивності пікселів, які перекриваються краплями. По-друге, ефект туману або димки на задньому фоні, який виникає, коли густі смуги не можна відрізнити одна від одної на великій відстані від камери, що створює враження «зашумленості» та суттєво зменшує загальну контрастність зображення. По-третє, це наявність окремих крапель на об'єктиві камери, які також можуть значно перекривати об'єкти позаду і спотворювати зображення через переломлення світла крізь центральну частину краплі.

Тому для широкого спектру практичних застосувань потрібні ефективні методи видалення описаних вище компонентів дощу.

Методи для виявлення і видалення наслідків впливу ефекту дощу можна розділити на два основні класи [1]: підходи, які опрацюють послідовність кадрів (відео) і підходи, які застосовуються для обробки одиночних зображень. В методах для обробки відео активно використовується припущення про те, що серед всієї послідовності кадрів є хоча б один кадр, який не містить наслідків впливу дощу на конкретному пікселі або навіть області пікселів. Обробка одиночних зображень вважається більш складною задачею тому, що методи не можуть використовувати динаміку дощу, тобто його так звану «часову надлишковість», на відміну від методів обробки відео. Для опрацювання одиночних знімків використовують просторову інформацію сусідніх пікселів і візуальні властивості дощу та фону.

Роботу присвячено проблемі обробки саме одиночних зображень.

Незважаючи на наявність великої кількості існуючих методів щодо компенсації небажаного впливу ефекту дощу на зображеннях [1, 2] це завдання ще © Петров К. Е., Кириченко В. В., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-10

далеке від свого остаточного вирішення. Тому розробка нових методів для більш «якісної» та швидкої обробки «забруднених» небажаними компонентами дощу зображень є дуже актуальною.

Об'єктом дослідження є процес автоматичного виявлення і видалення наслідків впливу погодних ефектів при обробці зображень.

Предметом дослідження є методи виявлення і компенсації ефекту дощу при обробці одиночних зображень.

Мета роботи полягає у розробці методу виявлення і видалення небажаних наслідків впливу ефекту дощу з одиночних зображень, який базується на використанні апарату згорткових нейронних мереж з рекурентною структурою.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вихідною інформацією для вирішення задачі виявлення та видалення небажаних компонентів дощу є деяке одиночне зображення P , що задане в форматі RGB.

Формалізовану модель «забрудненого» зображення P можна представити як накладання сцени F з «чистим» фоном і деяких компонентів дощу R (смуг чи крапель дощу або туману) у такому вигляді: $P = F + R$.

Компоненти дощу R , що накопичуються по всій сцені, зменшують видимість фону F .

Зображення P , що отримані в реальних умовах дощу суттєво ускладнюють їх подальшу обробку і, як наслідок, знижують продуктивність роботи алгоритмів комп'ютерного зору.

Задача полягає у вирішенні цієї проблеми, тобто у візуальному видаленні небажаних компонентів дощу R та перетворенні зображення з ефектом дощу P на «чисте» – F .

Основними проблемами на шляху успішного вирішення цього завдання є те, що по-перше, спочатку не задаються області, які закриті компонентами дощу, а по-друге, інформація про фонову сцену закритих регіонів в більшості випадків невідома. Також труднощі виникають коли структура та орієнтація об'єктів на зображенні схожі на компоненти дощу (смуги чи краплі). В цьому випадку важко одночасно видалити дощ і зберегти структуру зображення.

Для вирішення задачі виявлення та видалення небажаних компонентів дощу в роботі пропонується застосувати згорткову нейронну мережу з рекурентною багатоетапною структурою.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Методи виявлення і компенсації ефекту дощу, що використовуються для обробки одиночних зображень можна поділити на два основні класи: підходи на основі моделі (методи, в яких не застосовується глибинне навчання) і підходи на основі даних [1].

Методи, що базуються на використанні моделі [1, 2], зазвичай покладаються на статистичний аналіз

проявів ефекту дощу (крапель, смуг, туману) та фонових сцен зображень. В них використовуються попередньо сформовані припущення, вводиться функція втрат і потім проводиться її оптимізація. Часто такі методи спираються на синтез певної математичної моделі, яка містить в собі фізичні властивості обраного виду ефекту дощу.

Серед підходів до вирішення завдання виявлення і видалення наслідків впливу ефекту дощу з одиночних зображень на основі моделі можна виділити дві базові стратегії: по-перше, це застосування керованих фільтрів (Guided Filter), а, по-друге, це використання попередньої інформації (Prior Information), яка у свою чергу також поділяється на кілька підкласів, серед яких можна виокремити групу методів розрідженого кодування і змішаних Гаусових моделі [1].

Методи із застосуванням керованого фільтра [1] зазвичай спочатку використовують хроматичну властивість смуг дощу, щоб отримати «грубий» фон. Після цього «грубий» фон використовують для фільтрації вхідного зображення з ефектом дощу, щоб у підсумку отримати відповідне зображення без нього. Наприклад, у роботі [3] була запропонована стратегія багатонаправленої фільтрації для видалення ефектів снігу чи дощу з одиночного зображення.

Методи на основі розрідженого кодування [1] використовують представлення вхідних векторів як розріджену лінійну комбінацію базисних векторів. Набір таких базисних векторів називається словником, який використовується для відновлення певного типу сигналів, наприклад сигналів смуг дощу або сигналів фону. З розрідженим кодуванням пов'язана спроба виявлення і компенсації ефекту дощу для одиночного зображення шляхом декомпозиції зображення за допомогою аналізу морфологічних компонентів [4]. Більш досконалий метод представлений в [5]. В ньому було запропоновано ввести властивість взаємовиключності в дискримінаційне розріджене кодування, з метою більш точного відокремлення шарів дощу і фону. Для поліпшення результатів в [6] було запропоновано побудувати ітераційний процес розділення шарів зображення для видалення смуг дощу з фоновому шару і видалення деталей фонові текстури з шару смуг дощу.

Змішана Гаусова модель представляє собою ймовірнісну модель, в якій передбачається, що всі зразки даних згенеровані із кінцевого набору розподілів Гауса з невідомими параметрами. Таку змішану модель застосовують для моделювання як дощу, так і фоновому шару [7]. Змішана модель фоновому шару попередньо отримується з реальних зображень із різноманітними фоновими сценами. Змішана модель дощу формується на основі обраної області дощу з вхідного зображення, яка не має фонових текстур.

В цілому можна зробити висновок, що методи на основі моделі демонструють відносно непогані результати для зображень зі смугами дощу різних напрямків та розмірів, але погано обробляють ефект туману (наявність накопичення щільних смуг дощу на © Петров К. Е., Кириченко В. В., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-10

відстані), що значно обмежує можливості їх використання.

В теперішній час більш активно розвиваються підходи на основі даних. Суть таких методів полягає у застосуванні апарату глибоких нейронних мереж, і як наслідок, у необхідності тренування моделей на наборах даних, звідки і пішла назва даного класу. Серед них можна виділити групу методів, які використовують навчання з вчителем (Supervised Learning). До цієї групи відносять методи [1, 2], що базуються на використанні: CNN; RNN та багатоетапних структур (Multi-Stage Framework); моделей з мультимасштабною архітектурою (Multi-Scale Architecture); мереж з архітектурою типу «енкодер-декодер» (Encoder-Decoder Module); GAN. Окремо виділяють методи [1, 2], в яких використовується напівавтоматичне навчання (Semi-supervised Learning) та навчання без вчителя (Unsupervised Learning), а також різноманітні гібридні моделі, які одночасно використовують обидва підходи: як ті, що засновані на моделях, так і ті, що базуються на даних.

Розробка методів, що базуються на використанні CNN складає значну частину досліджень в галузі виявлення і видалення наслідків ефекту дощу. Однією з перших робіт, в якій використовувалася CNN була [8]. В ній описано застосування відносно неглибокої (трьохшарової) згорткової мережі для видалення з зображення бруду та крапель води з об'єктива камери чи скла. Пізніше, в [9] була представлена модель DerainNet на базі CNN, особливістю якої було розділення зображення на базовий (фоновий) шар і шар деталей. В [10] запропоновано глибоку мережу деталізації DDN (DetailNet) на основі ідеї глибокої залишкової мережі ResNet [11]. Недоліком цих методів є не достатньо гарні результати, що отримані на зображеннях з великими та щільними смугами дощу. Роботу [12] присвячено розробці методу виявлення і видалення дощу з урахуванням його щільності за допомогою багатопотокової щільної мережі DID-MDN, особливістю якої є опрацювання зображень з різними рівнями щільності смуг дощу. В [13] пропонується ідея використання просторової уважної мережі SPA-Net. Ці методи демонструють гарні результати у видаленні смуг дощу, але недостатньо якісно обробляють ефект накопичення дощу (ефект туману).

Головною особливістю рекурентних та багатоетапних структур [1, 2] є наявність окремих етапів обчислень всередині мережі. Архітектура таких моделей складається з повторюваних блоків, а наприкінці кожного етапу можна отримати проміжний вихід мережі, що дозволяє потенційно застосовувати ці методи для вирішення завдань з обмеженими обчислювальними ресурсами, оскільки можна відносно гнучко регулювати кількість ітерацій, тому що кожна наступна ітерація дає зображення з меншим впливом дощу, ніж попередня. Розглянемо найбільш відомі методи цієї групи. Це мережа для виявлення та видалення дощу JORDER [14, 15] та її модифікація JORDER-E [16], які дають гарні результати у випадку з щільними

смугами і накопиченням дощу, однак інколи можуть помилково видалити вертикальні текстури. Моделі для поступового видалення смуг дощу RESCAN [17], PRN та PReNet [18] які показують гарні результати на зображеннях зі смугами дощу різних напрямків та щільності, але недостатньо ефективно оброблюють накопичення дощу, а також інколи можуть розмивати фонові деталі зображення.

Ще одним напрямком досліджень є багатомасштабне навчання, суттю якого є одночасне використання різних масштабів зображення для виконання потрібної задачі. Наприклад, у роботі [19] пропонується розкласти задачу відновлення зображення на кілька підзадач за допомогою мережі LPNet. Головною перевагою методу є доволі високі показники його ефективності та відносна «легкість» моделі (близько 8 тис. параметрів), хоча за кількісними показниками LPNet поступається більш «важким» моделям, наприклад, такій як JORDER (більше 4 млн. параметрів).

Методи, що використовують архітектуру «енкодер-декодер» [2] гарно проявили себе в різних задачах обробки зображень. В цій архітектурі енкодер – мережа, яка приймає вхідні дані та виводить на їх основі карту (вектори) ознак. Декодер також є мережею, яка приймає на вхід вектор ознак від енкодера та забезпечує відповідність між виходом мережі і цільовим значенням. Наприклад, в роботі [20] представлено глибинну мережу DAF-Net з архітектурою такого типу, яка успішно справляється з видаленням як смуг, так і ефектів накопичення дощу, але іноді дещо розмиває фонові деталі.

Багато досліджень у галузі виявлення і компенсації ефекту дощу на зображеннях пов'язані з використанням GAN. Типова архітектура GAN складається з двох частин: генератора та дискримінатора, де дискримінатор намагається оцінити, чи є виданий генератором результат справжнім або фальшивим. Така реакція дискримінатора забезпечує додатковий зворотний зв'язок для оптимізації параметрів генератора для отримання візуально прийнятних результатів. В роботі [21] для вирішення проблеми застосовують умовну генеративну змагальну мережу ID-CGAN, яка складається з щільно-зв'язного генератора і багатомасштабного дискримінатора. Метод непогано видаляє смуги і накопичення дощу, але не завжди ефективно обробляє зображення зі смугами різної щільності та іноді може генерувати візуальні артефакти. В [22] представлено генеративну мережу з механізмом уваги для обробки ефекту саме щільно накопичених дощових крапель AttGAN. Тому його застосування для видалення смуг або накопичення дощу є доволі обмеженим.

Попри усі переваги і високу ефективність обробки зображень із різними типами дощових ефектів, розглянуті вище методи потерпають від обмежень парадигми навчання з вчителем. Їх основною проблемою є використання великої кількості тренувальних зразків, що значно збільшує трудомісткість процесу. Крім того, в більшості таких підходів використовується навчання на синтетичних зразках, що обмежує їх зда-
© Петров К. Е., Кириченко В. В., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-10

тність до узагальнення при обробці реальних зображень.

Для вирішення проблем, які пов'язані із використанням парадигми навчання з вчителем, застосовуються підходи на основі навчання без вчителя та напівавтоматичного навчання. Так, наприклад, в [23] представлено GAN для виявлення і компенсації ефекту дощу без вчителя UD-GAN, яка базується на введенні обмежень самонавчання і внутрішніх ознак, що отримані із непарних «чистих» зображень без дощу і «забруднених» зображень із наслідками ефекту дощу. Цей метод демонструє можливість виявляти і видаляти небажані наслідки дощу із зображень, але інколи може втрачати деякі деталі або генерувати візуальні артефакти особливо у випадках зі щільними смугами або накопиченням дощу.

У підходах, що базуються на напівавтоматичному навчанні достатньо поширеними є методи з одночасним використанням синтезованих парних і реальних непарних даних. Така стратегія хоча і зменшує витрати на отримання даних і знижує вплив перенавчання на синтезованих даних, але не завжди демонструє прийнятні результати при обробці реальних зображень.

Аналіз публікацій показує, що проблема виявлення і компенсації ефекту дощу є вельми актуальною та ще далека від свого остаточного вирішення. Використання для вирішення цієї проблеми численних різноманітних підходів, історію розвитку і детальний огляд яких представлено в [1, 2], спричинене бажанням дослідників розробити «універсальний» метод для видалення з зображень небажаних компонентів дощу різних видів. Тому розробка нових більш ефективних методів «очищення» зображень є достатньо актуальною.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Рекурентні та багатоетапні структури попри існуючі недоліки непогано зарекомендували себе у вирішенні завдань виявлення та видалення наслідків ефекту дощу. Їх головною перевагою над іншими методами є поступовість, тобто, на кожному етапі можна отримати проміжний результат, який з кожною наступною стадією буде покращуватися. Тому саме цей підхід до побудови структури штучної нейронної мережі було обрано в якості основи для розробки методу виявлення і компенсації ефекту дощу.

Розглянемо архітектуру мережі більш детально.

Мережа представляє собою рекурентну структуру, яка на кожному етапі здатна видавати повноцінний результат – «чисте» зображення без наслідків ефекту дощу. Кожен шар мережі складається з головної гілки, яка використовується для виявлення і видалення ефекту дощу та гілки уваги (Attention Branch), що призначена для покращення і пришвидшення процесу виявлення. Гілка уваги застосовується для формування карти уваги дощу, яка далі надходить до головної гілки. При цьому головна гілка ніяким чином не впливає на гілку уваги: обидві гілки на вхід отримують вхідне зображення (для першого етапу) або про-

міжний результат (для подальших етапів). Це забезпечує певний рівень автономності роботи обох підмереж і чіткіше визначає роль гілки уваги, як допоміжної підмережі.

Розгорнуте представлення загальної архітектури мережі наведено на рис. 1 (сірим кольором виділені межі одного окремого шару мережі). Головна гілка складається з шару згортки Conv з функцією нелінійного перетворення ReLU, шару LSTM, п'яти блоків RAB та вихідного шару згортки Conv.

У підсумку ця підмережа формує карту уваги, яка являє собою одноканальну матрицю зі значеннями у діапазоні [0, 1]. Вона вказує на просторовий розподіл дощу та використовується для керування процесом виявлення і видалення ефекту дощу у залишкових блоках уваги.

На вхід гілки уваги подається конкатенація проміжного результату попереднього етапу (трьохканальне зображення у форматі RGB) і значення попередньої маски (одноканальна матриця з такими ж просторовими розмірами) (рис. 1). Окремим випадком є перший етап: вхід для підмережі уваги формується з вхідного зображення і одноканальної матриці, заповненої значеннями 0,5.

Шар LSTM використовується для поширення ознак і їх взаємозалежностей між різними етапами для полегшення видалення смуг дощу. Залишкові блоки уваги виокремлюють потрібні в подальшому ознаки, керуючись картою уваги, отриманою від гілки уваги. Тобто, на вихід RAB впливає не лише вихід попереднього шару, а й результат, який отримано від гілки уваги. Також потрібно відмітити особливість залишкового навчання цієї мережі: вихідний шар згортки формує зображення, яке відповідає від'ємному шару дощу. Після додавання вхідного зображення на виході отримуємо «чисте» зображення без наслідків ефекту дощу.

Гілка уваги представляє собою окрему підмережу (рис. 2). Вона складається із шару згортки Conv з подальшим застосуванням функції ReLU. Далі йдуть п'ять залишкових блоків (Residual Block) та вихідний шар згортки Conv.

Ця гілка потрібна для захоплення просторової контекстної інформації з метою виділення ознак дощу:

смуг різного напрямку та щільності, крапель різної форми і т. п.

Приклади вхідного зображення з наявним ефектом дощу та візуалізація відповідної йому карти уваги з останнього етапу наведені на рис. 3.

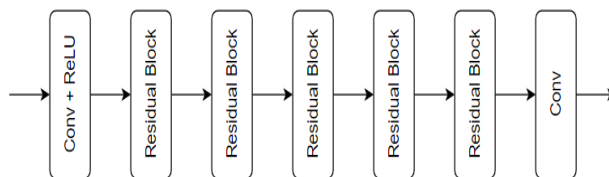


Рисунок 2 – Архітектура гілки уваги



Рисунок 3 – Приклад вхідного зображення і відповідної йому карти уваги

Таким чином, гілка уваги дозволяє приблизно ідентифікувати регіони, що пошкоджені наслідками ефекту дощу. Через відносно просту структуру підмережі пряме використання отриманих карт може бути неефективним, оскільки крім областей дощу вони також можуть виділяти окремі деталі фонових текстур. Тому запропонована мережа застосовує карти уваги лише як додаткову інформацію для прискорення процесу виявлення регіонів дощу головною гілкою.

Головна підмережа містить в собі п'ять послідовних блоків RAB, кожен з яких складається з двох послідовних шарів згортки Conv і застосування функції ReLU та ще одного шару Conv, після якого отриманий результат перемножується з картою уваги (Attention map), яка надходить від гілки уваги. Далі до результату додається вхід блоку шляхом використання пропу-

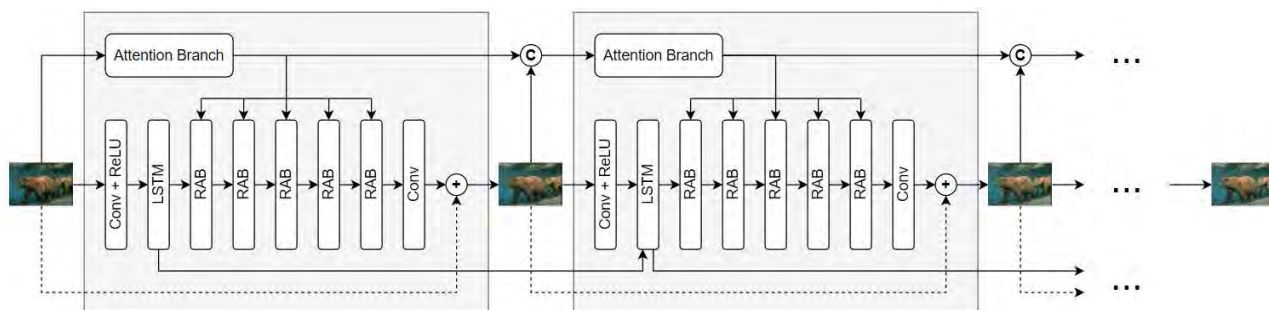


Рисунок 1 – Загальна архітектура запропонованої мережі

ського з'єднання. Після цього на виході ще раз застосовується функція ReLU (рис. 4). Також особливістю архітектури блоку є те, що друга згортка має коефіцієнт розширення, який дорівнює 2. Збільшення коефіцієнту допомагає охоплювати більший контекст інформації і, як наслідок, демонструвати вищу ефективність при однаковій глибині мережі.

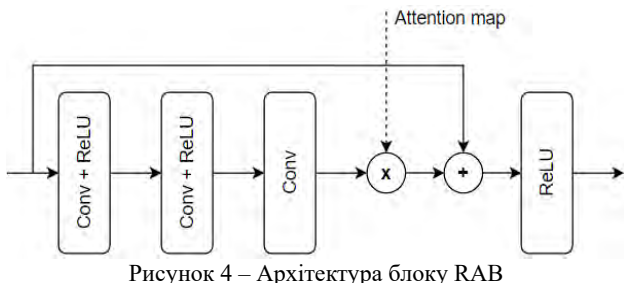


Рисунок 4 – Архітектура блоку RAB

Цей блок виокремлює ознаки, що необхідні для виявлення областей дощу та їх подальшого видалення. Після третьої згортки отримані ознаки перемножуються з картою уваги (рис. 4). Оскільки карта містить значення у діапазоні $[0, 1]$, це можна інтерпретувати як послаблення ознак, які на думку гілки уваги, не відносяться до регіонів дощу. Тим самим підмережа уваги регулює результат головної гілки.

Розглянемо тепер процес навчання запропонованої мережі.

Як було зазначено вище, особливістю запропонованої мережі є її рекурентна, поступова природа, а також наявність двох паралельних гілок обчислень. Це спонукає до формування комбінованої функції загальних втрат, яка б враховувала результати, що отримані від обох підмереж, з метою її подальшої мінімізації. Тому функцію загальних втрат L пропонується обчислювати за формулою:

$$L = L_M + L_{SSIM} + L_A. \quad (1)$$

Функція втрат L_M використовуються для вимірювання точності піксельного відновлення і дорівнює значенню MAE між виходом мережі і цільовими «чистими» зображеннями без ефекту дощу. Для мережі з t етапами, проміжними виходами y_1, y_2, \dots, y_{t-1} і кінцевим виходом y_t , функція L_M розраховується за формулою:

$$L_M = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|y_{t_i} - \tilde{y}_i\|_1.$$

Значення L_{SSIM} використовується для регулювання структурної подібності між кінцевим виходом мережі y_{t_i} і цільовим зображенням \tilde{y}_i , $i = \overline{1, N}$ та обчислюється на основі індексу SSIM [25] таким чином:

$$L_{SSIM} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - SSIM(y_{t_i}, \tilde{y}_i)).$$

На відміну від піксельного порівняння з використанням MSE або MAE, індекс SSIM відображує ступінь подібності зображень як комбінацію трьох факторів: структури текстур, яскравості та контрасту. Ця особливість SSIM дозволяє краще оцінювати схожість з точки зору візуального сприйняття зображення людиною.

Для оптимізації параметрів гілки уваги застосовується функція втрат L_A . Її значення обчислюється, як піксельна різниця між підсумковою картою уваги a_t на етапі t та бінарною картою регіонів дощу m за допомогою MSE таким чином:

$$L_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|a_{t_i} - m_i\|_2^2.$$

Бінарна карта регіонів дощу – це матриця, що містить значення 0 та 1, де 1 вказує на те, що даний піксель «покритий» дощем, а 0 вказує на те, що піксель «чистий». Така бінарна карта може обчислюватися шляхом визначення порогової різниці між зображенням з дощем та «чистим» зображенням або напряму братися з набору даних, якщо він надає таку можливість. Приклад бінарної карти регіонів дощу для зображення представлений на рис. 5.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В якості наборів даних для проведення експериментальних досліджень були використані датасети Rain100H та Rain100L [14]. Обидва набори є синтезованими, але мають різні кількісні та якісні характеристики.



Рисунок 5 – Зображення та відповідна йому бінарна карта регіонів дощу

Набір Rain100H містить 1800 зображень різного розміру та пропорцій для навчання та 100 зображень для тестування з п'ятьма напрямками смуг дощу. В наборі Rain100L міститься 200 зображень для навчання та 100 зображень для тестування, але лише з одним типом смуг дощу. Обидва датасети крім синтезованих зображень з дощем і «чистих» оригіналів також містять бінарні карти регіонів дощу, які використовувалися під час тренування мережі.

Для практичної реалізації запропонованого підходу були використані мова програмування Python, фреймворк машинного навчання PyTorch, бібліотеки для обробки зображень OpenCV та scikit-image. Навчання мережі відбувалося з використанням можливостей хмарної платформи Google Colaboratory.

Як було зазначено вище, запропонована мережа складається з головної гілки і гілки уваги. Гілка уваги має такі параметри: кількість вхідних, прихованих та вихідних каналів. В запропонованій архітектурі гілка уваги приймає чотирьохканальну матрицю, а на виході отримує одноканальну. Для дотримання балансу між розміром моделі, часом її навчання і ефективністю роботи мережі було вирішено використати 32 приховані канали як для гілки уваги, так і для всіх інших модулів. В якості шару згортки використана стандартна згортка розміром 3×3 . Гілка уваги містить в собі п'ять залишкових блоків зі стандартними згортками розміром 3×3 . Головна гілка в свою чергу містить п'ять залишкових блоків уваги, в яких стандартна згортка 3×3 з коефіцієнтом розширення, що дорівнює 1 чергується зі згорткою з коефіцієнтом 2.

Повна мережа, що використовується для вирішення завдання виявлення і компенсації ефекту дощу для одиночних зображень включає в себе усі вищеописані модулі. Її параметрами є: кількість етапів та число прихованих каналів. Оптимальними значеннями для цих параметрів є 6 та 32 відповідно.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для тренування мережі у набір Rain100H були внесені певні зміни: було виявлено, що 546 зображень з ефектом дощу з 1800 навчальних зразків мають такий самий вміст фону, як і тестові зображення [18]. Тому ці 546 зображень були виключені із тренувального набору, а для навчання моделі було використано решту 1254 зображень. Для збільшення тренувальних наборів навчання проводилося не на повнорозмірних зображеннях, а на областях розміром 100×100 . Тому розмір набору Rain100H зріс до 18810 зразків. Для Rain100L додатково застосовувалося горизонтальне відзеркалення, тому він виріс до 6000 зразків.

Розмір вхідного пакету становив 16 зображень. Для оптимізації процесу навчання мережі застосовувався метод Adam [26]. Початкова швидкість навчання становила 0,001. Запропонована модель навчалася протягом 30 епох на кожному з обраних наборів. Тривалість навчання однієї епохи на наборі Rain100H з використанням графічного процесора становила приблизно 20–25 хв. Графік зміни значення функції втрат (1) для запропонованої моделі з використанням набору Rain100H наведено на рис. 6.

В якості метрик для оцінки процесу та якості навчання мережі були обрані співвідношення PSNR [27] та індекс SSIM [25]. Графіки зміни значень PSNR і SSIM для запропонованої мережі з використанням набору Rain100H наведені на рис. 7 та 8 відповідно.

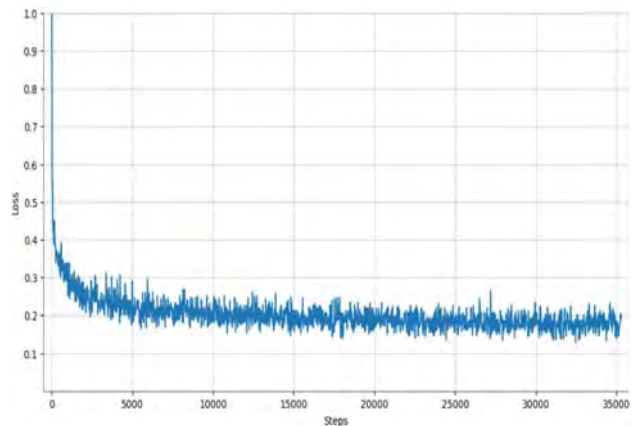


Рисунок 6 – Графік зміни значення функції загальних втрат для Rain100H

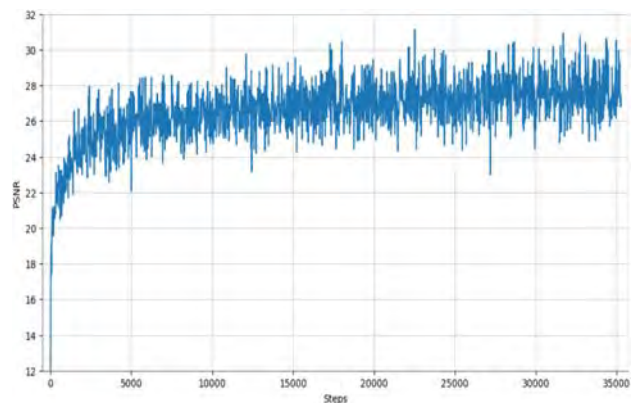


Рисунок 7 – Графік зміни значення PSNR для Rain100H

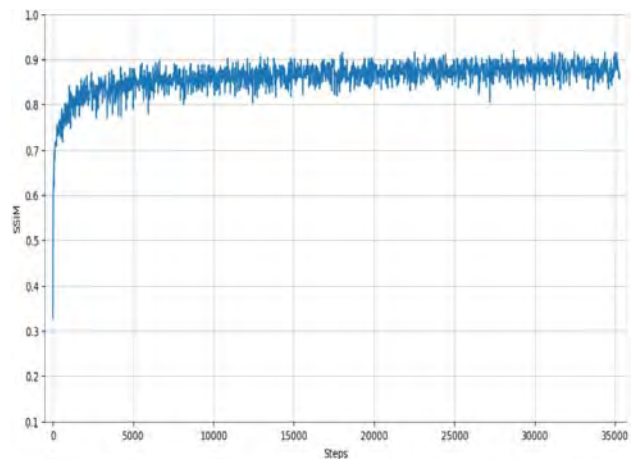


Рисунок 8 – Графік зміни значення SSIM для Rain100H

Також, на основі обчислення значень PSNR і SSIM було проведено порівняння запропонованої моделі з іншими відомими методами, які широко використовуються для виявлення і видалення наслідків ефекту дощу з одиночних зображень: JORDER [14], RESCAN [17] та PReNet [18].

Варто зазначити, що на відміну від інших методів, для JORDER метрики напряму обчислювались за результатами, що були отримані в [18]. Результати тестування методів представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати тестування методів

Набори даних	Методи							
	JORDER		RESCAN		PReNet		Запропонований метод	
	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
Rain100H	25,22	0,801	27,54	0,842	27,65	0,875	27,66	0,874
Rain100L	35,25	0,968	35,32	0,969	35,76	0,973	35,78	0,971

Візуальне порівняння якості обробки («очищення») зображення з використанням різних методів на прикладі зображення з набору Rain100H представлено на рис. 9.

Крім цього, також було проведено візуальне порівняння якості обробки реальних зображень з ефектом дощу різними методами.

Оскільки для методу JORDER не було можливості використати натреновану модель, він не приймав участі у порівнянні. Для інших методів були протестовані моделі, які були навчені на наборі Rain100H. Результати обробки на прикладі реальних зображень з ефектом дощу представлені на рис. 10.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити висновок, що запропонований метод демонструє достатньо непогані результати порівняно з іншими. Він показує вищі результати, ніж JORDER та RESCAN за показниками обох метрик: PSNR і SSIM (табл. 1). В порівнянні з PReNet метод показує кращі результати за оцінкою PSNR, але трохи гірші за індексом SSIM (табл. 1).

Слід відмітити, що розроблена модель програє RESCAN і PReNet у «розмірах». Вона має 226 тис. параметрів, JORDER – більше 4,1 млн., RESCAN – близько 150 тис., а PReNet – близько 95 тис. Цей факт впливає на ефективність її застосування з точки зору використання обчислювальних ресурсів.

Візуальне порівняння отриманих результатів свідчить про те, що запропонований метод демонструє набагато кращі результати з точки зору сприйняття людини порівняно з JORDER або RESCAN і трохи краще за PReNet (рис. 9).

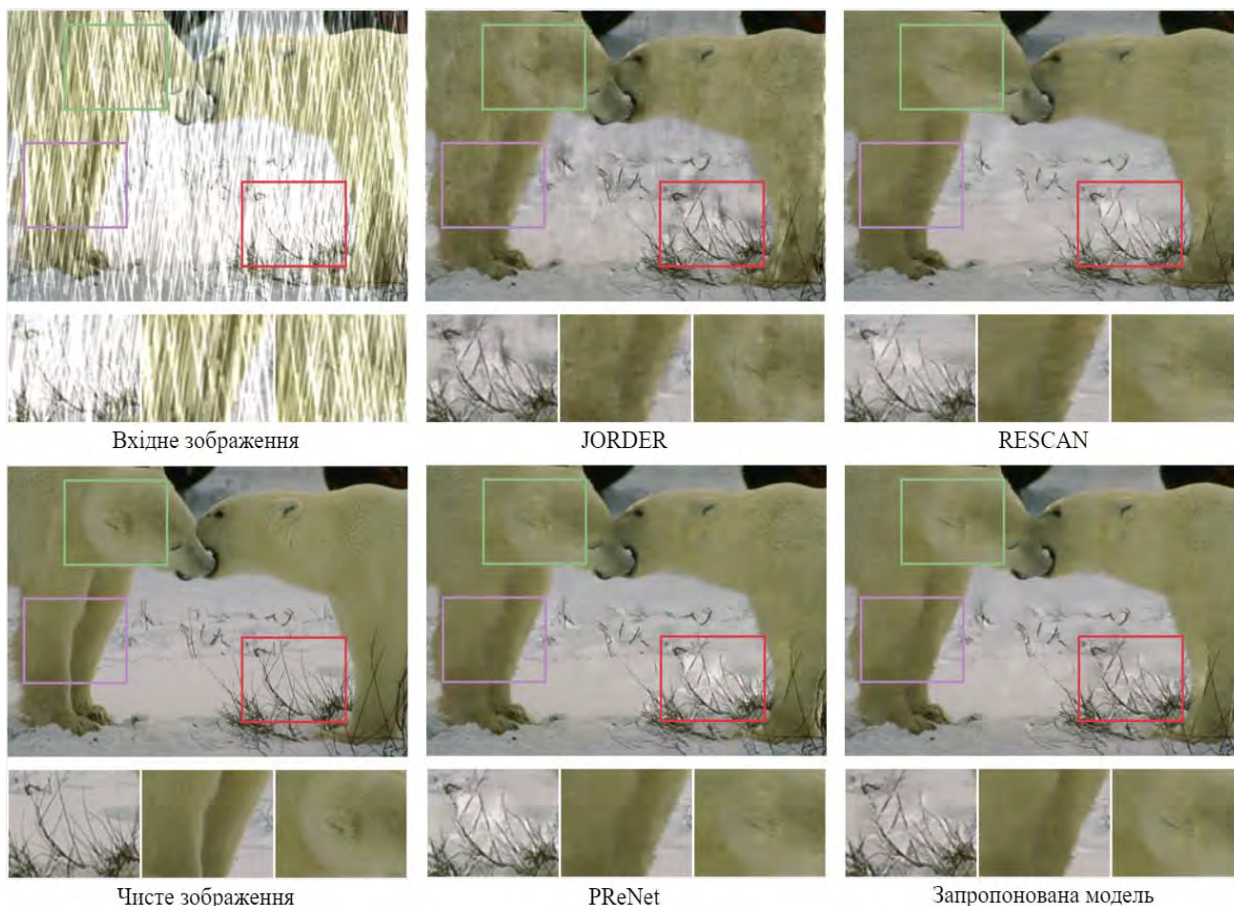


Рисунок 9 – Візуальне порівняння якості обробки зображення різними методами

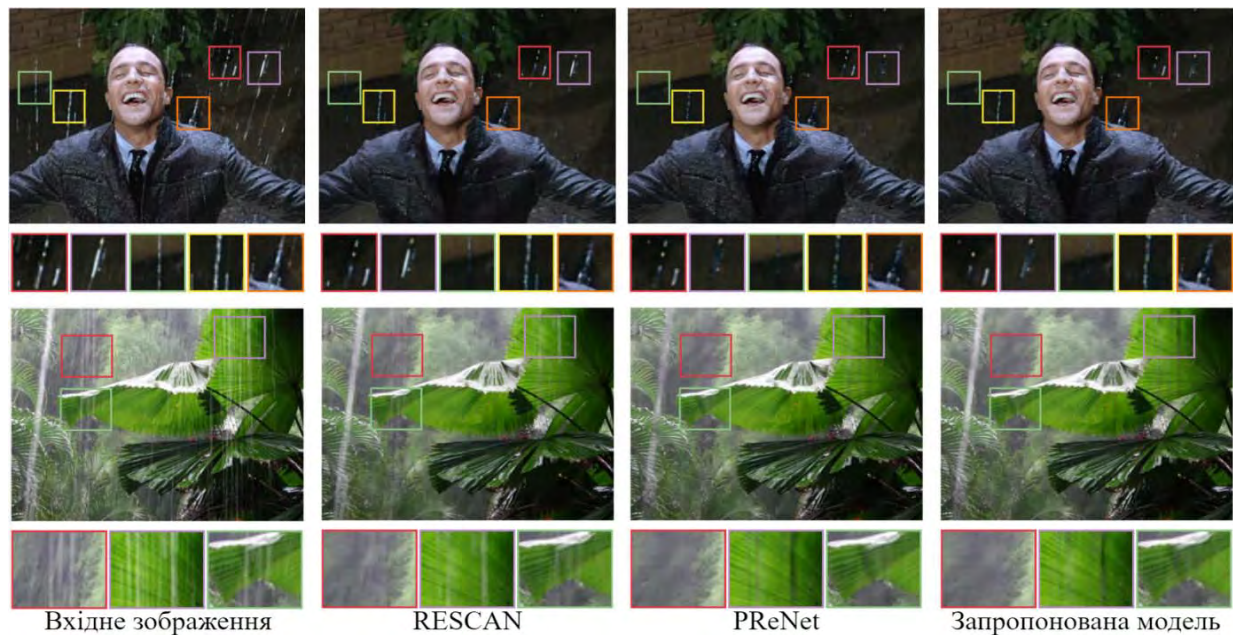


Рисунок 10 – Візуальне порівняння якості обробки реальних зображень різними методами

Розроблена модель достатньо непогано видаляє смуги дощу, але може генерувати певні артефакти, як показано в області зображення, що виділена червоною рамкою (рис. 9) або розмивати текстури, як показано в регіонах, які виділені зеленою та рожевою рамками (рис. 9).

Із отриманих результатів візуального порівняння якості обробки реальних зображень різними методами (рис. 10) можна побачити, що запропонований метод не завжди видаляє всі смуги дощу та інколи розмиває фоніві текстури. Також він має певні труднощі з обробкою ефекту туману (накопичення дощу), але це пов'язано з тим, що навчальна вибірка майже не містила зразків з ефектом подібного типу. Разом з тим, реалізована модель дає набагато кращі візуальні результати ніж RESCAN. У порівнянні ж з PReNet складно зробити однозначний висновок, методи демонструють приблизно однакову візуальну якість результату (рис. 10).

Таким чином постає питання про подальше вдосконалення методу для отримання кращих результатів.

ВИСНОВКИ

В роботі запропоновано метод розв'язання актуального завдання виявлення і видалення небажаних наслідків ефекту дощу з одиночних зображень, який базується на використанні згорткової нейронної мережі з рекурентною багатоетапною структурою та механізму уваги.

До переваг розробленого підходу слід віднести «модульну» структуру нейронної мережі, яка використовується для «очищення» зображення. Архітектура такої мережі складається з повторюваних блоків (шарів) і на виході кожного шару здатна видавати повноцінний результат – «чисте» зображення без наслідків ефекту дощу. Тобто на виході кожного наступного шару мережі ми отримуємо більш «якісно очищене»

зображення від небажаних компонентів дощу ніж попереднє, що дозволяє підвищити продуктивність та ефективність використання запропонованого методу. Це підтверджують результати експериментальних досліджень.

В результаті тестування метод показав достатньо високі значення показників PSNR (27,66 та 35,78) і SSIM (0,874 та 0,971) для наборів даних Rain100N та Rain100L відповідно. Отримані результати суттєво перевищують показники таких методів як JORDER або RESCAN. Порівняно з PReNet запропонований метод демонструє вищі значення PSNR і показує невелику перевагу у якісних результатах візуального сприйняття зображення, але при цьому отримує трохи менші значення SSIM та має «більший розмір».

Наукова новизна роботи.

1. Вперше запропоновано метод виявлення та видалення компонентів дощу з одиночних зображень, який базується на використанні рекурентної багатоетапної структури нейронної мережі. Кожен шар мережі складається з двох гілок (підмереж) для незалежної (паралельної) обробки зображення: головної гілки, яка використовується для виявлення і видалення ефекту дощу та гілки уваги, що призначена для покращення і пришвидшення процесу виявлення (формування карти уваги дощу). Багатоетапна архітектура мережі дозволяє потенційно застосовувати цей метод для вирішення завдань в умовах обмежених обчислювальних ресурсів, оскільки вона дозволяє відносно гнучко регулювати кількість етапів (шарів), тому що кожний наступний етап дає зображення з меншим впливом дощу, ніж попередній.

2. Удосконалено процес навчання мережі завдяки введенню комбінованої функції загальних втрат (1), яка враховує результати, що отримані від обох підмереж (паралельних гілок обчислень).

Практична значимість результатів роботи полягає в тому, що запропонований підхід може бути успішно застосований в якості попереднього етапу автоматизації процесу обробки зображень в інтелектуальних системах різного спрямування. Зокрема, систем, які використовуються для аналізу транспортних потоків, моніторингу території за допомогою камер зовнішнього спостереження, навігації на дорозі для систем автономного керування транспортними засобами, обробки результатів аерофотозйомки тощо.

Перспективи подальших досліджень. Подальший розвиток розробленого методу пов'язаний з дослідженням можливості використання структури пов'язаних між собою щільнозв'язаних блоків та впровадження кількох паралельних підмереж для реалізації багатомасштабної архітектури. Також доволі перспективним є формування окремої підмережі для усунення розмитості на зображенні та її об'єднання з основною гілкою мережі, що зробить модель більш «стійкою» до різних форм ефекту дощу при обробці зображень. Для підвищення кількісних і якісних показників ефективності методу доцільно провести навчання мережі на наборах даних, що містять зразки зображень з різними типами ефекту дощу.

ПОДЯКИ

У роботі висвітлено результати, що були отримані авторами у 2021–2022 роках в рамках виконання держбюджетного науково-дослідного проекту «Глибокі гібридні системи обчислювального інтелекту для аналізу потоків даних та їх швидке навчання» (номер державної реєстрації 0119U001403) на кафедрі штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки.

Автори вдячні колегам за підтримку під час дослідження та активну участь в обговоренні результатів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Wang H. Survey on rain removal from videos or a single image / H. Wang, Y. Wu, M. Li, Q. Zhao, D. Meng // *Science China Information Sciences*. – 2022. – Vol. 65(1): 111101. DOI:10.1007/s11432-020-3225-9
2. Single image deraining: from Model-based to Data-driven and beyond / [W. Yang, R. T. Tan, S. Wang et al.] // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2021. – Vol. 43, № 11. – P. 4059–4077. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.2995190
3. Single-image-based rain and snow removal using multi-guided filter / [X. Zheng, Y. Liao, W. Guo et al.] // *20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP-2013)*, Doegu, 03–07 November, 2013: proceedings. – Berlin: Springer, 2013. – P. 258–265. (Lecture Notes in Computer Science, Vol 8228). DOI: 10.1007/978-3-642-42051-1_33
4. Kang L.-W. Automatic single-image-based rain streaks removal via image decomposition / L.-W. Kang, C.-W. Lin and Y.-H. Fu // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2012. – Vol. 21, № 4. – P. 1742–1755. DOI: 10.1109/TIP.2011.2179057
5. Luo Y. Removing rain from a single image via discriminative sparse coding / Y. Luo, Y. Xu, H. Ji // *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Santiago, 07–13 December, 2015: proceedings. – P. 3397–3405. DOI: 10.1109/ICCV.2015.388
6. Joint bi-layer optimization for single-image rain streak removal / [L. Zhu, C.-W. Fu, D. Lischinski, P.-A. Heng] // *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, 22–29 October, 2017: proceedings. – P. 2545–2553. DOI: 10.1109/ICCV.2017.276
7. Rain streak removal using layer priors / [Y. Li, R. T. Tan, X. Guo et al.] // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, 27–30 June, 2016: proceedings. – P. 2736–2744. DOI: 10.1109/CVPR.2016.299
8. Eigen D. Restoring an image taken through a window covered with dirt or rain / D. Eigen, D. Krishnan, R. Fergus // *2013 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Sydney, 01–08 December, 2013: proceedings. – P. 633–640, DOI: 10.1109/ICCV.2013.84
9. Clearing the skies: A deep network architecture for single-image rain removal / [X. Fu, J. Huang, X. Ding et al.] // *IEEE Transactions on Image Processing*. – 2017. – Vol. 26, № 6. – P. 2944–2956. DOI: 10.1109/TIP.2017.2691802
10. Removing rain from single images via a deep detail network / [X. Fu, J. Huang, D. Zeng et al.] // *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, 21–26 July, 2017: proceedings. – P. 1715–1723. DOI: 10.1109/CVPR.2017.186
11. Deep residual learning for image recognition / [K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun] // *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Las Vegas, 27–30 June, 2016: proceedings. – P. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
12. Zhang H. Density-aware single image de-raining using a multi-stream dense network / H. Zhang, V. M. Patel // *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City, 18–23 June, 2018: proceedings. – P. 695–704. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00079
13. Wang T. Spatial attentive single-image deraining with a high quality real rain dataset / [T. Wang, X. Yang, K. Xu et al.] // *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, 15–20 June, 2019: proceedings. – P. 12262–12271. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01255
14. Deep joint rain detection and removal from a single image / [W. Yang, R. T. Tan, J. Feng et al.] // *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Honolulu, 21–26 July, 2017: proceedings. – P. 1685–1694. DOI: 10.1109/CVPR.2017.183
15. Yu F. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions / F. Yu, V. Koltun // *4th International Conference on Learning Representations (ICLR-2016)*, San Juan, 02–04 May, 2016: proceedings. – P. 1–13. DOI: 10.48550/arXiv.1511.07122
16. Joint rain detection and removal from a single image with contextualized deep networks / [W. Yang, R. T. Tan, J. Feng et al.] // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. – 2020. – Vol. 42, № 6. – P. 1377–1393. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2895793
17. Recurrent squeeze-and-excitation context aggregation net for single image deraining / [X. Li, J. Wu, Z. Lin et al.] // *15th European Conference Computer Vision (ECCV-2018)*, Munich, 08–14 September, 2018: proceedings. – Cham: Springer, 2018. – P. 262–277. – (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11211). DOI: 10.1007/978-3-030-01234-2_16

18. Ren D. Progressive image deraining networks: A better and simpler baseline / [D. Ren, W. Zuo, Q. Hu et al.] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, 15–20 June, 2019: proceedings. – P. 3932–3941. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00406
19. Lightweight pyramid networks for image deraining / [X. Fu, B. Liang, Y. Huang et al.] // IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems. – 2020. – Vol. 31, № 6. – P. 1794–1807. DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2926481
20. Depth-attentional features for single-image rain removal / [X. Hu, C.-W. Fu, L. Zhu et al.] // 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Long Beach, 15–20 June, 2019: proceedings. – P. 8014–8023. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00821
21. Zhang H. Image de-raining using a conditional generative adversarial network / H. Zhang, V. Sindagi, V. M. Patel // IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology. – 2020. – Vol. 30, № 11. – P. 3943–3956. DOI: 10.1109/TCSVT.2019.2920407
22. Attentive generative adversarial network for raindrop removal from a single image / [R. Qian, R. T. Tan, W. Yang et al.] // 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Salt Lake City, 18–23 June, 2018: proceedings. – P. 2482–2491. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00263
23. Jin X. Unsupervised single image deraining with self-supervised constraints / [X. Jin, Z. Chen, J. Lin et al.] // 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), Taipei, 22–25 September, 2019: proceedings. – P. 2761–2765. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803238
24. Hochreiter S. Long short-term memory / S. Hochreiter, J. Schmidhuber // Neural Computation. – 1997. – Vol. 9, № 8. – P. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
25. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity / [Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli] // IEEE Transactions on Image Processing. – 2014. – Vol. 13, № 4. – P. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861
26. Kingma D. P. Adam: A method for stochastic optimization / D. P. Kingma, J. Ba // 3rd International Conference on Learning Representation (ICLR-2015), San Diego, 07–09 May, 2015: proceedings. P. 1–15. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980
27. Huynh-Thu Q. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment / Q. Huynh-Thu, M. Ghanbari // Electronics letters. – 2008. – Vol. 44, №13. – P. 800–801. DOI: 10.1049/el:20080522

Стаття надійшла до редакції 25.01.2023.
Після доробки 07.05.2023.

UDC 004.932

REMOVAL OF RAIN COMPONENTS FROM SINGLE IMAGES USING A RECURRENT NEURAL NETWORK

Petrov K. E. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Information Control Systems, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Kyrychenko V. V. – Master Student of the Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Removing the undesirable consequences of rain effects from single images is an actual problem in many computer vision tasks, because rain streaks can significantly degrade the visual quality of images and seriously interfere with the operation of various intelligent systems, which are used for their processing and further analysis.

Objective. The goal of the work is to develop a method for detecting and removing undesirable effects of the rain from single images, which is based on the using of a convolutional neural network with a recurrent structure.

Method. The main component of the proposed method is a convolutional neural network, which has a recurrent multi-stage structure. A feature of this network architecture is the use of repeated blocks (layers), at the output of which you can get an intermediate result of «cleaning» the original image. Moreover at the output of each next layer of the network we get an image with less influence of rain components than on the previous one. Each network layer contains two independent sub-networks (branches) for parallel image processing. The main branch is designed to detect and remove the effect of rain from the image and the attention branch is used to improve and speed up the process of detecting undesirable rain components (for rain attention map formation).

Results. An approach has been developed to automatically detect and remove the rain effect from single images. The process of «cleaning» the original image is based on the use of a convolutional neural network with a recurrent structure, which was trained on the Rain100H and Rain100L datasets. The results of computer experiments, which testifies to the effectiveness and expediency of using the proposed method for solving practical tasks of pre-processing «contaminated» images are presented.

Conclusions. The advantage of the developed method for removing undesirable components of rain from images is that the recurrent multi-stage network architecture, on which it is based allows it to be potentially applied to solving tasks under conditions of limited computing resources. The proposed method can be successfully used in the development of intelligent systems for area monitoring with surveillance cameras, autonomous vehicles control, processing aerial photography results, etc. In the future, it should be considered the possibility of forming a separate sub-network to eliminate blurring in the image and train the network on datasets that contain image samples with different components of rain, which will make the method more «resistant» to different forms of the rain effect and increase the quality of image «cleaning».

KEYWORDS: image processing, rain effect, rain streaks, deep learning, convolutional neural network, attention mechanism.

REFERENCES

1. Wang H. Wu Y., Li M., Zhao Q., Meng D. Survey on rain removal from videos or a single image, *Science China Information Sciences*, 2022, Vol. 65(1), 111101. DOI:10.1007/s11432-020-3225-9
2. Yang W., Tan R. T., Wang S., Fang Y., Liu J. Single image deraining: from Model-based to Data-driven and beyond, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2021, Vol. 43, № 11, pp. 4059-4077. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.2995190

3. Zheng X., Liao Y., Guo W., Fu X., Ding X. Single-image-based rain and snow removal using multi-guided filter, *20th International Conference on Neural Information Processing (ICONIP-2013)*, Doegu, 03–07 November, 2013, proceedings. Berlin, Springer, 2013, pp. 258–265. (Lecture Notes in Computer Science, Vol 8228). DOI: 10.1007/978-3-642-42051-1_33
4. Kang L.-W., Lin C.-W. and Fu Y.-H. Automatic single-image-based rain streaks removal via image decomposition, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2012, Vol. 21, № 4, pp. 1742–1755. DOI: 10.1109/TIP.2011.2179057
5. Luo Y., Xu Y., Ji H. Removing rain from a single image via discriminative sparse coding, *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Santiago, 07–13 December, 2015, proceedings, pp. 3397–3405. DOI: 10.1109/ICCV.2015.388
6. Zhu L., Fu C.-W., Lischinski D., Heng P.-A. Joint bi-layer optimization for single-image rain streak removal, *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, 22–29 October, 2017, proceedings, pp. 2545–2553. DOI: 10.1109/ICCV.2017.276
7. Li Y., Tan R. T., Guo X., Lu J., Brown M. S. Rain streak removal using layer priors, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, 27–30 June, 2016, proceedings, pp. 2736–2744. DOI: 10.1109/CVPR.2016.299
8. Eigen D., Krishnan D., Fergus R. Restoring an image taken through a window covered with dirt or rain, *2013 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*. Sydney, 01–08 December, 2013, proceedings, pp. 633–640. DOI: 10.1109/ICCV.2013.84
9. Fu X., Huang J., Ding X., Liao Y., Paisley J. Clearing the skies: A deep network architecture for single-image rain removal, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2017, Vol. 26, No. 6, pp. 2944–2956. DOI: 10.1109/TIP.2017.2691802
10. Fu X. Huang J., Zeng D., Huang Y., Ding X., Paisley J. Removing rain from single images via a deep detail network, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu, 21–26 July, 2017, proceedings, pp. 1715–1723. DOI: 10.1109/CVPR.2017.186
11. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Las Vegas, 27–30 June, 2016, proceedings, pp. 770–778. DOI: 10.1109/CVPR.2016.90
12. Zhang H., Patel V. M. Density-aware single image de-raining using a multi-stream dense network, *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Salt Lake City, 18–23 June, 2018: proceedings, pp. 695–704. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00079
13. Wang T. Yang X., Xu K., Chen S., Zhang Q., Lau R. W. H. Spatial attentive single-image deraining with a high quality real rain dataset, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, 15–20 June, 2019: proceedings, pp. 12262–12271. DOI: 10.1109/CVPR.2019.01255
14. Yang W. Tan R. T., Feng J., Liu J., Guo Z., Yan S. Deep joint rain detection and removal from a single image, *2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Honolulu, 21–26 July, 2017, proceedings, pp. 1685–1694. DOI: 10.1109/CVPR.2017.183
15. Yu F., Koltun V. Multi-scale context aggregation by dilated convolutions, *4th International Conference on Learning Representations (ICLR-2016)*. San Juan, 02–04 May, 2016: proceedings, pp. 1–13. DOI: 10.48550/arXiv.1511.07122
16. Yang W., Tan R. T., Feng J., Guo Z., Yan S. and Liu J. Joint rain detection and removal from a single image with contextualized deep networks, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2020, Vol. 42, № 6, pp. 1377–1393. DOI: 10.1109/TPAMI.2019.2895793
17. Li X., Wu J., Lin Z., Liu H., Zha H. Recurrent squeeze-and-excitation context aggregation net for single image de-raining, *15th European Conference Computer Vision (ECCV-2018)*, Munich, 08–14 September, 2018, proceedings. Cham: Springer, 2018, pp. 262–277. (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 11211). DOI: 10.1007/978-3-030-01234-2_16
18. Ren D., Zuo W., Hu Q., Zhu P., Meng D. Progressive image deraining networks: A better and simpler baseline, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Long Beach, 15–20 June, 2019, proceedings, pp. 3932–3941. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00406
19. Fu X., Liang B., Huang Y., Ding X., Paisley J. Lightweight pyramid networks for image deraining, *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, Vol. 31, № 6, pp. 1794–1807. DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2926481
20. Hu X., Fu C.-W., Zhu L., Heng P.-A. Depth-attentional features for single-image rain removal, *2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Long Beach, 15–20 June, 2019, proceedings, pp. 8014–8023. DOI: 10.1109/CVPR.2019.00821
21. Zhang H., Sindagi V., Patel V. M. Image de-raining using a conditional generative adversarial network, *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2020, Vol. 30, № 11, pp. 3943–3956. DOI: 10.1109/TCSVT.2019.2920407
22. Qian R., Tan R. T., Yang W., Su J., Liu J. Attentive generative adversarial network for raindrop removal from a single image, *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Salt Lake City, 18–23 June, 2018, proceedings, pp. 2482–2491. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00263
23. Jin X., Chen Z., Lin J., Chen Z., Zhou W. Unsupervised single image deraining with self-supervised constraints, *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. Taipei, 22–25 September, 2019, proceedings. pp. 2761–2765. DOI: 10.1109/ICIP.2019.8803238
24. Hochreiter S., Schmidhuber J. Long short-term memory, *Neural Computation*, 1997, Vol. 9, № 8, pp. 1735–1780. DOI: 10.1162/neco.1997.9.8.1735
25. Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2014, Vol. 13, № 4, pp. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861
26. Kingma D. P., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization, *3rd International Conference on Learning Representation (ICLR-2015)*, San Diego, 07–09 May, 2015, proceedings, pp. 1–15. DOI: 10.48550/arXiv.1412.6980
27. Huynh-Thu Q., Ghanbari M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment, *Electronics letters*, 2008, Vol. 44, № 13, pp. 800–801. DOI: 10.1049/el:20080522

ТЕХНОЛОГІЯ АНАЛІЗУ УКРАЇНОМОВНИХ ТВІТІВ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗМІНИ ДИНАМІКИ ГРОМАДСЬКОЇ ДУМКИ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Прокіпчук О. А. – магістр кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Висоцька В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Автоматизація дослідження громадської думки дозволить не тільки зменшити кількість ручної праці, а й отримувати часові зрізи результатів без додаткових зусиль. Оскільки потрібно уникнути прямої взаємодії з респондентами, громадську думку необхідно аналізувати на основі джерел її вільного вираження. Соціальні мережі чудово підходять на цю роль, так як там люди вільно публікують свої думки або емоційно правдиво реагують на опубліковану інформацію щодо певних подій. Статистика показує, що даних із соціальних мереж недостатньо для отримання повноцінного результату, бо чималій відсоток людей не користуються соціальними мережами. Проте автоматизація дослідження навіть такого прошарку населення уже є хорошим результатом для аналізу динаміки змін громадської думки відповідно подій в країні/світі та відповідно для корегування в подальшому процесів державного управління.

Мета дослідження – розроблення технології аналізу україномовного потоку контенту в соціальних мережах для дослідження громадської думки на основі знаходження кластеризованих тематичних груп твітів.

Метод. В статті розроблено технологію пошуку трендів твітів на основі кластеризації, що формує потік даних у вигляді коротких репрезентацій кластерів та їхньої популярності для подальшого дослідження громадської думки. Описано ефективний підхід збору твітів, їх фільтрації, очищення та попереднього опрацювання на основі порівняльного аналізу алгоритмів Bag of Words, TF-IDF та BERT. Визначено вплив стемінгу та лематизації на якість отриманих кластерів. А також знайдено оптимальні поєднання методів кластеризації (ціі K-Means, Agglomerative Hierarchical Clustering та HDBSCAN) та векторизації твітів на основі аналізу 27 кластеризацій однієї вибірки даних. Обрано спосіб подання кластерів твітів у короткому форматі.

Результати. Найкращі результати показали алгоритми, що використовують Відстань Левенштейна, тобто fuzz sort, fuzz set та levenshtein. Дані алгоритми швидко здійснюють перевірки, мають більшу різницю подібностей, тож можна точніше визначити межу подібності. Згідно з результатами проведених кластеризацій, оптимальними рішеннями є використання алгоритму кластеризації HDBSCAN та алгоритму векторизації BERT для досягнення найточніших результатів, та використання K-Means разом із TF-IDF для досягнення найкращої швидкодії із оптимальним результатом. Для зменшення часу виконання можна застосовувати стемінг.

Висновки. В даному дослідженні експериментально знайдено оптимальні варіанти для порівняння відбитків кластерів серед таких методів пошуку подібності: Fuzz Sort, Fuzz Set, Levenshtein, Jaro Winkler, Jaccard, Sorensen, Cosine, Sift4. У деяких алгоритмів середня подібність відбитків сягає вище 70%. Знайдено 3 ефективні інструменти для порівняння їхньої подібності, так як вони показують достатню відмінність між порівняннями подібних та різних кластерів (> 20%). На основі обраних ефективних методів, успішно проведено аналіз трендів для 90 000 твітів за 7 днів для 5 тем тижня за допомогою K-Means та TF-IDF для кластеризації та векторизації, а також fuzz sort для порівняння відбитків кластерів із межею подібності 55%.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: твіт, українська мова, громадська думка, тренд, кластеризація, стеммінг, лематизація, подібність кластерів.

АБРЕВІАТУРА

BERT – Bidirectional Encoder Representations from Transformers;

BOW – Bag of Words;

HDBSCAN – Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise;

NLP – Natural Language Processing.

НОМЕНКЛАТУРА

S – система аналізу твітів;

I – множина вхідних даних;

O – множина вихідних даних;

R – основні правила опрацювання вхідних даних;

U – параметри опрацювання вхідних даних;

N – нейронна мережа;

α – оператор скачування вхідних даних;

β – оператор опрацювання вхідних даних;

γ – оператор кластеризації твітів;

μ – оператор ідентифікації тематичних твітів;

χ – оператор формування датасетів твітів;

ω – оператор зняття відбитків кластерів твітів;

λ – оператор злиття кластерів твітів;

i_1 – множина даних із соціальної мережі;

i_2 – сховище даних твітів;

i_3 – словники україномовних слів;

i_4 – множина тематичних ключових слів твітів;

o_1 – періодичні запити на збір твітів;

o_2 – результат кластеризації;

o_3 – результат злиття кластерів;

r_1 – правила збору даних з соціальних мереж;

r_2 – правила NLP україномовних твітів;

r_3 – правила кластеризації твітів;

- r_4 – правила злиття кластерів твітів;
- u_1 – множина умов збору твітів в соціальні мережі;
- u_2 – множина вимог фільтрування твітів від шуму;
- u_3 – множина умов опрацювання твітів;
- u_4 – множина умов кластеризації твітів;
- u_5 – множина вимог формування висновків.

ВСТУП

Дослідження громадської думки є невід’ємним елементом зворотного зв’язку народу до держави. Станом на сьогодні, основними методами збору громадської думки в Україні є опитування громадян в офлайн чи онлайн форматах. Проведенням цих опитувань зазвичай займаються соціологічні центри. В більшості випадків такий процес є частково автоматичний (проведення анкетування з подальшим машинним опрацюванням). Недоліком такого опитування є неточність отриманих даних за рахунок не охоплення великої кількості прошарків населення та різних соціальних груп, хаотичність та довготривалість збору даних, що приводить ще і до втрати актуальності отриманих результатів. Крім того часто в таких анкетах люди дають не зовсім правдиву інформацію. Аналіз же реакцій соціальних груп на ту чи іншу подію/інформацію в соціальних мережах не скриває їх справжньої емоційної реакції. Автоматичний збір та аналіз подібної інформації приводить до отримання оперативних актуальних даних по певних проблемних питаннях для подальшого дослідження відповідної громадської думки. В роботі розглядатиметься технологія аналізу інформаційного потоку в соціальних мережах, що містять тренди україномовних твітів. Їх разом із метаданими доцільно використовувати для автоматизації дослідження громадської думки. Наприклад, в умовах війни, важливо знати настрої українців для формування реакцій державного управління та кроків/алгоритмів розвитку/відбудови країни. Окрім того, автоматизація процесу дозволить створити незалежне загальнодоступне джерело інформації із хронологічними даними, наприклад, для можливості прогнозування реакцій населення на внесення змін в процес державного управління.

Метою дослідження є розроблення технології аналізу україномовного потоку контенту в соціальних мережах для дослідження громадської думки на основі знаходження кластеризованих тематичних груп твітів. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити ефективний підхід формування вибірки та попереднього опрацювання україномовних твітів на основі NLP-методів;
- провести експериментальне дослідження методів та інструментів для створення кластерів україномовних твітів для визначення оптимального їх поєднання при отриманні найкращих результатів на великих обсягах вхідних даних;
- розробити метод розрахунку популярності кластерів, відображення кластерів у короткому форматі та об’єднання кластерів, створених у різні

моменти часу на основі проведення експериментальних апробацій;

– здійснити аналіз результатів експериментальної апробації запропонованої технології аналізу твітів.

Об’єкт дослідження – процеси ідентифікації та аналізу україномовних твітів для прогнозування зміни динаміки громадської думки. Предмет дослідження – методи та засоби ідентифікації та аналізу україномовних твітів для прогнозування зміни динаміки громадської думки із застосуванням оптимального конвеєру (pipeline) на основі NLP-методів, кластерного аналізу, вибору та генерування ознак, алгоритмів машинного навчання, в умовах наявності великих за обсягом корпусів анованих даних.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Систему аналізу україномовних твітів S подано імітаційною моделлю через короткем:

$$S = \langle I, O, R, U, N, \alpha, \beta, \gamma \rangle,$$

Де $I = \{i_1, i_2, i_3, i_4\}$, $O = \{o_1, o_2, o_3\}$, $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$, $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$.

Основними процесами моделі аналізу україномовних твітів в соціальній мережі є «Збір твітів», «NLP твітів», «Машинне навчання» та «Формування висновків».

Процес «Збір твітів» опишемо суперпозицією:

$$C_{AU} = \mu^\circ \beta^\circ \alpha,$$
$$C_{AU} = \mu(\beta(\alpha(i_1, i_2, i_4), r_1, u_1), u_2).$$

Процес «NLP твітів» опишемо суперпозицією:

$$C_{CU} = \chi^\circ \beta^\circ \alpha, \text{ тобто}$$
$$C_{CU} = \chi(\beta(\alpha(C_{AU}, i_2, i_3, i_4), r_1, u_3), r_2).$$

Процес «Машинне навчання» опишемо як:

$$C_{UL} = \omega^\circ \gamma^\circ \beta^\circ \alpha,$$
$$C_{UL} = \omega(\gamma(\beta(\alpha(C_{CU}, i_2), i_3), u_4), r_3).$$

Процес «Формування висновків» опишемо як:

$$C_{US} = \lambda^\circ \gamma^\circ \beta^\circ \alpha,$$
$$C_{US} = \lambda(\gamma(\beta(\alpha(C_{US}, i_2), i_4), u_5), r_4).$$

Аналіз здійснюється за допомогою класифікації чи кластеризації, що групує повідомлення за певними критеріями. Хоч збір інформації й відбувається автоматично, проте все ще необхідна реалізація таких досліджень згідно конкретних тем, та відповідна обробка результатів. Також суттєво впливає на результати дослідження ефективність опрацювання відповідної регіональної мови. Ще одним з найважливіших критеріїв подібної технології є можливість збору часових даних та їх періодичність.

2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Переважно, соціальне опитування є періодичним процесом, що вимагає залученості як респондентів, так й працівників соціологічних центрів для організації опитування та аналізу результатів. Хоч онлайн системи дозволяють спростити цей процес, він все ще потребує чималої ручної праці, а для отримання часового зрізу громадської думки необхідно здійснити цілу низку повторних опитувань [1]. Автоматизація дослідження громадської думки дозволить не тільки зменшити кількість ручної праці, а й отримувати часові зрізи результатів без додаткових зусиль. Оскільки потрібно уникнути прямої взаємодії з респондентами, громадську думку необхідно аналізувати на основі джерел її вільного вираження. Соціальні мережі чудово підходять на цю роль, так як там люди вільно публікують свої думки або емоційно правдиво реагують на опубліковану інформацію щодо певних подій. Статистика показує, що даних із соціальних мереж недостатньо для отримання повноцінного результату, бо чималі відсоток людей не користуються соціальними мережами [2]. Проте автоматизація дослідження навіть такого прошарку населення уже є хорошим результатом для аналізу динаміки змін громадської думки відповідно подій в країні/світі та відповідно для корегування в подальшому процесів державного управління. Існують приклади успішного дослідження громадської думки в соціальних мережах. Наприклад, таким дослідженням громадської думки є аналіз інформації щодо COVID-19 в Китаї на основі соціальної мережі Weibo [3] або вакцинації в Італії на основі мережі Twitter [4]. Такі дослідження проводять для конкретних тем та визначають ставлення суспільства до них. В дослідженні щодо халяль-туризму [5] чудово реалізований збір часових даних твітів. Проте дослідження все ще здійснено щодо певної теми, а кількість проаналізованих твітів не перевищує 100 тисяч. Автоматизована система, що дозволить аналізувати довільні теми із врахуванням часу для цілої країни повинна бути достатньо оптимізована для того, щоб опрацьовувати оперативно, своєчасно та швидко мільйони твітів та оперувати тисячами різних тем. Для забезпечення постійного аналізу необхідно налаштувати збір та дослідження вхідного інформаційного потоку контенту в межах конкретних тем суспільства. І бажано, щоб кількість таких тем була якщо не десятками, а сотнями. Потік тем повинен містити достатньо інформації про себе у вигляді маркерів (ключові слова, часові дані як дати/періоди, основні тези, територіальність/регіональність тощо) для

можливості всебічного дослідження громадської думки від популярності теми, її емоційного забарвлення (позитивно, негативно, нейтрально) до можливості прогнозування зміни думки в часі в залежності від подій в межах конкретної теми.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для розроблення технології аналізу україномовних твітів організують пайплайн (англ. Pipeline, конвеєр) із процесів, що виконуватиметься із певною періодичністю (рис. 1).

Для підтримки постійного доступу до актуальних в часі даних періодичність виконання паплайна повинна становити як мінімум 1 раз на добу. Інтерактивність аналізу дещо змінює звичний процес опрацювання інформаційного потоку контенту за великий період часу та додає декілька необхідних кроків в пайплайн. Загалом алгоритм складається із 5 кроків. Розглянемо кожен із них детальніше.

1. Завантаження твітів. Найоптимальнішим варіантом збору твітів є використання Twitter API [6]. Це потужний інструмент, що дозволяє ефективно завантажувати твіти та використовувати фільтри пошуку. Саме вони дозволять значно скоротити час пошуку та зменшити кількість подальших фільтрацій.

Першим таким фільтром є «-is:retweet», що дозволяє виключити із списку результатів ретвіти. Велика частка ретвітів містить нерелевантну для аналізу інформацію.

Для отримання твітів українською мовою слід використати фільтр «lang:uk». Після цього абсолютна більшість результатів дійсно надходить українською мовою. Twitter API не завжди повертає твіти лише українською. Трапляються твіти на інших мовах, зокрема на російській, із невеликими вкрапленнями української. Включення таких твітів до аналізу погіршить якість результатів. Для покращення вибірки можна додати географічне обмеження на твіти, або виключити з пошуку твіти, що містять певні літери інших алфавітів, наприклад «-ы».

Можна здійснювати пошук твітів, опублікованих у будь-який час доби або лише у денний час для покращення якості вибірки. Далі відбувається фільтрація без участі Twitter API. Слід видалити із вибірки твіти довжиною менше 3–5 слів та твіти, що не містять слів, а лише символи, числа, емодзі чи хеш-теги. Покращити вибірку можна, видаливши дублікати. Оскільки виконувати n^2 операцій може бути дорого, оптимізувати алгоритм можна видаляючи лише ті дублікати, що опубліковані у дуже вузькому проміжку часу.



Рисунок 1 – Пайплайн аналізу твітів

2. Попереднє опрацювання твітів

2.1. Очистка тексту від шуму. Очистка дозволить позбутись усього зайвого, що може спотворити кінцевий результат. Очистка складається із видалення емоджі, посилань, тегів, хеш-тегів, розділових знаків, чисел, дубльованих пробілів, нетекстових символів та слів із буквами, що не належать українському чи англійському алфавітам. Також потрібно привести текст до нижнього регістру.

2.2. Видалення стоп-слів. Стоп-слова (наприклад, службові) не повинні впливати на результат аналізу тексту. Ці слова не несуть сенсу для аналізу та перевантажують текст зайвою інформацією. При подальшому аналізі тексту, стоп-слова зменшують значущість дійсно важливих для аналізу слів [7]. Українська мова є дуже багатою на такі конструкції. Для прикладу бібліотека production рівня SpaCy використовує список, що складається із понад 450 слів [8]. Також зустрічаються й варіанти, що налічують до 2000 слів [9]. Окрім стоп-слів української мови в цілому, до списку слід додати власні назви, що спотворюють результати аналізу такі, як назви новинних організацій. Ці назви містяться в кожному твіті організації та не несуть ніякого значення. Інші ж власні назви можуть суттєво позитивно відгравати на результат пошуку, наприклад Володимир Зеленський, Україна, Херсон, НАТО тощо.

2.3. Стемінг та Лематизація це процеси, що дозволяють проводити злиття подібних слів шляхом приведення різних форм слова до певної основи. Стемінг здійснює приведення до основи слова шляхом відкидання частин, а Лематизація приводить слово до своєї базової форми, спираючись на визначенні частини мови. Користь цих процесів в тому, що вони дозволяють зменшити вимірність (розмірність) вхідного тексту й, тим самим, зробити об'єднання твітів за одною темою більш релевантним. Проте необхідність використання даного опрацювання тексту залежить від точності реалізації відповідних інструментів для української мови. Якщо здійснити злиття для неключових слів, але для ключових слів провести цей процес некоректно, тоді можна збільшити вагу неключових слів над ключовими.

3. Кластеризація твітів є процесом машинного навчання без вчителя, мета якого полягає в розбитті вхідної множини на кластери так, що всередині кластерів знаходяться подібні елементи і водночас мають більшу відмінність із елементами інших кластерів. У визначенні трендів україномовних твітів цей процес необхідний для об'єднання твітів за спільними темами. Такий підхід повинен більше враховувати семантичне наповнення твітів, ніж групування за вмістом ключових слів.

Алгоритми кластеризації працюють із числовими векторами, проте твіти є текстовими даними. Спочатку потрібно перетворити текст у числовий вектор. Для цього існують алгоритми векторизації

тексту. В межах даного дослідження розглянемо три алгоритми: BOW, TF-IDF та BERT.

1. BOW є найбільш простим та прямолінійним підходом до векторизації тексту. Метод полягає в підрахуванні слів у тексті, а значення для відповідних слів у векторі позначаються як 1 або 0, що означає присутність або відсутність певного слова у твіті. Такий підхід до подання тексту «як є» може показати як хороший результат, так і поганий, розмивши межі кластерів.

2. TF-IDF дуже популярний алгоритм векторизації, що покращує підхід BOW шляхом введення оберненої частоти документа (inverse document frequency), котра впливатиме на важливість слів, враховуючи їхню частоту в усій вибірці твітів. Така векторизація зможе відділяти широкочислені від рідкісних слів, що дозволить якісніше визначити ключові слова при кластеризації.

3. BERT – це сімейство моделей мови, що опублікована у 2018 році [10] та здобула певного визнання. Попередньо треновані моделі BERT можна застосовувати для векторизації тексту з високою якістю. В даному дослідженні використовуватиметься модель, натренована на статтях вікіпедії різних мов, що включають українську [11].

В даному дослідженні проаналізуємо алгоритми кластеризації K-Means або K-Середніх, Agglomerative Hierarchical Clustering та HDBSCAN.

1. K-Means є одним із популярних алгоритмів, підхід якого базується на підборі центрів кластерів так, щоб сума квадратів відстаней їхніх елементів до центрів була мінімальною. Для роботи алгоритму потрібно визначити кількість кластерів завчасно. Для автоматизації вибору кількості кластерів можна скористатись методами ліктя або силуетної оцінки.

2. Agglomerative Hierarchical Clustering – ієрархічна кластеризація, що імплементує підхід знизу-вгору [12]. Процес починається із визначенням кожного елементу, як центру свого кластеру з їхнім злиттям в подальшому.

3. HDBSCAN – це метод кластеризації, що базується на щільності [13]. Така кластеризація об'єднує в кластери елементи із високою щільністю. Усі елементи, що не є щільними до жодного із кластерів вважаються шумом. HDBSCAN на відміну від DBSCAN дозволяє знаходити кластери із різними щільностями. Цей підхід дозволить кластеризувати твіти інакшим шляхом, ніж K-Середніх, що важливо для пошуку оптимального підходу, проте невдала векторизація може спричинити багато шуму.

4. Зняття відбитків кластерів. В залежності від розміру вибірки, розмір одного кластеру може сягати більше 10 тисяч повідомлень. При щоденному аналізі кількість таких кластерів дуже швидко виросте до такого числа, коли зберігання та обробка кластерів стане занадто дорогим процесом, щоб його підтримувати. Для вирішення цієї проблеми застосований термін «відбиток кластеру». Це скорочена версія, що дозволяє репрезентувати основний зміст кластеру й при цьому бути достатню

коротким для зручного зберігання та швидкої обробки. Реалізувати такий відбиток можна різними способами, наприклад зберігати твіти у вигляді скороченого BOW. В межах даного дослідження вирішено створювати відбитки як набори ключових слів кластерів. Такий формат зручно зберігати, застосовувати в подальших обробках і він не втрачає основного змісту кластеру. Існує багато інструментів отримання ключових слів з тексту. В даній роботі використовуватимемо інструмент YAKE [14], оскільки він є простий у використанні.

5. Злиття кластерів. Оскільки процес створення кластерів відбувається не одноразово, а щоденно, потрібно поєднувати результати отриманої кластеризації із кластерами, отриманими у попередні дні. Цей процес є злиттям кластерів і виконується на основі відбитків. Два відбитки потрібно перевірити на подібність. Якщо подібність перетинає певну межу, тоді відбитки кластерів та їхні метадані, що включають кількість твітів кластеру, зливаються в один. Найпростішим варіантом злиття є злиття лише метаданих без модифікації відбитку. Більш просунутий процес передбачає об'єднання відбитків шляхом вибірки ключових слів із кожного з них. Вибірка може бути випадковою або на основі ваги ключових слів. Існує багато інструментів знаходження подібності тексту. В даному дослідженні експериментально знайдено оптимальні варіанти для порівняння відбитків кластерів серед таких методів пошуку подібності: Fuzz Sort, Fuzz Set, Levenshtein, Jaro Winkler, Jaccard, Sorensen, Cosine, Sift4.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Першим важливим моментом, що потребує це дослідження, є стемінг та лематизація вхідного тексту українською мовою. Використання даних підходів дозволяє суттєво скоротити словник слів для опрацювання шляхом приведення їх до спільної форми. Проте ситуацію ускладнює специфіка української мови, котра багата на варіації слів та їхніх відмінків. Набір інструментів для опрацювання української мови є небагатим, а існуючим інструментам може бракувати точності. Це може негативно вплинути на кінцевий результат. Алгоритми стемінгу можуть змінювати слова занадто (Over-Stemming) чи недостатньо (Under-Stemming) [15]. Для прикладу наведемо різницю між результатами стемінгу двох алгоритмів із різними показниками OI (overstemming index) та UI (understemming index) [16] на основі варіацій слова зберігати (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння стемінгу різних інструментів

Алгоритм	Слова						
	Оригінал	зберігайте	зберігай	зберіг	зберігав	зберігати	зберігала
urk_stemmer	зберігайт	зберіга	зберіг	зберігал	зберіг	зберіг	зберігатимем
tree_stem	зберіга	зберіга	збер	зберіга	зберіга	зберіга	зберіга

Таким чином слід ретельно підбирати алгоритми стемінгу та лематизації твітів. Для використання в наступних етапах обрані інструменти tree_stem [16] для стемінгу та для лематизації – simplelemma [17], що ґрунтується на алгоритмах лексичного аналізу, описаних в [18], [19] та [20]. Відслідкуємо вплив на опрацювання твітів робить стемінг та лематизація на прикладі вибірки в 9000 твітів (табл. 2).

Таблиця 2 – Дослідження впливу стемінгу та лематизації на вибірку

Метод	Словник	Час виконання (мс)
Оригінал	15962	–
Стемінг	9543	1292
Лематизація	10770	647

Згідно з результатами, обидва підходи скорочують словник приблизно на третину. Стемер скорочує словник дещо більше, проте використовує у два рази більше часу. Оскільки лематизація приводить слово до його основної форми, а не скорочує його, після такого опрацювання текст зберігає більше семантичної повноти. Після проведення попереднього опрацювання тексту відбувається векторизація та кластеризація тексту. Враховуючи особливості української мови та інструментів її опрацювання, неможливо точно визначити який алгоритм кластеризації та векторизації дасть більш оптимальний результат. Порівняння підходів здійснюватиметься на основі вибірки в 5000 твітів. Розпочнемо із алгоритму кластеризації K-Means (рис. 2, табл. 3). Для початку побудуємо стовпчикові діаграми кластерів, де вісь X позначає номер кластеру, а вісь Y – розмір кластеру. Для кожного варіанту створюємо 100 кластерів. Для оцінки результатів кластеризації введемо низку параметрів:

- 1) t – час виконання (сек.).
- 2) σ (%) – відношення стандартного відхилення до середнього значення. Дозволяє оцінити рівномірність розподілу кластерів.

Таблиця 3 – Результати кластеризації варіацій підходів для k-means

Варіант	t	σ	sc	nc	n
original + TF-IDF	9,170	246	0,051	2	0,08
stemming + TF-IDF	6,246	223	0,058	1	22,8
lemmatizing + TF-IDF	8,246	405	0,026	66	84,4
original + BOW	11,308	426	-0,028	62	57,7
stemming + BOW	8,558	761	0,008	67	79,5
lemmatizing + BOW	9,551	612	-0,026	59	63,88
original + BERT	438,03	85	0,033	6	0,30
stemming + BERT	385,74	84	0,040	4	0,24
lemmatizing + BERT	462,37	84	0,038	6	0,42

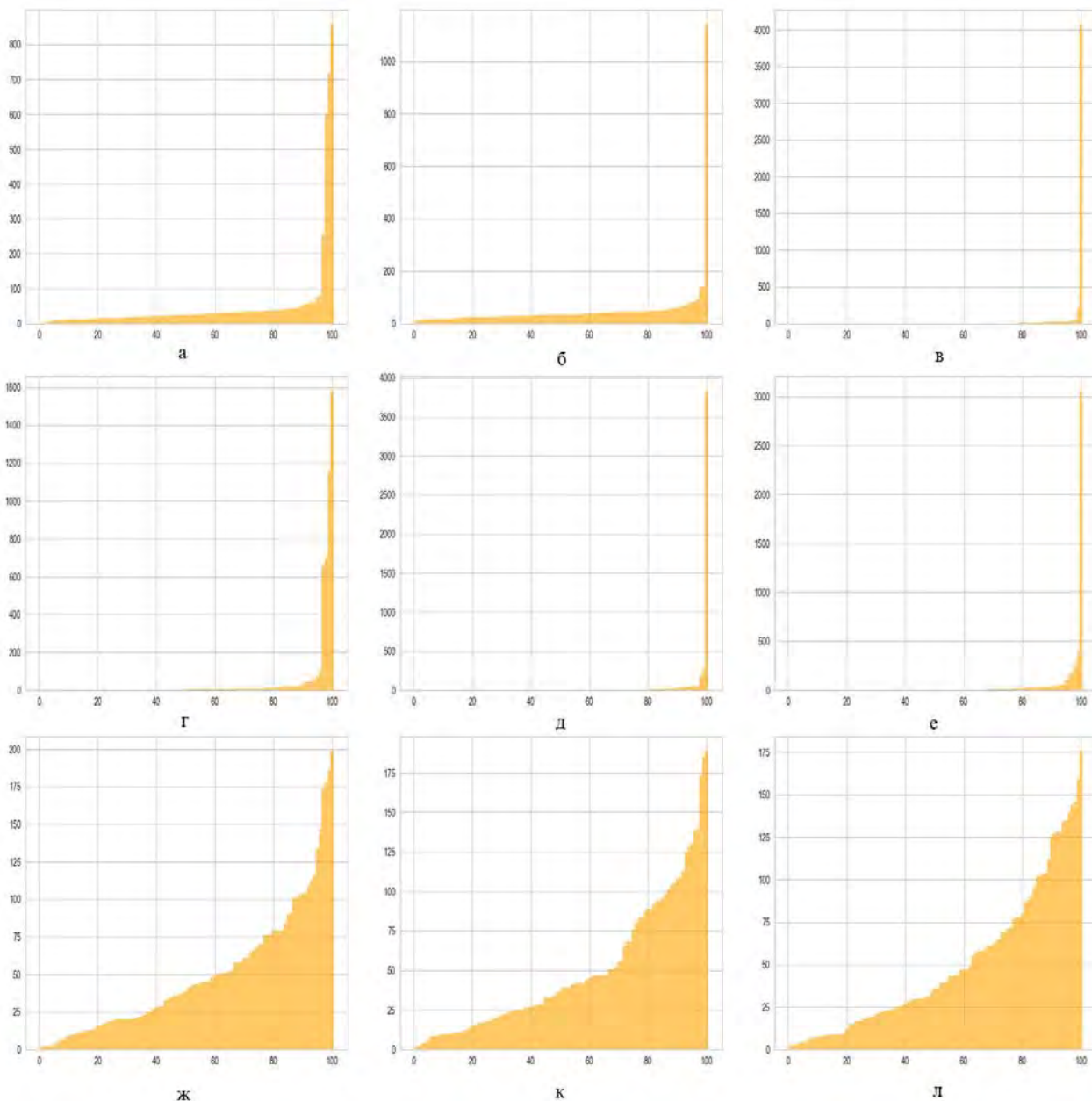


Рисунок 2 – Стовпкові діаграми варіацій підходів для K-Means при застосуванні варіантів original + TF-IDF (а), stemming + TF-IDF (б), lemmatizing + TF-IDF (в), original + BOW (г), stemming + BOW (д), lemmatizing + BOW (е), original + BERT (ж), stemming + BERT (к) та lemmatizing + BERT (л)

3) Silhouette coefficient (sc) – силуетна оцінка кластерів, що показує наскільки кластери розподілені між собою. Знаходиться в межах $[-1; 1]$, де -1 означає, що кластери розподілені неправильно, 1 означає, що кластери добре розподілені, а 0 – означає, що відстань між кластерами не є достатньо значною, щоб оцінити розподіл кластерів.

4) Noise clusters % (nc) – відношення кількості кластерів, що є непридатними для подальшого використання, до загальної кількості кластерів. Це є кластери, що містять замало твітів (менше 5) або кластери що містять занадто багато повідомлень, щоб відображати лише 1 тему (більше 20% вибірки).

5) Noise % (n) – відношення кількості повідомлень шумових кластерів до розміру вибірки.

Результати показують, що використання векторизації BOW програє при будь-яких варіантах. Хоч час виконання невеликий, проте такі кластери містять дуже велике відхилення, значну кількість шуму та погану силуетну оцінку.

Використання TF-IDF векторизації дає кращі результати та невелику кількість шуму за короткий час. Також цей векторизатор дає найкращу силуетну оцінку, проте процент відхилення все ще залишається великим. Стемінг дещо покращив результат кластеризації, на відміну від лемматизації.

BERT векторизація забезпечує найкращий сумарний результат, створюючи найменше

відхилення, дуже низький рівень шуму та середню силуетну оцінку, проте час виконання таких варіантів перевищує час виконання попередніх в десятки разів, що може стати проблемою при опрацюванні більших вибірок твітів в тисячі чи сотні тисяч твітів.

Стемінг у більшості випадків покращує результат кластеризації, скорочуючи її час, що стає в нагоді для BERT, також зменшує відхилення та покращує силуетну оцінку. Лемматизація навпаки збільшує час, шум та відхилення при дослідженні україномовних твітів.

Оскільки наступні алгоритми кластеризації, що будуть досліджуватись визначають кількість кластерів динамічно, додаємо до результатів ще один показник (k), що означає кількість кластерів.

Цей набір показує досить цікаві результати (рис. 3, табл. 4). Агломеративна кластеризація займає більше часу, ніж k -середніх, при цьому застосування TD-IDF векторизації дає зовсім посередні результати. Проте із BOW та BERT векторами ситуація докорінно змінюється. Відхилення та силуетна оцінка набувають дуже позитивних значень, але при цьому кількість кластерів досягає понад 2500, а шум до 99%. Майже всі кластери містять лише декілька твітів, що не дивно при такій кількості кластерів. З іншого боку при використанні інших вхідних параметрів можна досягнути низької кількості кластерів із низьким рівнем шуму. Стемінг та лематизація не здійснюють особливого впливу на якість кластеризації, проте можуть суттєво скоротити час опрацювання.

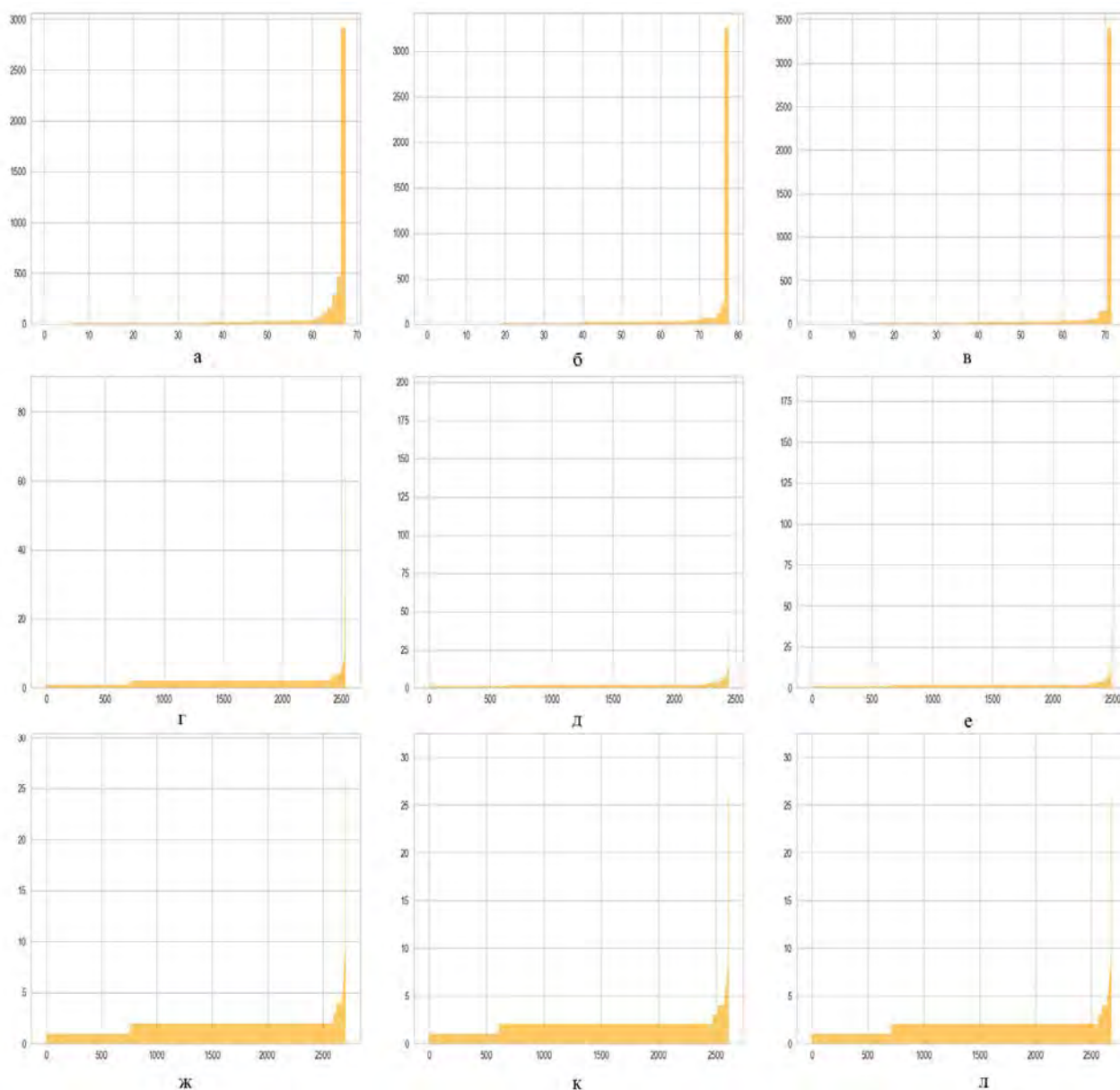


Рисунок 3 – Столпчикові діаграми варіацій підходів для Agglomerative clustering при застосуванні варіантів original + TF-IDF (а), stemming + TF-IDF (б), lemmatizing + TF-IDF (в), original + BOW (г), stemming + BOW (д), lemmatizing + BOW (е), original + BERT (ж), stemming + BERT (к) та lemmatizing + BERT (л)

Таблиця 4 – Результати кластеризації варіацій підходів для Agglomerative

Варіант	<i>k</i>	<i>t</i>	σ	<i>sc</i>	<i>nc</i>	<i>n</i>
original + TF-IDF	67	169,13	477	0,04	1	58.3
stemming + TF-IDF	77	93,66	565	0,05	1	65
lemmatizing + TF-IDF	71	107,17	566	0,05	1	68
original + BOW	2535	162,77	136	0,076	98	88.4
stemming + BOW	2442	97,14	202	0,75	97	85.9
lemmatizing + BOW	2485	109,02	190	0,75	98	87.5
original + BERT	2707	483,96	59	0,80	99	94
stemming + BERT	2611	472,98	58	0,80	99	94
lemmatizing + BERT	2677	450,55	60	0,80	99	94

Алгоритм HDBSCAN також визначає кількість кластерів динамічно, а також він визначає шум власноруч (рис. 4, табл. 5). Це означає, що в результаті кластеризації немає шумних кластерів, оскільки усі шумні повідомлення відсіюються в

процесі, тому із результату зникає параметр *nc*. Оскільки алгоритм власноруч визначає шум, замість силуентної оцінки для визначення розподіленості кластерів використовуємо оцінку DBCV [21], що враховує шум, а також для виміру використовує не відстань, а щільність. Дана оцінка також лежить в межах [-1; 1].

Поєднання NLP-методів разом із HDBSCAN дають позитивні результати. Кількість кластерів для вибірки в 5000 твітів знаходиться в межах від 50 до 200, відхилення не перевищує 200%, та *dbcv* оцінка не набуває негативних значень. Проте варіанти із HDBSCAN є найтривалішими в опрцюванні, а також відсіюють багато шуму.

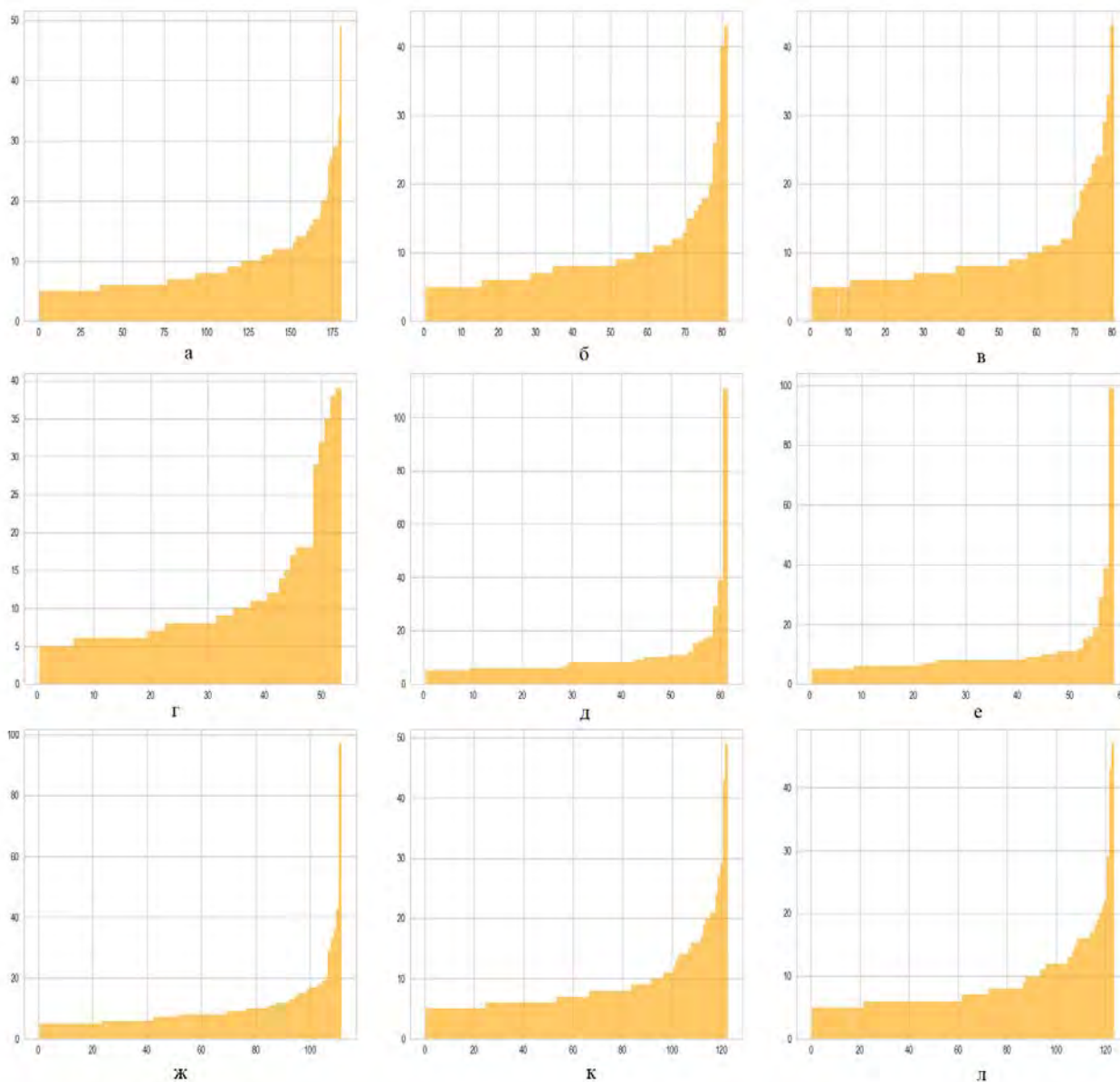


Рисунок 4 – Столпчикові діаграми варіацій підходів для HDBSCAN при застосуванні варіантів original + TF-IDF (а), stemming + TF-IDF (б), lemmatizing + TF-IDF (в), original + BOW (г), stemming + BOW (д), lemmatizing + BOW (е), original + BERT (ж), stemming + BERT (к) та lemmatizing + BERT (л)

Таблиця 5 – Результати кластеризації варіацій підходів для HDBSCAN

Варіант	k	t	σ	$dbcv$	n
original + TF-IDF	180	471,10	65	0,050	66,1
stemming + TF-IDF	81	378,89	70	0,027	84,3
lemmatizing + TF-IDF	80	461,87	68	0,028	84,3
original + BOW	53	599,43	76	0,030	88,2
stemming + BOW	61	378,09	134	0,034	87,2
lemmatizing + BOW	58	487,75	124	0,035	87,9
original + BERT	111	477,76	101	0,074	77,2
stemming + BERT	122	442,50	72	0,068	77,3
lemmatizing + BERT	123	486,91	69	0,063	77,6

Згідно з результатами проведених кластеризацій, оптимальними рішеннями є використання алгоритму кластеризації HDBSCAN та алгоритму векторизації BERT для досягнення найточніших результатів, та використання K-Means разом із TF-IDF для досягнення найкращої швидкодії із оптимальним результатом. Для зменшення часу виконання можна застосувати стемінг.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Після етапу кластеризації твітів за день йде етап злиття із кластерами попереднього дня. Злиття проводиться лише між кластерами із подібними відбитками, для цього необхідно знайти шлях перевіряти подібність відбитків. Розглянемо низку алгоритмів пошуку подібності тексту у порівнянні кластерів. Створимо два набори кластерів з 9000 твітів за один день, кожен набір міститиме 4500 твітів взятих із вибірки у шаховому порядку. Таким чином можна створити набори кластерів, що точно будуть містити подібні елементи. Із кожного набору

створимо по 100 кластерів та порівняємо їх між собою. Це 10000 перевірок з яких до 100 з них мають визначити високу подібність, а решта – низьку.

Підготуємо гістограми із результатами перевірок алгоритмів, де на осі X розміщені подібності, а на осі Y – їхня частота при перевірках (рис. 5). Окрім цього із двох наборів було вручну обрано два кластери, відбитки яких повинні мати велику схожість. Таким чином можна перевірити відмінність між результатом перевірки схожих кластерів та середніми результатами.

Для порівняння скористаємось такими метриками:

- 1) t – час порівняння;
- 2) s_{avg} – середня подібність;
- 3) s_I – подібність кластерів, вибраних вручну;
- 4) s_d – різниця подібностей.

Майже всі алгоритми здійснили 10000 перевірок досить швидко, за винятком Sift4 (рис. 5, табл. 6). Час виконання відіграє важливу роль, коли потрібно здійснювати тони таких перевірок. Певна частина алгоритмів має дуже низьку різницю між середньою подібністю та високою подібністю (<20). Такі алгоритми не є оптимальним вибором для порівнянь відбитків кластерів, оскільки для них складніше вибрати межу, за якою кластер вважається подібним. Найкращі результати показали алгоритми, що використовують Відстань Левенштейна, тобто *fuzz sort*, *fuzz set* та *levenshtein*. Дані алгоритми швидко здійснюють перевірки, мають більшу різницю подібностей, тож можна точніше визначити межу подібності.

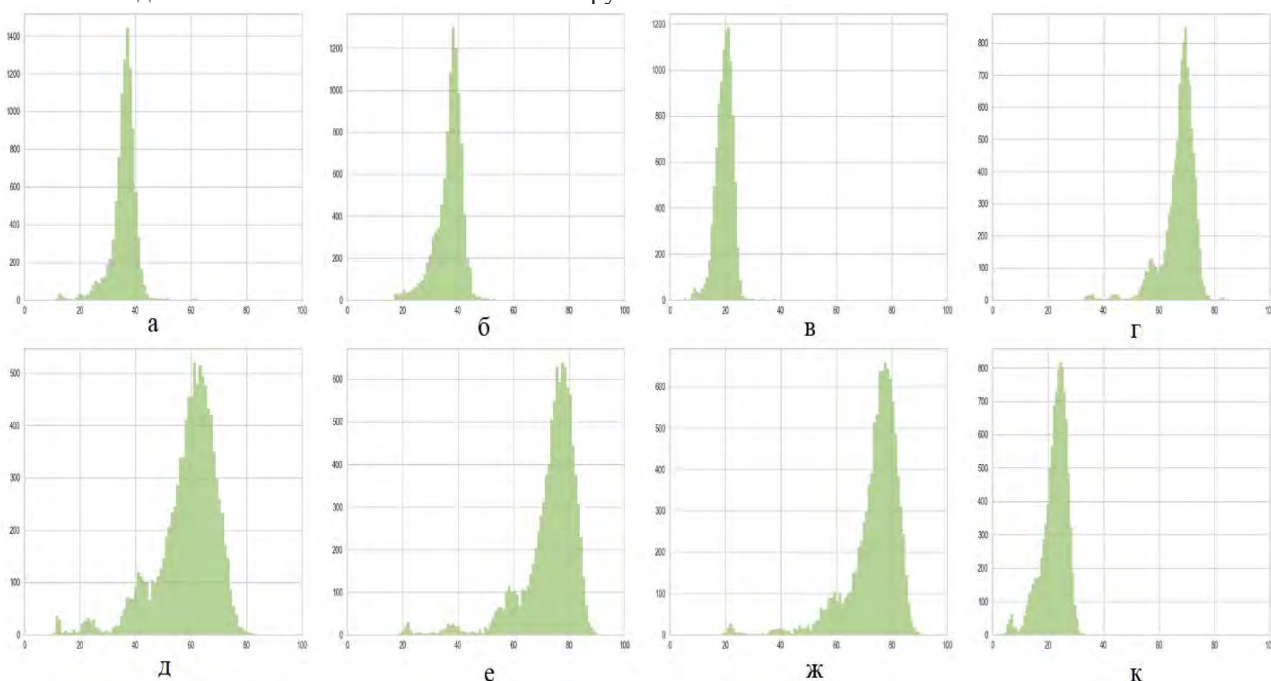


Рисунок 5 – Гістограми подібностей перевірок кластерів різними алгоритмами як Fuzz sort (а), Fuzz set (б), Levenshtein (в), Jaro Winkler (г), Jaccard (д), Sorensen (е), Cosine (ж) та Sift4 (к)

Таблиця 6 – Результати порівняння алгоритмів визначення подібності тексту

Алгоритм	t , сек.	s_{avg} , %	s_1 , %	s_{Δ} , %
Fuzz sort	1,79	35,72	68	32,28
Fuzz set	1,70	36,71	97	60,29
Levenshtein	0,42	19,62	48,05	28,43
Jaro Winkler	0,31	67,15	86,66	19,51
Jaccard	1,25	58,48	75,37	16,89
Sorensen	1,10	73,07	85,96	12,89
Cosine	1,09	73,56	86	12,44
Sift4	25,44	22,40	42,74	20,34

6 ОБГОВОРЕННЯ

Здійснення вибору основних алгоритмів, необхідних в пайплайні, дозволяє спробувати провести процес пайплайну для декількох днів та отримати певні результати. Для цього здійснимо вибірку твітів із семи днів тижня, з кожного дня по 9000 твітів, здійснимо кластеризацію, злиття, та зобразимо популярність обраних кластерів на графіку (рис. 6).

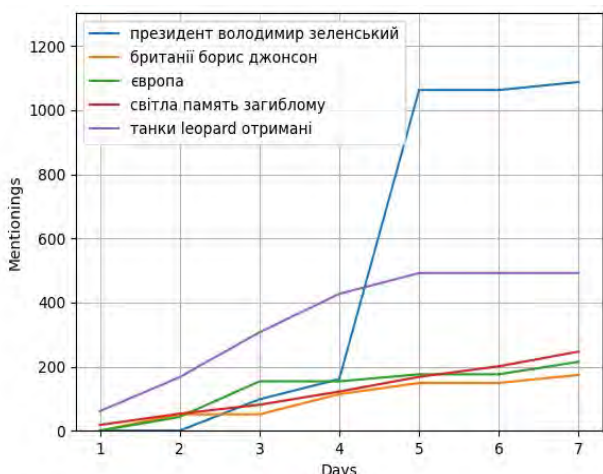


Рисунок 6 – Графік популярності тем протягом тижня

Даний графік отриманий за допомогою K-Means та TF-IDF для кластеризації та векторизації, а також fuzz sort для порівняння відбитків кластерів із межою подібності 55%.

Як бачимо з графіку для лютого 2023 року для українців залишаються самими актуальними темами твіти з ключовими словами президент Володимир Зеленський (блакитний) та танки leopard отримані (фіолетовий). На другому місці популярності є теми світла пам'ять загиблому (червона), Європа (зелена) та Борис Джонсон (оранжевий).

Реалізуємо пайплайн також й для інших алгоритмів кластеризації. Agglomerative кластеризація відзначилась нестабільністю, проте досить збалансованих результатів вдалось досягти у поєднанні із векторизацією TF-IDF. Проведемо пайплайн для цієї комбінації (рис. 7).

Набір тем для цього варіанту є подібним до попереднього за виключенням теми Європа (відбулась заміна на тематику – зменшилося виробництво електроенергії – зелена). Розподіл згадувань також є подібним, проте в даному варіанті він є більш рівномірним. Зрештою, ціною незначного

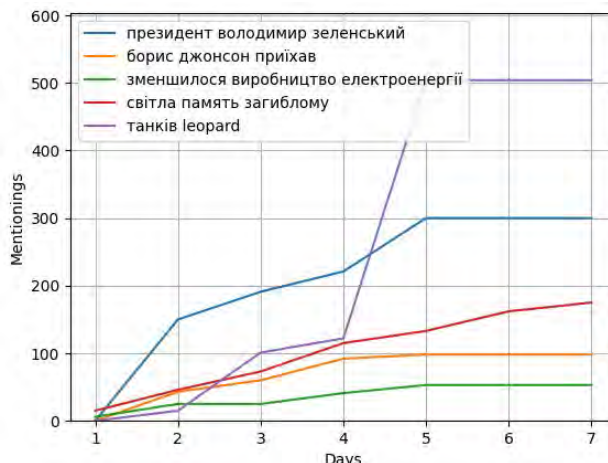


Рисунок 7 – Графік популярності тем протягом тижня для Agglomerative

покращення рівномірності кластерів є значне збільшення тривалості виконання.

Останньою комбінацією для проведення аналізу є HDBSCAN + BERT (рис. 8).

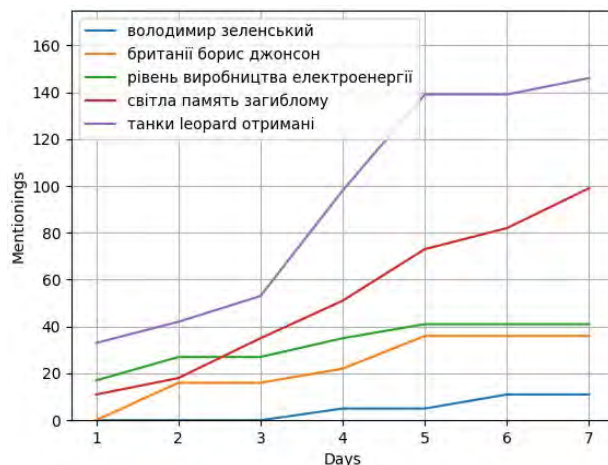


Рисунок 8 – Графік популярності тем протягом тижня для HDBSCAN

Це дослідження показало найкращі метрики якості кластерів при їхньому аналізі (табл. 5). Розподіл тем за такої комбінації практично збігається із результатом для Agglomerative (рис. 7). Із отриманого графіку видно, що загальна кількість згадувань кожної із тем невелика. Це результат визначення значної кількості твітів, як шуму. Час виконання аналізу в декілька разів перевищує Agglomerative кластеризацію, що робить цей підхід непридатним для щоденного аналізу значної кількості твітів (> 100 000). Отримані результати містять як передбачувані, так і досить неочікувані висновки. Невисока точність певних алгоритмів стемінгу може бути пов'язана із різноманіттям української мови так, що алгоритми не завжди приводять до основи коректно. Незважаючи на це, стемінг все ще здійснює позитивний вплив на кінцеву вибірку. Сказати чому лематизація не дає такого ж ефекту, хоча вона також зменшує вхідний словник слів, досить складно. Це може бути пов'язане

із точністю обраного інструменту або із особливостями алгоритмів векторизації та кластеризації, оскільки при певних комбінаціях покращення, все ж, спостерігалось.

Алгоритм векторизації тексту TF-IDF має перевагу над Bag of Words за рахунок врахування частоти слів не тільки в окремих твітах, але й в усій вибірці загалом. Усі алгоритми кластеризації показали цікаві результати. Нестабільність числа кластерів в агломеративній кластеризації може бути спричинене чутливістю алгоритму до вхідних даних та параметрів. HDBSCAN будує хороші кластери за рахунок підходу, що базується на щільності, проте, через різноманітність твітів, щільність є часто невеликою, що залишає, в решті-решт, багато шуму.

Для порівняння відбитків найбільш оптимальними методами стали fuzz sort, fuzz set та levenshtein. Дані методи використовують відстань Левенштейна у своїй роботі. Це показує, що такий підхід добре працює для порівняння наборів ключових слів. Інші алгоритми не можуть показати велику відмінність між різними відбитками, що свідчить про те, що вони не адаптовані до такого роду задач.

Зрештою, отримана статистика популярності кластерів за сім днів. На відміну від статистики, побудованої лише по ключових словах, що відображається, як один із результатів дослідження твітів щодо COVID-19 [22], в запропонованому підході одиницею виміру є не слово чи фраза, а кластер, відбиток якого зберігається для аналізу, або злиття із іншими кластерами. Аналіз відбитків дозволить отримувати результати, як, наприклад, емоційний аналіз, що зображено в тому ж дослідженні або у ще одному дослідженні щодо COVID-19 [23], проте підхід кластеризації та злиття відбитків дозволяє розширювати дану статистику щоденно в автоматичному режимі. Кластеризація твітів вже описана в дослідженні алгоритму DBSCAN для побудови трендів твітів [24]. Проведене дослідження пропонує порівняння різних підходів до кластеризації чи векторизації твітів, а також дозволяє будувати статистику ітеративно. Це дозволяє оптимізувати процес аналізу емоційного стану соціально-активної спільноти для формування прогнозів щодо динаміки зміни громадської думки в конкретному тематичному інформаційному просторі [25–27]. На останок, дане дослідження здійснене на основі аналізу україномовних твітів та визначає оптимальний набір інструментів для роботи із українською мовою.

ВИСНОВКИ

Вирішено актуальне завдання в моделюванні процесів дослідження громадської думки на основі інтелектуального аналізу україномовного потоку контенту в соціальних мережах.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше запропоновано метод знаходження кластеризованих тематичних груп україномовних твітів на різних рівнях попереднього опрацювання україномовних текстів для визначення ефективності

застосування певних NLP підходів, алгоритмів чи інструментів, що дозволило покращити точність пошуку поїдбного контенту. Дослідження здійснене на основі аналізу україномовних твітів та визначає оптимальний набір інструментів для роботи із українською мовою. Досліджено особливості збору, фільтрації та попередньої обробки твітів із врахуванням особливостей української мови. Серед них такі, як: здійснення вибірки твітів зважаючи на подібність української та російської мов, а також імовірність присутності інших мов в україномовних твітах; Видалення зайвих елементів із твітів; Вибір оптимальних інструментів для стемінгу та лематизації українського тексту, зважаючи на відсутність широкого вибору, та дослідження впливу такої обробки тексту на вхідний словник слів. Організовано послідовність процесів у пайплайн, щоденне виконання якого дозволяє будувати тренди тем україномовних твітів, а кожна з тем містить відбиток, який можна використовувати для подальшого аналізу, як частину дослідження громадської думки.

Практична цінність полягає у тому, що вона є структурною складовою процесу оцінювання подібності текстового контенту на основі попереднього опрацювання тексту, векторизації та кластеризації. Здійснено порівняння алгоритмів кластеризації та векторизації тексту за допомогою визначених метрик. Досліджено вплив стемінгу та лематизації на час виконання загальної обробки та на якість отриманих кластерів. Отримано оптимальні варіанти алгоритмів для точного та швидкого варіантів використання. Здійснено порівняння алгоритмів визначення подібності тексту для обрахування схожості відбитків кластерів. Знайдено оптимальні, для використання, алгоритми, що надають хорошу точність та продуктивність. Проведено дослідження трендів одного тижня часу та визначено зміну популярності на прикладі декількох обраних тем.

В результаті проведених експериментів реалізовано та проаналізовано функціонування пайплайн із збору та опрацювання україномовних твітів. На різних етапах опрацювання проведені експерименти для визначення ефективності застосування певних NLP підходів, алгоритмів чи інструментів. Спочатку встановлено, що стемінг та лематизація дозволяють суттєво скоротити вхідний словник слів. Обрано оптимальні алгоритми, згідно їхньої ефективності при опрацюванні української мови. Розглянуто приклад незадовільного стемінгу.

Далі проведено детальне порівняння варіантів кластеризації твітів, що полягають в поєднанні NLP-методів попереднього опрацювання тексту, векторизації та кластеризації. Здійснено 27 різних кластеризацій та проаналізовано їхні результати. Експеримент показав, що стемінг переважно скорочує час опрацювання україномовних твітів, та покращує якість кластеризації. Лематизація також пришвидшує процес, проте часто призводить до погіршення результатів. Алгоритм векторизації тексту Bag of Words програє іншим алгоритмам таким як TF-IDF та

BERT. TF-IDF є оптимальним вибором з точки зору швидкості роботи. Хоч BERT і призводить до покращення результатів, проте така векторизація потребує набагато більше часу. HDBSCAN кластеризація створює найбільш рівнорозподілені кластери, проте також займає багато часу. K-Means є найшвидшим алгоритмом кластеризації серед розглянутих. Агломератова кластеризація хоч і може давати дещо кращі кластери, проте результати її роботи виявились досить нестабільними.

Серед інструментів знаходження подібності тексту найкраще для порівняння відбитків кластерів підходять fuzz sort, fuzz set та levenshtein. За швидкістю здійснення перевірки найкращий результат показав метод levenshtein. Два інших втричі гірше показали швидкість перевірки, але вони майже в 13 разів швидше працюють, ніж Sift4. Найшвидший метод є Jaro Winkler, але він має 19,51% різницю подібностей. Кращу різницю подібностей має метод fuzz set (60,29 %). Друге місце посіли Fuzz sort (32,28%) та Levenshtein (28,43%). Дані методи використовують відстань Левенштейна у своїй роботі. Це показує, що такий підхід добре працює для порівняння наборів ключових слів. Інші ж інструменти показують занадто низьку різницю між середньою подібністю відбитків та подібністю вручну вибраних схожих кластерів. У деяких алгоритмів середня подібність відбитків сягає вище 70%.

В кінці проведення пайплайну отримано графік популярності декількох кластерів за 7 днів часу. Такий процес можна проводити щоденно й постійно отримувати актуальні дані.

Перспективи подальших досліджень полягають в дослідженні громадської думки на основі інших алгоритмів визначення подібності тексту для обрахування подібності відбитків кластерів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної теми «Методи та засоби функціонування систем підтримки прийняття рішень на основі онтологій» (ID:839 2017-05-15 09:20:01 (2459-315)). Дослідження провадилось в межах спільних наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж НУ «Львівська політехніка» на тему «Дослідження, розроблення і впровадження інтелектуальних розподілених інформаційних технологій та систем на основі ресурсів баз даних, сховищ даних, просторів даних та знань з метою прискорення процесів формування сучасного інформаційного суспільства». Наукові дослідження провадилися також в рамках ініціативної тематики досліджень кафедри ICM НУ «Львівська політехніка» на тему «Розроблення інтелектуальних розподілених систем на основі онтологічного підходу з метою інтеграції інформаційних ресурсів».

ЛІТЕРАТУРА

1. Ismail M. A. On Time Series Analysis for Repeated Surveys / M. A. Ismail, H. A. Auda, Y. A. Elzafrany // Journal of

- Statistical Theory and Applications. – 2018. – Vol. 17. – P. 587–596. <https://doi.org/10.2991/jsta.2018.17.4.1>
2. Mellon J. Twitter and Facebook are not representative of the general population: Political attitudes and demographics of British social media users / J. Mellon, C. Prosser // Research & Politics. – 2017. – Vol. 4(3). – P. 1–9. <https://doi.org/10.1177/2053168017720008>
3. Using Social Media to Mine and Analyze Public Opinion Related to COVID-19 in China / [X. Han, J. Wang, M. Zhang, X. Wang] // International Journal of Environmental Research and Public Health. – 2020. – Vol. 17(8). – P. 2788. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082788>
4. Twitter as a sentinel tool to monitor public opinion on vaccination: an opinion mining analysis from September 2016 to August 2017 in Italy / [L. Tavoschi, F. Quattrone, E. D'Andrea et al.] // Human Vaccines & Immunotherapeutics. – 2020. – Vol. 16(5). – P. 1062–1069. <https://doi.org/10.1080/21645515.2020.1714311>
5. Sentiment analyses of multilingual tweets on halal tourism / [S. Ainin, A. Feizollah, N. B. Anuar, N. A. Abdullah] // Tourism Management Perspectives. – 2020. – Vol. 34. – P. 100658. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2020.100658>
6. Twitter Inc. Twitter API / Twitter Inc. – Access mode: <https://developer.twitter.com/en/docs/twitter-api>
7. Moh T.-S. Clustering of Technology Tweets and the Impact of Stop Words on Clusters / T.-S. Moh, S. Bhagvat // ACM-SE : the 50th Annual Southeast Regional Conference : Tuscaloosa, Alabama, 29–31 March 2012 : proceedings. – Alabama: ACM-SE, 2012. – P. 226–231. <https://doi.org/10.1145/2184512.2184566>
8. Mitsch R. SpaCy. Explosion. Industrial-strength Natural Language Processing (NLP) in Python / R. Mitsch. – Access mode: <https://github.com/explosion/spaCy>
9. Kupriienko S. Ukrainian-Stopwords / S. Kupriienko. – Access mode: <https://github.com/skupriienko/Ukrainian-Stopwords>
10. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding / [J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, K. Toutanova] // ArXiv. – 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
11. BERT multilingual base model (uncased) / F. Hugging. – Access mode: <https://huggingface.co/bert-base-multilingual-uncased>
12. Sasirekha K. Agglomerative hierarchical clustering algorithm-a / K. Sasirekha, P. Baby // International Journal of Scientific and Research Publications. – 2013. – Vol. 83(3). – P. 83.
13. McInnes L. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering / L. McInnes, J. Healy // Data Mining Workshops (ICDMW) : International Conference, New Orleans, LA, USA, 18 December 2017 : proceedings. – New Orleans: IEEE, 2017. – P. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.12>
14. YAKE! Keyword extraction from single documents using multiple local features / [R. Campos, V. Mangaravite, A. Pasquali et al.] // Information Sciences. – 2020. – Vol. 509. – P. 257–289. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.013>
15. Paice C. D. An Evaluation Method for Stemming Algorithms / C. D. Paice // Research and Development in Information Retrieval : the 17th Annual International ACM SIGIR Conference, Dublin, Ireland, 1994 : proceedings. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1994. – P. 42–50.
16. Makukha A. Stemmers for Ukrainian / A. Makukha. Access mode: https://github.com/amakukha/stemmers_ukrainian

17. Barbaresi A. Simplemma / A. Barbaresi // Zenodo. – 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7555188>
18. Barbaresi A. Data-Driven Identification of German Phrasal Compounds / A. Barbaresi, K. Hein // Lecture Notes in Computer Science. – 2017. – Vol. 10415 – P. 192–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64206-2_22
19. Barbaresi A. An Unsupervised Morphological Criterion for Discriminating Similar Languages / A. Barbaresi // NLP for Similar Languages, Varieties and Dialects (VArDial3) : Third Workshop, Osaka, Japan, December 2016 : proceedings. – Osaka: ACL Anthology, 2016. – P. 212–220.
20. Barbaresi A. Bootstrapped OCR error detection for a less-resourced language variant / A. Barbaresi // Natural Language Processing (KONVENS) : 13th Conference, Bochum, Germany, September 2016 : proceedings. – Berlin: HAL, 2016. – P. 21–26.
21. Density-Based Clustering Validation / [D. Moulavi, P. A. Jaskowiak, R. J. G. B. Campello et al.] // Data Mining (SDM) : the 2014 SIAM international conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 24–26 April 2014: proceedings. – Philadelphia: SIAM, 2014. – P. 839–847. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973440.96>
22. Boon-Itt S. Public Perception of the COVID-19 Pandemic on Twitter: Sentiment Analysis and Topic Modeling Study / S. Boon-Itt, Y. Skunkun // JMIR Public Health Surveill. – 2020. – Vol. 6(4). – P. e21978. <https://doi.org/10.2196/21978>
23. Global Sentiments Surrounding the COVID-19 Pandemic on Twitter: Analysis of Twitter Trends / [M. O. Lwin, J. Lu, A. Sheldenkar et al.] // JMIR Public Health Surveill. – 2020. – Vol. 6(2). – P. e19447. <https://doi.org/10.2196/19447>
24. DBSCAN algorithm: twitter text clustering of trend topic pilkada pekanbaru / [Mustakim, R. N. G. Indah, R. Novita, et al.] // Journal of Physics. – 2019. – Vol. 1363(1). – P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1363/1/012001>
25. Emotion recognition system project of English newspapers to regional E-business adaptation / [O. Markiv, V. Vysotska, L. Chyrun et al.] // Computer science and information technologies : IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings. – Lviv: IEEE, 2022. – P. 392–397. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000527>
26. Sentiment analysis technology of English newspapers quotes based on neural network as public opinion influences identification tool / [V. Vysotska, O. Markiv, S. Voloshyn et al.] // Computer science and information technologies : IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings. – Lviv: IEEE, 2022. – P. 83–88. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000627>
27. NLP tool for extracting relevant information from criminal reports or fakes/propaganda content / [V. Vysotska, L. Chyrun, O. Brodyak et al.] // Computer science and information technologies : IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings. – Lviv: IEEE, 2022. – P. 93–98. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000563>

Accepted 28.03.2023.
Received 04.05.2023.

UDC 004.9

UKRAINIAN LANGUAGE TWEETS ANALYSIS TECHNOLOGY FOR PUBLIC OPINION DYNAMICS CHANGE PREDICTION BASED ON MACHINE LEARNING

Prokipchuk O. – PhD student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vysotska V. – PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Automation of public opinion research will allow not only to reduce the amount of manual work, but also to obtain time slices of the results without additional efforts. Since direct interaction with respondents should be avoided, public opinion should be analyzed based on the sources of its free expression. Social networks are great for this role, as their people freely publish their thoughts or emotionally truthfully react to published information about certain events. Statistics show that data from social networks is not enough to obtain a full-fledged result, because a significant percentage of people do not use social networks. However, the automation of the study of even such a stratum of the population is already a good result for analyzing the dynamics of changes in public opinion in accordance with events in the country/world and, accordingly, for correcting the processes of public administration in the future.

Objective of the study is to develop a technology for analyzing the flow of Ukrainian-language content in social networks for public opinion research based on finding clustered thematic groups of tweets.

Method. The article develops a technology for finding tweet trends based on clustering, which forms a data stream in the form of short representations of clusters and their popularity for further research of public opinion. An effective approach to tweet collection, filtering, cleaning and pre-processing based on a comparative analysis of Bag of Words, TF-IDF and BERT algorithms is described. The impact of stemming and lemmatization on the quality of the obtained clusters was determined. And optimal combinations of clustering methods (K-Means, Agglomerative Hierarchical Clustering and HDBSCAN) and vectorization of tweets were found based on the analysis of 27 clusterings of one data sample. The method of presenting clusters of tweets in a short format is selected.

Results. Algorithms using the Levenstein Distance, i.e. fuzz sort, fuzz set and levenshtein, showed the best results. These algorithms quickly perform checks, have a greater difference in similarities, so it is possible to more accurately determine the limit of similarity. According to the results of the clustering, the optimal solutions are to use the HDBSCAN clustering algorithm and the BERT vectorization algorithm to achieve the most accurate results, and to use K-Means together with TF-IDF to achieve the best speed with the optimal result. Stemming can be used to reduce execution time.

Conclusions. In this study, the optimal options for comparing cluster fingerprints among the following similarity search methods were experimentally found: Fuzz Sort, Fuzz Set, Levenshtein, Jaro Winkler, Jaccard, Sorensen, Cosine, Sift4. In some algorithms, the average fingerprint similarity reaches above 70%. 3 effective tools were found to compare their similarity, as they show a sufficient difference between comparisons of similar and different clusters (> 20%). Based on the selected effective methods, trend analysis was successfully performed on 90,000 tweets over 7 days for 5 topics of the week using K-Means and TF-IDF for clustering and vectorization, as well as fuzz sort for cluster fingerprint comparison with a 55% similarity threshold.

KEYWORDS: tweet, Ukrainian language, public opinion; trend, clustering, stemming, lemmatization, similarity of clusters.

REFERENCES

1. Ismail M. A., Auda H. A., Elzafrany Y. A. On Time Series Analysis for Repeated Surveys, *Journal of Statistical Theory and Applications*, 2018, Vol. 17, pp. 587–596. <https://doi.org/10.2991/jsta.2018.17.4.1>
2. Mellon J., Prosser C. Twitter and Facebook are not representative of the general population: Political attitudes and demographics of British social media users, *Research & Politics*, 2017, Vol. 4(3), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1177/2053168017720008>
3. Han X., Wang J., Zhang M., Wang X. Using Social Media to Mine and Analyze Public Opinion Related to COVID-19 in China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, Vol. 17(8), P. 2788. <https://doi.org/10.3390/ijerph17082788>
4. Tavoschi L., Quattrone F., D'Andrea E., Ducange P., Vabanesi M., Marcelloni F., Lopalco P. L. Twitter as a sentinel tool to monitor public opinion on vaccination: an opinion mining analysis from September 2016 to August 2017 in Italy, *Human Vaccines & Immunotherapeutics*, 2020, Vol. 16(5), pp. 1062–1069. <https://doi.org/10.1080/21645515.2020.1714311>
5. Ainin S., Feizollah A., Anuar N. B., Abdullah N. A. Sentiment analyses of multilingual tweets on halal tourism *Tourism Management Perspectives*, 2020, Vol. 34, P. 100658. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2020.100658>
6. Twitter Inc. Twitter API. Access mode: <https://developer.twitter.com/en/docs/twitter-api>
7. Moh T.-S., Bhagvat S. Clustering of Technology Tweets and the Impact of Stop Words on Clusters, *ACM-SE : the 50th Annual Southeast Regional Conference : Tuscaloosa, Alabama, 29–31 March 2012, proceedings*. Alabama, ACM-SE, 2012, pp. 226–231. <https://doi.org/10.1145/2184512.2184566>
8. Mitsch R. SpaCy. Explosion. Industrial-strength Natural Language Processing (NLP) in Python. Access mode: <https://github.com/explosion/spaCy>
9. Kupriienko S. Ukrainian-Stopwords. Access mode: <https://github.com/skupriienko/Ukrainian-Stopwords>
10. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding, *ArXiv*, 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1810.04805>
11. Hugging F. BERT multilingual base model (uncased). Access mode: <https://huggingface.co/bert-base-multilingual-uncased>
12. Sasirekha K., Baby P. Agglomerative hierarchical clustering algorithm-a, *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2013, Vol. 83(3), P. 83.
13. McInnes L., Healy J. Accelerated Hierarchical Density Based Clustering, *Data Mining Workshops (ICDMW) : International Conference, New Orleans, LA, USA, 18 December 2017 : proceedings*. New Orleans, IEEE, 2017, pp. 33–42. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2017.12>
14. Campos R., Mangaravite V., Pasquali A., Jorge A., Nunes C., Jatowt A. YAKE! Keyword extraction from single documents using multiple local features, *Information Sciences*, 2020, Vol. 509, pp. 257–289. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.09.013>
15. Paice C. D. An Evaluation Method for Stemming Algorithms, *Research and Development in Information Retrieval, the 17th Annual International ACM SIGIR Conference, Dublin, Ireland, 1994, proceedings*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1994, pp. 42–50.
16. Makukha A. Stemmers for Ukrainian. Access mode: https://github.com/amakukha/stemmers_ukrainian
17. Barbaresi A. Simplemma, *Zenodo*, 2023. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7555188>
18. Barbaresi A., Hein K. Data-Driven Identification of German Phrasal Compounds, *Lecture Notes in Computer Science*, 2017, Vol. 10415, pp. 192–200. https://doi.org/10.1007/978-3-319-64206-2_22
19. Barbaresi A. An Unsupervised Morphological Criterion for Discriminating Similar Languages, *NLP for Similar Languages, Varieties and Dialects (VARDiA13) : Third Workshop, Osaka, Japan, December 2016 : proceedings*. Osaka, ACL Anthology, 2016, pp. 212–220.
20. Barbaresi A. Bootstrapped OCR error detection for a less-resourced language variant, *Natural Language Processing (KONVENS) : 13th Conference, Bochum, Germany, September 2016 : proceedings*. Berlin, HAL, 2016, pp. 21–26.
21. Moulavi D., Jaskowiak P. A., Campello R. J. G. B., Zimek A., Sander J. Density-Based Clustering Validation, *Data Mining (SDM) : the 2014 SIAM international conference, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 24–26 April 2014: proceedings*. Philadelphia: SIAM, 2014, pp. 839–847. <https://doi.org/10.1137/1.9781611973440.96>
22. Boon-Itt S., Skunkan Y. Public Perception of the COVID-19 Pandemic on Twitter: Sentiment Analysis and Topic Modeling Study, *JMIR Public Health Surveill*, 2020, Vol. 6(4), P. e21978. <https://doi.org/10.2196/21978>
23. Lwin M. O., Lu J., Sheldenkar A., Schulz P. J., Shin W., Gupta R., Yang Y. Global Sentiments Surrounding the COVID-19 Pandemic on Twitter: Analysis of Twitter Trends, *JMIR Public Health Surveill*, 2020, Vol. 6(2), P. e19447. <https://doi.org/10.2196/19447>
24. Mustakim, Indah R. N. G., Novita R., Kharisma O. B., Vebrianto R., Sanjaya S., Hasbullah, Andriani T., Sari W. P., Novita Y., Rahim R. DBSCAN algorithm: twitter text clustering of trend topic pilkada pekanbaru, *Journal of Physics*, 2019, Vol. 1363(1), P. 012001. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1363/1/012001>
25. Markiv O., Vysotska V., Chyrun L., Voloshyn S., Dyyak I., Panasyuk V. Emotion recognition system project of English newspapers to regional E-business adaptation, *Computer science and information technologies : IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings*. Lviv, IEEE, 2022, pp. 392–397. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000527>
26. Vysotska V., Markiv O., Voloshyn S., Dyyak I., Budz I., Schuchmann V. Sentiment analysis technology of English newspapers quotes based on neural network as public opinion influences identification tool, *Computer science and information technologies, IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings*. Lviv: IEEE, 2022, pp. 83–88. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000627>
27. Vysotska V., Chyrun L., Brodyak O., Mazepa S., Shakleina I., Schuchmann V. NLP tool for extracting relevant information from criminal reports or fakes/propaganda content, *Computer science and information technologies : IEEE 17th International conference, Lviv, Ukraine, 10–12 November 2022 : proceedings*. Lviv, IEEE, 2022, pp. 93–98. <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000563>

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

UDC 004.414.38

TECHNOLOGY FOR IDENTIFYING AND FORMING POSSIBLE RELATIONSHIPS BETWEEN USE CASES IN THE PROCESS OF THE INFORMATION SYSTEM DESIGN

Kungurtsev O. B. – PhD, Professor, Professor of the Software Engineering Department, Odessa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine.

Zinovatna S. L. – PhD, Associate Professor of the Software Engineering Department, Odessa Polytechnic National University, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Use cases are widely used as a means of formulating requirements in the development of information systems. All subsequent design stages depend on the quality of their presentation. Structuring use cases can significantly increase their understanding and maintenance in the face of changing requirements..

Objective. Flexible technologies involve working in small teams. The existing communication between teams is not sufficient to highlight sub use cases at the project level. There is a need for automated analysis of the corpus of all use cases.

Method. A mathematical model of a use case which makes it possible to define the criteria for comparing scenarios and eliminate the redundancy of descriptions is proposed. A four-step method for restructuring use cases has been developed. At the first stage, use cases are presented in a formalized form. At the second, they are stored in the repository, which ensures their quick search and placement. At the third stage, procedures of scenario comparison are performed. Scenario similarity criteria are proposed. At the fourth stage, the formation of subordinate use cases is carried out, their texts are coordinated with all interested teams, and the use cases that cause subordinate use cases are corrected.

Results. Experiments providing the formalized compilation of use cases by several development teams followed by automated restructuring were carried out to test the proposed solutions. As a result, new subordinate use cases were correctly identified and the scope of use of previously formed ones was expanded. There was a significant reduction in the time for restructuring.

Conclusions. The proposed method of restructuring use cases improves the clarity and consistency of requirements, the possibility of their adjustment and maintenance, and reduces the compilation time. The method can be used in the design of any information system, where the requirements are presented in the form of use cases.

KEYWORDS: Use Case, Subordinate Use Case, Scenario, Information System Design.

ABBREVIATIONS

UC is a use case;
IS is a information system;
SUC is a subordinate use case.

NOMENCLATURE

Actor is the system user who will perform the said UC step;

cA is a condition of transition to an alternative scenario;

Client is an optional element (introduced when it is necessary to specify who the initiative comes from);

data_k is a data that is input and/or output from the system;

dName is the name of the data;

dType is the type of the data;

eList is a list of template elements of a scenario step;

editText is a texts of scenario step edited by the developer;

ep_j is the number of the main scenario step from which the transition to the alternative scenario takes place;

id is the UC identifier;

mAP is a numbered set of extension scenario steps;

mData is a set of data entered into the system or received from it;

mP is a numbered set of items of the main scenario;

mES is a set of alternative scenarios;

mRef is a set of references of the subordinate UC to the UC that access it;

n_i is a number of alternative scenarios;

nP is the number of the scenario step;

p_i is a step text;

pH is the head step number, possible values: empty string, integer;

pText is a scenario step text;

pType is a scenario step type;

refT is a reference to the command that accompanies the UC;

rp_k is the number of the main scenario step, to which the return from the alternative scenario takes place;
 S_i is a UC scenario;
 tp_i is a pre-composed piece of text;
 tu_j is a piece of text formulated by the developer;
 $ucType$ is a UC type, can take two values: main (for main UCs) or subordinate (for subordinate UCs).

INTRODUCTION

UCs are the main way to represent functional requirements [1], and partially non-functional requirements [2] to the designed IS. The quality of the entire project largely depends on the quality of UC writing. There are a number of recommendations for compiling UCs that relate to general issues of selecting UCs, ways of scenario recording in relation to the tasks solved, and formats for presenting UCs. In [3], the concept of “subordinate UC” (SUC) is introduced to define UC, which is called from some step in the scenario of the main UC. Usually, SUCs are formed from extensions of the main UC. There are at least two reasons for this:

- the extension is used in several places. The formation of a SUC from it will simplify the maintenance of requirements and the code that implements them;
- expansion makes the main UC difficult to understand.

The SUC must be linked to the main UC by an include or extend relationship. Fig. 1 shows examples of such relationships.

Within the framework of a large project, dozens or hundreds of UCs are formed by different development teams. Under such conditions, determining the identity of subordinate UCs selected in various subsystems, and, furthermore, finding repeating fragments of scenarios, is a very complex and time-consuming task. The problem becomes even more difficult in the context of global software development [4].

In this paper, it is proposed to consider the problem associated with the allocation of SUC in a broader sense – the elimination of repetitive requirements and the code corresponding to them.

In a simplified form, the process of UC formation in the design of IS is shown in Fig. 2. At the system analyst level, a list of the main UCs can be generated. If several development teams are working on the project, then the allocation of SUC becomes possible only within some parts of the project.

The purpose of the work is to improve the quality of presentation of functional requirements in the form of use cases by eliminating the redundancy of descriptions and introducing UC structuring.

To achieve the said goal, it is proposed to solve the following tasks:

- 1) to create a mathematical model of UC that makes it possible to compare fragments of their scenarios;
- 2) to develop a method for UC restructuring;
- 3) to test the study results.

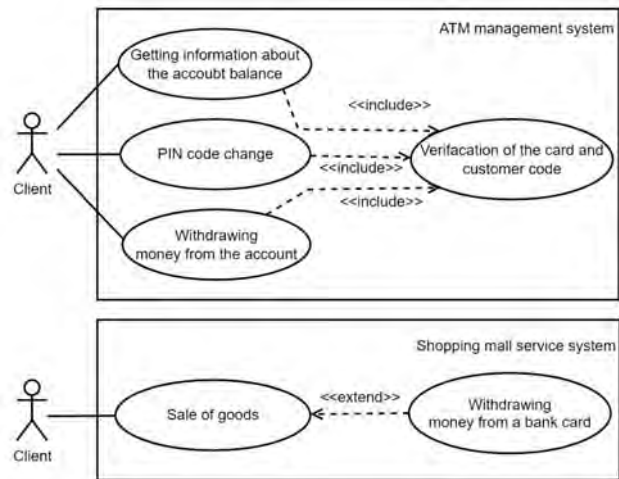


Figure 1 – Relationships between master and subordinate use cases

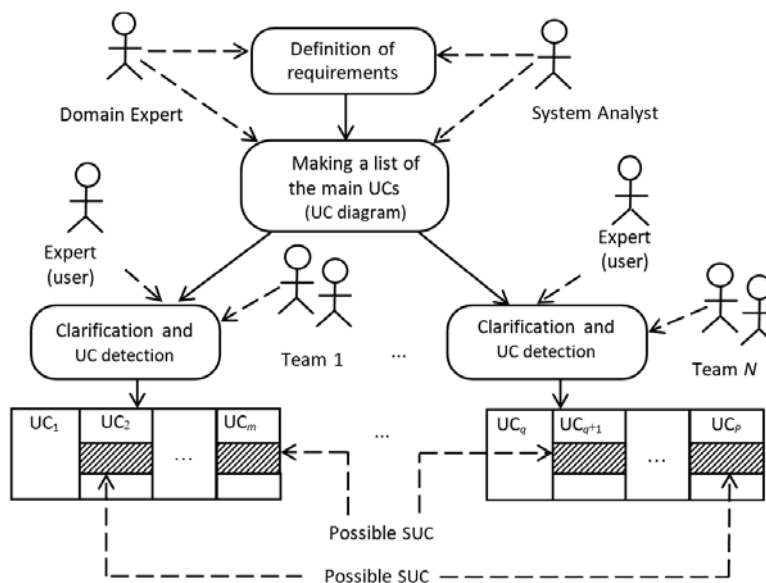


Figure 2 – The process of generating use cases

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose given the set of UC descriptions provided by development teams $mUC = \{UC_1, \dots, UC_i, \dots, UC_t\}$, where each element $UC_i = \langle mUC_i^m, mUC_i^s \rangle$, $i = \overline{1, t}$, consists of mUC_i^m (set of master UC) and mUC_i^s (set of subordinate UC). The problem are create unified set subordinate UCs with a given efficiency $mUC^s = ((\bigcup_{i=1}^t mUC_i^s) \cup \bigcup (mUC_{new}^s)), |mRef_j| \geq p, j = \overline{1, |mUC^s|}$, where mUC_{new}^s is formed using the operation of item belonging to the scenario \in_s for all elements of the set $mUC^m = (\bigcup_{i=1}^t mUC_i^m)$;

create of an updated set of master UC, taking into account new relationships with SUCs $mUC^m \xrightarrow[\text{ref instead of text}]{} mUC_{new}^m$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The need to improve the description of UC for their use at various design stages is indicated in [5].

In [6], it is noted that UCs should be the main tool for communication and verification of requirements by the user. However, the authors believe that expanded class diagrams can be a good mechanism for communicating and checking requirements. In our opinion, first, it is necessary to perform structuring of the UC, which in the future will ensure the construction of high-quality class diagrams. Studies carried out within the framework of the energy project [7] have shown the effectiveness of creating a repository for more than 50 UCs. The authors note that this created the conditions for solving a number of tasks of project progress control, documentation management, profitability and safety improvement. In our opinion, the functions of the repository can be extended with the tasks of analysis and UC restructuring.

The authors propose a formal model of the UC diagram followed by a multiview consistency check. However, the authors do not consider the distribution of functions between UCs.

The need for further formalization of requirements was noted in [9]. It is proposed to use a structured natural language and the corresponding FRET tool. In our opinion, formalization should be introduced wherever there are conditions for this, for example, when forming UC. The problem of presenting UCs with varying degrees of detail is considered in [10]. The complexity of this task is noted and a number of recommendations for “slicing” UC in Agile technologies are given. However, the authors do not propose a formal model for the UC refinement process.

In [11], the problem of low-quality specification of requirements is noted. As a solution, it is proposed to use document templates compiled on the basis of the experience of successfully completed projects. We believe that the use of templates will be especially effective in the

formation of UC and SUC. Such templates were proposed in [12] as part of building a model of conceptual classes based on an automated description of UC.

In [13], the influence of natural language on the quality of work with requirement specifications is noted and it is recommended to use natural language processing tools. In [14], it is proposed to improve the quality of project documentation by expanding the use of formal methods for its presentation. This problem extends to a large extent to the description of UC. Both natural language processing tools and the use of special templates that reduce the ambiguity of text fragments can be its solution. Models of UC scenario steps [15] can be a solution to this problem.

3 MATERIALS AND METHODS

Selection of SUC requires comparison of UC scenarios. It is possible to organize a comparison of scenarios of all UCs to select matching sequences of steps. However, since UCs are compiled by different developers, the probability of finding matching texts is negligible. We can use fuzzy string comparison [16] by introducing certain matching coefficients. However, a very low signal-to-noise ratio is expected in this case too. To solve the problem, it is proposed to introduce certain formalization in the description of UC, expressed in the following steps.

1. When describing all UCs, use a unified classification of scenario steps [12].
2. When describing all UCs, use a unified system of generalized data typing [15].

Let us represent UC in the form of a tuple:

$$UC = \langle id, ucType, mP, mES, mRef, refT \rangle. \quad (1)$$

The $mRef$ parameter makes it possible to determine the efficiency of using the subordinate UC. For main UC $mRef = \emptyset$. In the main UC links to subordinate UCs are provided by a special scenario clause.

Let us represent each alternative scenario as a tuple:

$$UC = \langle id, ucType, mP, mES, mRef, refT \rangle, \quad (2)$$

where $mAP = (p_1, p_2, \dots, p_k)$.

If $rp_k = 0$, then UC ends.

Use case restructuring method provides for the following steps.

Stage 1 – formalized presentation of UC scenarios.

In the representation of the step of the main scenario, extension scenario or SUC, we will indicate its type. The following types of UC steps are proposed in [12]: Create, Enter data, Request a value, Request a list of values, Select from a list, Request a service, Request with a value, Repeat actions, Successful completion of the UC, Failure of the UC, Call of the UC.

For each step type, a model has been compiled that makes it possible to formalize and automate the formation of the step. As an example, the model of the “Value Request” step is given. The user asks the system for some data. This is usually followed by an evaluation of the ob-

tained data by the user. The step description template looks like this:

$$\text{requestValue}=\langle nP [, Client, tp_1, tu_1], Actor, tp_2, tu_2, data_1 [, tp_3, tu_3, data_2][, tp_4, tu_4, data_3, tp_5], tp_6, data_1[, tp_7]\rangle. \quad (3)$$

For them, the developer specifies the position.

The elements of the template can be pre-composed pieces of text (tp_i), pieces of text formulated by the developer (tu_i), and data that is input and/or output from the system ($data_k$). The $data_k$ element is formed from two components: the name of the data and its type. This information is used only by the developer and is not visible to the user. Square brackets enclose optional template elements. Below are the values of the template elements:

- tp_{one} = “wishes to receive”;
 - tu_{one} – is formed by the developer, for example, “repair cost ...”;
 - tp_2 = “requests the system”;
 - tu_2 – is formed by the developer, for example, “repair cost ...”;
 - $data_{one}$ – data that is requested from the system;
 - tp_3 = “based on”;
 - tu_3 – is formed by the developer, for example, “car brands ...”;
 - $data_2$ – data on the basis of which the requested value is determined;
 - tp_{four} = “subject to”;
 - tu_{four} – is formed by the developer, for example, “availability of spare parts ...”;
 - $data_3$ – data on the basis of which the fulfillment of the condition is checked;
 - tp_5 = “The system confirms the fulfillment of the condition” – an optional element;
 - tp_6 = “The system outputs”;
 - tp_7 = “Client/Actor agrees”.
- Service request step template:

$$\text{reqService}=\langle nP [, Client, tp_1, tu_1], Actor, tp_3, tu_2, \{data_1\}, tp_4 [, tp_5, tu_3]\rangle,$$

where tp = “wishes”; tu_1 is a text that identifies the service (e.g. “undercarriage overview”) or document (e.g. “application for a reduced rate”); tp_3 = “enters”; tu_2 – a phrase that is formed by the user, the name of the service or document; $data_1$ – service or document representation in the project; tp_4 = “The system confirms the possibility of performing the service (document)”;

tp_5 = “Transfer of the control to scenario step”; tu_3 – scenario step number.

To formalize the representation of input and output data, the following set of generic types is proposed:

- *List* – list (can represent a linear list, an array, a set, etc.);
- *Struct* – the structure (in the general case it contains fields of different types), must contain the numbering of the fields;
- *Text* – any text;
- *Numb* – any number format;

- *Bool* – boolean value;
- *Void* – the function does not return the value;
- *PClass* – a reference to a class object;

From the point of view of SUC selection, the step of the type “Request for a service” has a special meaning. It may be followed by steps (subordinate), revealing the mechanism for providing the service. It is this sequence of steps that can be a candidate for a SUC formation. To formalize the semantic relationship between steps, it is proposed to introduce link indicators in the form of step numbers into the texts of steps belonging to the “Service Request” group.

Example 1. A scenario fragment that implements registration will look like this:

.....

N. [0] The client wishes to register in the system. The system confirms the possibility of registration.

N+1. [N] The system displays the registration conditions. The client agrees.

N+2. [N] The system suggests entering an email. The client enters. The system confirms the completion of the registration.

Taking into account the considered types of scenario steps and data, we will represent the scenario step in the form:

$$p=\langle nP, pH, pType, pText, mData \rangle. \quad (4)$$

In accordance with the accepted classification, a set can contain up to three data.

Each data has the form

$$mData_i=\langle dName, dType \rangle. \quad (5)$$

Stage 2 – Placement of the UC in the repository.

To simplify the performance of operations with UC (storage, structuring, tracking changes), a repository is created.

Using queries to the repository database (Fig. 3), it is possible to organize the set of all UCs, divided into subsets depending on the commands that work with individual UCs. The common part containing SUC is also selected.

Stage 3 – Comparison of UC scenarios.

Selection of subordinate UCs can be performed at the level of the development team and at the project level.

At the level of the development team, it is possible to select subordinate UCs from the set of UCs that this team is engaged in. We call such a SUC local. Verification and approval of such a selection should occur within the team itself.

At the project level, it is necessary to determine the possibility of using the local SUC of a certain team for UCs developed in other teams. At the same time, the analysis of the possibility of using the SUC should be determined by the team that is proposed to use the SUC. In addition, considering the entire corpus of UCs, it is necessary to ensure the possibility of identifying SUCs that have not previously been created at the level of individual teams.

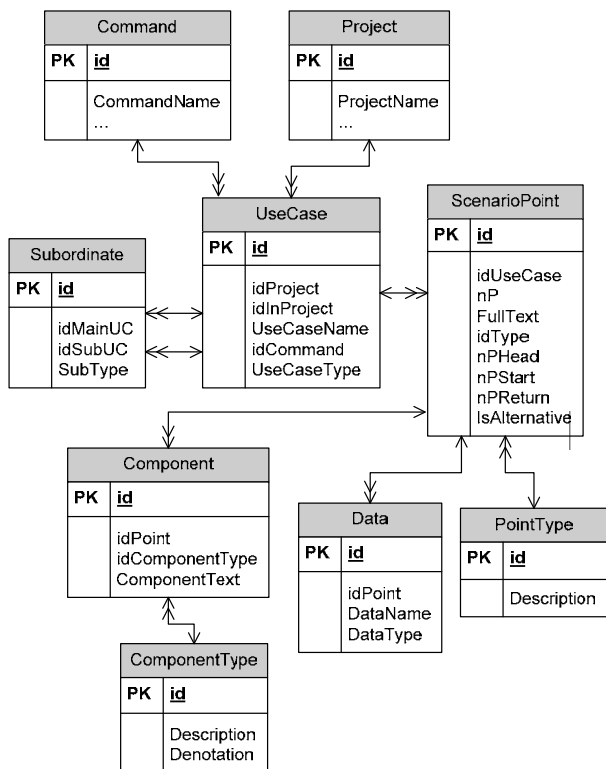


Figure 3 – Repository data model

If a team has selected a SUC within their part of the project and it turns out that the SUC can be used in other parts, then the respective teams must confirm its use in their parts. If a new SUC is selected, then all teams where it will be used must confirm the possibility of its application within their part of the project. Each SUC must have a link to the team (developer). The main operation of the process is finding the occurrence of one scenario into another. Let us determine the main options for comparison:

- the identity of two subordinate UCs is established when the conditions for their call coincide and their sequences of steps coincide;
- a subordinate UC can be selected from two main UCs if a certain common sequence of steps in the scenarios of two main UCs with a length of at least 2 points is determined;
- the entry of a subordinate UC into the UC is fixed if all the points of the subordinate UC coincide with a part of the sequence of UC steps.

A group of semantically related steps should not be split into parts when compared. However, the order of substeps in a group can be arbitrary.

Example 2: A scenario fragment that implements registration in a sequence different from the one in Example 1:

.....
 N. [0] The client wishes to register in the system. The system confirms the possibility of registration.

N+1. [N] The system suggests entering an email. The client enters. The system confirms its correctness.

N+2. [N] The system displays the registration conditions. The client agrees. The system confirms the completion of the registration.

Let us formulate the conditions for the coincidence of two steps from different scenarios.

1. Step types p_i and p_j must match ($pType_i = pType_j$).
2. The actual values of Client and Actor are not compared (the same use case can be performed by different executors in different subsystems of the same project).
3. It follows from the scenario step model (3) that the text of a step of a certain type can have different spellings due to optional elements and elements formed by the developer. Since these elements are important for the specific implementation of the steps, the necessary condition for the steps to match is the identity of their structures.
4. Any step of the scenario, except for the points of repeating actions and calling the SUC, provides for the performance of certain operations in the system of the form: creating an object, entering or receiving data, possibly, if certain conditions are met. Therefore, it is necessary to compare all text fragments formulated by the developer (tu_j).
5. The data that is input, output or created within the framework of the scenario step, in accordance with the template, must have a name and type. Both of these parameters are subject to comparison.

To determine the coincidence of two scenario items, it may be necessary that some elements are identical (we denote this operation as \equiv) and incomplete or fuzzy (we denote this operation as \cong). The result of a fuzzy match is the value of the similarity coefficient K . In what follows, we will consider the elements similar if their similarity coefficient is not less than a certain threshold value ($K \geq K_{min}$). Thus, we obtain the condition for the coincidence of points p_i and p_j , which belong to scenarios S_1 and S_2 , respectively. Here \in_s denotes the operation of an item belonging to a UC scenario.

$$\begin{aligned}
 (p_i \in_s S_1) \equiv (p_j \in_s S_2) & \text{ if } ((pType_i = pType_j) \\
 \wedge (eList_i \equiv eList_j) \wedge (editText_i \cong & editText_j) \quad (6) \\
 \wedge \exists ((dType_{i,k} = dType_{j,k}) & k=1..n)).
 \end{aligned}$$

One step of the main scenario, possibly an alternative one, can have several extension scenarios. In order for the compared items to match, their alternative scenarios must also match. The number of alternative scenarios for the compared steps must match, but the order in which they are written can be arbitrary.

Let us formulate the conditions for the coincidence of semantic groups of steps. If a step p_i is found for which $pH=[0]$, then an ordered set of steps of the subordinate group $g_i=(p_k | p_k \cdot pH=[i])$ should be formed.

If a step p_j is found in some other UC, such that $p_j \cong p_i \wedge p_j \cdot pH=[0]$, then a subordinate group $g_j=(p_q | p_q \cdot pH=[j])$ is created for it.

To form a SUC based on steps p_i and p_j , it is necessary for the number of elements in the groups to be the same |

$g_i | = | g_j | = n$ and for each step from the set g_i , a matching step was found in the set g_j $p_k \cong p_q; k=1, n; q=1, n$.

Let us formulate the conditions for the coincidence of extensions for points p_i and p_j with n_i and n_j alternative scenarios, respectively. First of all, the conditions for switching to an alternative scenario must match:

$$\exists cA_{i,p}: ((cA_{i,p} \cong cA_{j,k}), p=1, n_i; k=1, n_j) \wedge (n_i = n_j). \quad (7)$$

Further, in accordance with (6), the steps of alternative scenarios are compared in pairs, for which condition (7) is satisfied.

If condition (6) is met the first time for scenarios S_1 and S_2 , then a new scenario $S_{1,2}$ is created, the first step of which is $pS_{1,2}=p_i$.

If condition (6) is also satisfied for the next pair of steps $p_{i+1} \cong p_{j+1}$, then step p_{i+1} is added to scenario $S_{1,2}$ and the process of scenario formation continues. Otherwise, the scenario $S_{1,2}$ is destroyed (there is only 1 step in the scenario).

It is proposed to evaluate the degree of coincidence $K_{i,j}$ of two scenarios S_1 and S_2 as an average coefficient of similarity of the steps included into them:

$$K_{i,j} = \frac{\sum k}{n}. \quad (8)$$

Stage 4 – Selection of SUC and UC restructuring.

The execution of the stage involves the following sequence of actions.

1. For each local SUC, its comparison with other local SUC is performed. In case of a match, the SUC is defined as global and a link to the support command is set in it. Local links are replaced with a global one.

2. For each global SUC, the possibility of its inclusion in the UC scenarios is determined. If possible, the UC scenario is edited accordingly. A link to the SUC is set in it.

3. For each UC, a comparison with other UCs (of different localization) is performed. If common parts are selected, then a global SUC is formed, a link to the support command is set in it, scenarios and links in the UC that have a common fragment are edited.

All operations for selecting a new UC or expanding the scope of its use are coordinated with the developer teams, which must introduce changes into the UC descriptions.

4 EXPERIMENTS

To carry out the experiments, a document “Vision” for the development of an information system on the topic “Automation of the work of a clinic”, a list of users of the designed system and a list of UCs of 16 names were compiled. The developers were represented by 4 teams of 2 people. Each group received tasks to form 4 UCs in the UseCaseEditor. The groups were asked, if possible, to form a SUC in addition to the UC.

To test the results of the study, a software product that makes it possible to select SUC on the basis of the entire UC corpus in accordance with the developed methodology was developed.

5 RESULTS

The results were introduced into Table 1 after the discussion with all participants of the experiment. Symbols for UC and SUC were introduced in the table. For example, SUC (1) indicates that it was selected from UC 1 and is not used anywhere else. SUC (1–10–15)s indicates that in terms of content it is SUC (1)s, however, it was found out that it is a part of UC 10 and UC 15. A record of the form (2–6–10*)s means that SUC can be used for UC 2 and UC 6, but its use for UC 10 is a mistake.

The analysis of table data shows that at $K_{min}=0.5$ the best results were obtained: the scope of SUC 1 and 7 was expanded by three UCs, and 2 new UCs were found.

During the experiments, the time spent on compiling UC and SUC was estimated. On average, 3.5 hours were spent on compiling 1 UC. It took 1.5 hours to select and compile one SUC, as well as adjust the UC within one team. The same work, but with unfamiliar UCs (4 UCs from another team) took 3.7 hours. The calculation of the time spent for the given example in the “manual” search for SUC increased the total time of UC formation by 58%.

6 DISCUSSION

Automation of SUC selection became possible due to the use of UC step models. Further formalization of the UC definition, for example, by using a formalized natural language, is undesirable, since it will create inconvenience for the developer. It follows from the experiment results that the quality of SUC selection significantly depends on the value of the similarity coefficient K_{min} . There is no guarantee that $K_{min}=0.5$ value will always be the best. The solution could be to use a domain dictionary to define an additional semantic relationship between compared texts, and as minimum, to use synonyms.

Table 1 – The fragment of experimental results on model building by the formed samples

Developer teams		1	2	3	4	
UC		1, 2, 3, 4	5, 6, 7, 8	9, 10, 11, 12	13, 14, 15, 16	
Selection of SUC	Manual mode	(1)s	(7)s	(9–11)s		
	Auto mode	$K_{min}=0.2$	(1–10–15)s, (2–6–10*)s	(7–13)s, (5–9–16*)s	(12–14)s	(13–15*)s
		$K_{min}=0.5$	(1–10–15)s, (2–6)s	(7–13)s, (5–9)s	(12–14)	
	$K_{min}=0.8$	(1–15)				

The effectiveness of the proposed method of UC restructuring depends on the specific subject area. In the conducted experiment, the tasks for the development of UC were selected taking into account the possibility of selecting SUC. In real conditions, it can be expected that the proportion of SUC in the UC corpus will be 2–3 times lower [3]. This will reduce the time to search for the use of SUC in UC, but not the selection of new SUCs. Therefore, in this case, we can expect a reduction in the time for restructuring by about 30% – 40% as well.

CONCLUSIONS

The analysis of existing technologies for compiling UC was carried out. It was established that working in small teams on projects of medium and high complexity does not allow presenting the UC corpus in a well-structured form.

A mathematical model of the use case characterized by the introduction of the concept of the UC type, references to other UCs and the development team was proposed, which made it possible to further organize the process of comparing the UC and selecting the UC.

For the first time, a method of automated UC restructuring which allows comparing UC scenarios, selecting SUC, correcting the links between UC and SUC was developed. Application of the method makes it possible to improve the structure of the UC corpus, which increases the degree of understanding of the requirements, reduces the time and errors for maintaining requirements due to the elimination of duplication.

The experiments conducted showed the selection of all repeating fragments of scenarios, the correct selection of the SUC and a significant reduction in the time for UC restructuring (about 35%).

The proposed method can be used in any IS project where the functional requirements are presented in the form of UC.

REFERENCES

1. Wazlawick R. S. Object-Oriented Analysis and Design for Information Systems: Modeling with UML, OCL, and IFML. San Francisco, Morgan Kaufman, 2014, 376 p.
2. Nilsen A. F., Muller G. Use Cases and Non-functional Requirements Presented in Compact System Description A3s, *INCOSE International Symposium*, 2014, Vol. 24, Issue 1, pp. 1–15. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2014.tb03130.x
3. Cockburn A. Writing Effective Use Cases. Addison-Wesley, 2001, 270 p.
4. Mighetti J. P., Hadad G. D. S. A Requirements Engineering Process Adapted to Global Software Development, *CLEI*

- Electronic Journal*, 2016, Vol. 19, Issue 3, pp. 1–21. DOI: 10.19153/cleiej.19.3.7
5. Russell M. Supporting Decision Makers with Use Cases; case study result, *Procedia Computer Science*, 2019, Vol. 153, P. 294–300. DOI: 10.1016/j.procs.2019.05.082
6. Dobing B., Parsons J. Understanding the Role of Use Cases in UML: A ReUCew and Research Agenda, *Journal of Database Management*, 2000, Vol. 11, Issue 4, pp. 28–36. DOI: 10.4018/978-1-931777-12-4.ch008
7. Clausen M., Apel R., Dorchain M. Use case methodology: a progress report, *Energy Informatics*, 2018, Vol. 1, pp. 274–283. DOI: 10.1155/2018/6854920
8. El Miloudi K., Ettouhami A. A Multiview Formal Model of Use Case Diagrams Using Z Notation: Towards Improving Functional Requirements Quality, *Journal of Engineering*, 2018, Vol. 2018, pp. 1–9.
9. Giannakopoulou D., Pressburger T., Mavridou A. et al. Automated formalization of structured natural language requirements, *Information and Software Technology*, 2021, Vol. 137, pp. 106590. DOI: 10.1016/j.infsof.2021.106590
10. Linders B. Applying Use Cases in Agile: Use Case 2.0, Slicing and Laminating [Electronic resource]. Access mode: <https://www.infoq.com/news/2014/02/use-cases-agile>
11. Barcelos L. V., Penteado R. D. Elaboration of software requirements documents by means of patterns instantiation, *Journal of Software Engineering Research and Development*, 2017, Vol. 5, pp. 3.1–3.23. DOI: 10.1186/s40411-017-0038-9
12. Kungurtsev O., Novikova N., Reshetnyak M. et al. Method for defining conceptual classes in the description of use cases, *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019: Wilga, 25 May – 2 June 2019, Proceedings. SPIE*, 2019, Vol. 1117624. DOI: 10.1117/12.2537070
13. Ahmed H., Hussain A., Baharom F. The Role of Natural Language Processing in Requirement Engineering, *International Journal of Engineering & Technology*, 2018, Vol. 7, Issue 4.19, pp. 168–171. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.19.22041
14. Shah U. S., Jinwala D. C. Resolving Ambiguities in Natural Language Software Requirements: A Comprehensive Survey, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2015, Vol. 40, Issue 5, pp. 1–7. DOI: 10.1145/2815021.2815032
15. Kungurtsev O. B., Novikova N. O., Zinovatna S. L. et al. Automated object-oriented for software module development, *Applied Aspects of Information Technology*, 2021, Vol. 4, Issue 4, pp. 338–353. DOI: 10.15276/aait.04.2021.4
16. Kalyanathaya K. P., Akila D., Suseendren G. A Fuzzy Approach to Approximate String Matching for Text Retrieval in NLP, *Journal of Computational Information Systems*, 2019, Vol. 15, No. 3, pp. 26–32.

Received 13.03.2023.

Accepted 03.05.2023.

УДК 004.414.38

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ Й ФОРМУВАННЯ МОЖЛИВИХ ВІДНОШЕНЬ МІЖ ВАРІАНТАМИ ВИКОРИСТАННЯ В ПРОЦЕСІ ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Кунгурцев О. Б. – канд. техн. наук, професор кафедри Інженерії програмного забезпечення Національного університету "Одеська політехніка", м. Одеса, Україна.

Зіноватна С. Л. – канд. техн. наук, доцент кафедри Інженерії програмного забезпечення Національного університету "Одеська політехніка", м. Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Варіанти використання широко використовуються як засіб формування вимог при розробці інформаційних систем. Від якості їхнього представлення залежать всі наступні етапи проектування. Структуризація варіантів використання дозволяє істотно підвищити їхнє розуміння й супровід в умовах мінливих вимог. Гнучкі технології передбачають роботу в невеликих командах. Існуючий обмін інформацією між командами недостатній для виділення підлеглих варіантів використання на рівні проекту. Існує необхідність автоматизованого аналізу корпусу всіх варіантів використання. Метою дослідження є підвищення якості представлення функціональних вимог у вигляді варіантів використання шляхом усунення надмірності описів і введення структуризації варіантів використання на рівні всього проекту.

Метод. Запропонована математична модель варіанта використання, яка дозволяє визначити критерії для порівняння сценаріїв. Розроблено метод реструктуризації варіантів використання, який включає чотири етапи. На першому етапі варіанти використання представляються у формалізованому вигляді. На другому – вони зберігаються в репозиторії, що забезпечує їхній швидкий пошук і розміщення. На третьому – виконуються процедури порівняння сценаріїв. Запропоновано критерії подоби сценаріїв. На четвертому – виконуються формування підлеглих варіантів використання, узгодження їхніх текстів із усіма зацікавленими командами, коректування варіантів використання, які викликають підлегли варіанти використання.

Результати. Для апробації запропонованих рішень проведені експерименти, які передбачають формалізоване складання варіантів використання декількома групами розроблювачів з наступною автоматизованою реструктуризацією. У результаті були коректно виявлені нові підлегли варіанти використання й розширена область використання раніше сформованих. Спостерігалось істотне скорочення часу на реструктуризацію. Очікуване скорочення часу на реструктуризацію для реального проекту складе близько 35%.

Висновки. Запропонований метод реструктуризації варіантів використання дозволяє поліпшити дохідливість і погодженість вимог, можливість їхнього коректування й супроводу, скоротити час на складання. Метод може бути використаний при проектуванні будь-якої інформаційної системи, де вимоги представляються у вигляді варіантів використання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: варіант використання, підлеглий варіант використання, сценарій.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Wazlawick R. S. Object-Oriented Analysis and Design for Information Systems: Modeling with UML, OCL, and IFML / R. S. Wazlawick. – San Francisco : Morgan Kaufman, 2014. – 376 p.
2. Nilsen A. F. Use Cases and Non-functional Requirements Presented in Compact System Description A3s / A. F. Nilsen, G. Muller. // INCOSE International Symposium. – 2014. – Vol. 24. Issue 1. – P. 1–15. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2014.tb03130.x
3. Cockburn A. Writing Effective Use Cases / A. Cockburn. – Addison-Wesley, 2001. – 270 p.
4. Mighetti J. P. A Requirements Engineering Process Adapted to Global Software Development / J. P. Mighetti, G. D. S. Hadad // CLEI Electronic Journal. – 2016. – Vol. 19, Issue 3. – P. 1–21. DOI: 10.19153/cleiej.19.3.7
5. Russell M. Supporting Decision Makers with Use Cases; case study result / M. Russell // Procedia Computer Science. – 2019. – Vol. 153. – P. 294–300. DOI: 10.1016/j.procs.2019.05.082
6. Dobing B. Understanding the Role of Use Cases in UML: A ReUCew and Research Agenda / B. Dobing, J. Parsons // Journal of Database Management. – 2000. – Vol. 11, Issue 4. – P. 28–36. DOI: 10.4018/978-1-931777-12-4.ch008
7. Clausen M. Use case methodology: a progress report / M. Clausen, R. Apel, M. Dorchain // Energy Informatics. – 2018. – Vol. 1. – P. 274–283. DOI: 10.1155/2018/6854920
8. El Miloudi K. A Multiview Formal Model of Use Case Diagrams Using Z Notation: Towards Improving Functional Requirements Quality / K. El Miloudi, A. Ettouhami // Journal of Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – P. 1–9.
9. Automated formalization of structured natural language requirements / [D. Giannakopoulou, T. Pressburger, A. Mavridou et al.] // Information and Software Technology. – 2021. – Vol. 137. – P. 106590. DOI: 10.1016/j.infsof.2021.106590
10. Linders B. Applying Use Cases in Agile: Use Case 2.0, Slicing and Laminating [Electronic resource] / B. Linders. – Access mode: <https://www.infoq.com/news/2014/02/use-cases-agile>
11. Barcelos L. V. Elaboration of software requirements documents by means of patterns instantiation / L. V. Barcelos, R. D. Penteado // Journal of Software Engineering Research and Development. – 2017. – Vol. 5. – P. 3.1–3.23. DOI: 10.1186/s40411-017-0038-9
12. Method for defining conceptual classes in the description of use cases / [O. Kungurtsev, N. Novikova, M. Reshetnyak et al.] // Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2019: Wilga, 25 May – 2 June 2019 : Proceedings. – SPIE, 2019. – Vol. 1117624. DOI: 10.1117/12.2537070
13. Ahmed H. The Role of Natural Language Processing in Requirement Engineering / H. Ahmed, A. Hussain, F. Baharom // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7, Issue 4.19. – P. 168–171. DOI: 10.14419/ijet.v7i4.19.22041
14. Shah U. S. Resolving Ambiguities in Natural Language Software Requirements: A Comprehensive Survey / U. S. Shah, D. C. Jinwala // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. – 2015. – Vol. 40, Issue 5. – P. 1–7. DOI: 10.1145/2815021.2815032
15. Automated object-oriented for software module development / [O. B. Kungurtsev, N. O. Novikova, S. L. Zinovatna et al.] // Applied Aspects of Information Technology. – 2021. – Vol. 4, Issue 4. – P. 338–353. DOI: 10.15276/aait.04.2021.4
16. Kalyanathaya K. P. A Fuzzy Approach to Approximate String Matching for Text Retrieval in NLP / K. P. Kalyanathaya, D. Akila, G. Suseendren // Journal of Computational Information Systems. – 2019. – Vol. 15, No.3. – P. 26–32.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR STUDYING TRAFFIC OF MULTISERVICE NETWORKS

Morkun V. S. – Dr. Sc., Professor, Professor at the University of Bayreuth, Bayreuth, Germany.

Hryshchenko S. M. – PhD, Senior Researcher in the Specialty Automation and Computer-Integrated Technologies State Tax University, Irpin, Ukraine.

Nizhehorodtsev V. O. – PhD, Senior Researcher in the Specialty Automation and Computer-Integrated Technologies State Tax University, Irpin, Ukraine.

Filonenko M. M. – PhD, Associate Professor Head of the Department Computer and Information Technology and Systems, State Tax University, Irpin, Ukraine.

Lagovsky V. V. – PhD, Associate Professor of the Department of Computer and Information Technologies and Systems, Head of Department Cybernetics and Applied Mathematics State Tax University, Irpin, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The constant growth in the volume of information, the increase in the speed of information flows in digital communication networks, as before, makes the task of assessing the service stability for traffic flows an urgent one. A simple solution to ensure high service stability is to build a network of sufficient capacity for any traffic that will be thrown at it. To solve the problems of analyzing telecommunication systems, it is necessary to have appropriate models and engineering methods that allow to assess the service stability and predict the characteristics of their operation based on measurement data. In these conditions, the development of new methods for analyzing the traffic of multiservice networks that provide simplicity of calculations and their acceptable accuracy becomes especially relevant.

Objective. The purpose of this paper is to study the traffic and service stability for users.

Method. We propose a hybrid method for detecting anomalies in multiservice network traffic that uses algorithms without identification, adaptation and Mamdani fuzzy inference. The peculiarity of multiservice traffic as an object for assessing the existence of anomalies is the presence of stochastic processes in it subject to different distribution laws. For the experimental evaluation of the proposed method and algorithms, we have chosen the Poisson and Pareto distribution laws that define the limiting cases of traffic regularity. The method allows for monitoring and managing faults in a multiservice network in order to determine the causes of their occurrence. The following requirements are imposed on the developed algorithms for detecting anomalies in the traffic on multiservice networks: functioning in real or near real time; maintaining a given service stability; simplicity of implementation. The algorithms belong to the class of adaptive hybrid algorithms for identifying traffic parameters. They are used for both stationary and non-stationary traffic. Traffic is modeled as stochastic processes. Each belongs to the corresponding class, which is determined by the law of distribution of stochastic processes.

Results. Experimental evaluation of the proposed method and algorithms has shown that they allow us to estimate the trends of these stochastic processes in real time, with high accuracy and while maintaining the service stability.

Conclusions. The application of the developed method of troubleshooting management in a multiservice environment helps to improve the service stability by timely detecting problems, reducing the time of their elimination and reducing downtime, which, in turn, affects the increase in service reliability.

KEYWORDS: multiservice networks, traffic, quality, faults, method, user.

ABBREVIATIONS

MSN – multiservice networks;
SP – stochastic processes;
MSA – modified stochastic Approximation;
PGP – pseudogradient procedures.

NOMENCLATURE

a_0 – random process of average value;
 σ – standard deviation;
 μ – parameter;
 S_i – average value of traffic intensity at a given time i ;
 m_0 – initial value of the trend average;
 ρ – trend correlation coefficient;
 r – size of the sliding window;
 R – the value of the linguistic variable assessed by the presence of anomalies;
 N – sample size;
 S_i – element i at the polls;
 μ_i – algorithm parameter in the step i ;

$M\{*\}$ – function for calculating the mathematical expectation;

A – fuzzy threshold values determined during the training of the fuzzy inference system;

B – fuzzy threshold values determined during the training of the fuzzy inference system;

D – fuzzy threshold values determined during the training of the fuzzy inference system.

INTRODUCTION

The current level of development of the information society and intellectual spheres of human activity in modern society is based on the use of digital and telecommunication technologies. An analysis of recent research and publications on the subject shows that the use of modern information technologies has been studied by Morkun V. S., Hryshchenko S. M., Kravchenko O. M. [1–3], Leland W. E. [4] and other scientists. The constant growth in information volume and the increase in the speed of information flows digital communication networks still

make it an urgent task to assess the service stability of traffic flows. The task of modern telecommunication systems is to ensure a given level of service quality.

The continuous improvement of the telecommunications industry has changed both the pricing policy and the overall reduction of the data transmission load. To solve the problems of analyzing telecommunication systems, it is necessary to have appropriate models and engineering methods that allow to assess the service stability provision and predict the characteristics of their operation based on measurement data.

In these conditions, the development of new methods for analyzing the traffic of multiservice networks that ensure simplicity of calculations and their acceptable accuracy becomes especially relevant.

In packet-based multiservice communication networks, packet flows (traffic) differ significantly from the Poisson flow model, which is described by an exponential distribution function of the time interval between the arrival times of neighboring packets. Here, packet flows are formed by many different sources of requests for services provided by the network and network applications that provide video, data, broadcasting, etc. The request sources involved in the process of creating a packet stream differ significantly in their specific load intensity. The load intensity of the resulting packet stream at any given time depends on which applications are served by the request sources and the ratio of their number on different applications. The traffic structure is also affected by the technical and technological features of the service algorithms. If, for example, the service is provided by several applications, or if the protocols use retransmission of incorrectly received packets, the moments when requests for establishing communication sessions occur are highly correlated. As a result, the outgoing flows undergo significant changes during the service process and long-term dependencies in the intensity of packet arrivals appear in the final traffic. Customers are demanding more reliable performance guarantees from the network. In particular, multimedia applications often require minimal bandwidth and maximum latency to process products. The quality, reliability, and accuracy of services are the signs of control.

This is an area in which the Internet is going through a long period of renewal.

A simple solution to ensure high service stability is to build a network with enough capacity for any traffic that will be thrown at it. The name of this solution is redundant provisioning. The resulting network will carry application traffic without significant loss and, with a decent routing scheme, deliver packets with low latency. Performance doesn't get any better than that.

The object of study – is the traffic on multiservice networks.

The subject of study – multiservice networks based on the analysis of the distribution of the number of applications. To achieve this goal, the following research methods were used:

– Analysis of different views of scientists on the problem under study; –To study the state of its development; – structural and functional – To identify and characterize models and engineering methods; – Comparison – to identify the quality characteristics of service quality assurance, generalization – to determine the state of traffic research and quality assurance for users.

The purpose of the work traffic and the quality of user experience.

1 PROBLEM STATEMENT

The requirements of modern multiservice networks are constantly growing today, due to the fact that the life of a modern person is increasingly "merging" with the global Internet.

Multiservice networks allow us to receive a large number of services (IPTV, VoIP, video on demand, social networks, corporate networks, etc.) using a common infrastructure.

The development of modern multiservice computer networks is an important issue of modern society: first, multiservice computer networks are a necessary factor for human access to modern technologies that greatly facilitate life, and second, the development of multiservice networks is an important component of economic development both at the level of an individual enterprise and at the state level.

Multiservice networks have an advantage over customers in realizing the following important functions, namely:

- Provide high-quality data transmission;
- Efficient use of the bandwidth of the existing backbone communication channels;
- Building a secure data transmission scheme;
- Implementation of a unified management system for all departments and branches;
- Organizing a system of redundant data transmission channels and Internet access;
- Information resources management and centralized monitoring;
- Creation of a unified telephone network with a single address space;
- Introduction of new corporate services and applications;
- Implementation of a unified administrative and technical policy in the field of information exchange;
- Eliminating duplication of functions and increasing employee productivity and reducing costs for all communication channels;
- Increasing the organization's competitiveness;
- Increase in employee productivity.

To verify the efficiency and accuracy requirements of the proposed method and algorithm, we use as a testbed. Traffic anomalies are evaluated and identified. The A, B, and D were determined pre-variously based on the training results. The random process had an $a_0=100$ and $\sigma=10$. The ρ for different dependencies varied from 0.6 to 0.9999. It can be seen that at small values of the error μ , traffic estimates differ greatly from each other depending

on the value ρ . At large values of μ , these errors become approximately equal. The rules for setting the parameters of the modified stochastic approximation are formed. For example, when $S_i = 100$, $\sigma = 10$ and $\rho = 0.9999$, the stochastic algorithm parameter is approximately 0.025. For $\rho = 0.99$, the parameter μ will have a value of approximately 0.12. The parameters σ and ρ are estimated in a sliding window. The correlation coefficient of the process variables in the experiments from 0.9 to 0.99999. The SP had the following parameters: initial value of the trend mean $m_0 = 500$, $\rho = 0.99$, size of the sliding window $r = 10$, $\mu = 0.05$, $\sigma = 100$. Thus, it is necessary to verify that the proposed algorithm works almost without delays and has a high estimation accuracy. The relative error of the algorithms is 12% of the true trend value. This is a result that should be considered within the normal range, given that the algorithms work in real time, since the values obtained for the detection time range from 15 to 80 time samples. At the final stage, the developed algorithms for detecting anomalies in the traffic on multiservice networks should fully meet the requirements of efficiency and accuracy. The task of developing a method for studying the traffic of multiservice networks is considered in this article.

2 2 REVIEW OF THE LITERATURE

At the same time, there are a number of works [4–11], in which separate attempts have been made to apply methods of fuzzy knowledge processing for modeling and estimation of network traffic. However, the direct application of the results obtained in these works is not possible for MSN. This is due to the fact that the statistical properties of traffic in MSN are very different both for different operating conditions. The reason is that the statistical properties of traffic differ greatly from one operating condition to another and from one application to another in the MSN. We need an approach that provides the network with this quality in real time and can be implemented quite easily.

Various approaches to building multiservice networks and traffic analysis are reflected in the works of foreign authors Leland W. E. [4], Kosenko V., Persiyanova E., Belotskiy O., Maleieva O. [5], Kosenko V, Bugas D. [6], Xi N., Sun C., Ma J., Shen Y. [7] etc.

Controlling network operation and eliminating congestion are all part of ensuring that the required level of network quality reliability is maintained. In the absence of adequate models of network traffic, the Poisson model is often simplified for analysis and synthesis, and with a significant loss of accuracy. Forms of estimating queue sizes that were previously used are suitable exclusively for Poisson flows, and, when calculating traffic, give errors exceeding 100–200%.

Observing the flow of traffic is called traffic policy (policing and shaping).

The increase in the volume of services provided leads to the need for rapid network reorganization, the emergence of new subscribers and load redistribution. All of

this necessitates a quick assessment of the required bandwidth of access interfaces.

The telecommunications community has many different definitions of MSN.

Let's consider some of them, emphasizing the shortcomings: these are networks that provide more than one service – in fact, a literal interpretation (from the simple translation of “multi” – many, “service” – service, i.e. networks that provide “many services” or, more precisely, many types of them), but at the same time quite broad, which does not allow to formulate a precise definition:

- modern transmission networks – a vague definition (it is unclear what “modern” means in this context);
- broadband transmission networks – intuitively reflects the essence of the issue, but has a number of systemic shortcomings;
- next generation communication networks (NGN – Next Generation Networks);
- networks ready to provide any telecommunications and information services.

An integral telecommunications infrastructure that has sufficient resources to support all forms of information exchange performed for the benefit of a provider or consumer of various services.

The various definitions above contain a number of shortcomings – there is none that can be considered complete and reflects the essence of the issue. Therefore, the following wording is proposed as a definition of the concept of “multiservice network”: a multiservice communication network is a single telecommunications infrastructure for transferring, switching traffic of any type generated by the interaction of consumer's and providers of communication services with controlled and guaranteed traffic parameters. This network should guarantee the specified quality of connections and services provided.

A multiservice network is an integrated telecommunications infrastructure that has sufficient resources to provide all forms of information exchange performed in the area of supplier or consumer of various services.

Modern multiservice networks can provide the following services:

1. Voice transmission based on IP telephony using IP telephones and personal computers connected to the public telephone network.
2. Videotelephony between two or more users based on an Ethernet network, which allows simultaneous transmission of audio and video information using personal computers equipped with special hardware and software.
3. Access to the databases, operating within the MSN.
4. Access to file server resources, which usually have a large amount of disk space, can store heterogeneous information and are designed to perform input and output operations. Access to file servers is regulated by the MSN administrator and may be restricted for external users.
5. A web server through which MSN users can host their own resources available to external users.
6. Access to the Internet.

7. An email server that is connected to the Internet and allows MSN users to interact with it using email client programs and transmit information both within and outside of MSN.

3 MATERIALS AND METHODS

Traffic refers to a digital data stream containing various types of messages that are received by the human senses (usually audio and/or video information). Data streams are transmitted over telecommunication networks to provide remote interactive services. The most common multimedia services provided to network users today are: video telephony, high-speed multimedia data transmission, IP telephony, digital television broadcasting, mobile video communications and digital video on demand.

Depending on the type of service provided, there are two main categories of traffic.

1. Real-time traffic that provides multimedia services for the transmission of information between users in real time.

2. Ordinary data traffic generated by traditional distributed services of a modern telecommunications network, such as email, file transfer, virtual terminal, remote access to databases, etc.

Examples of services that generate real-time traffic include: IP telephony, high-quality sound, videotelephony, video conferencing, remote medical services (diagnostics, monitoring, consultation), video monitoring, broadcast video, digital television, broadcasting radio and television programs.

The description and analysis of multimedia traffic in modern telecommunication networks are a complex and difficult task. The main reasons for these difficulties are

- a wide range of transmission speeds – from several Kbit/s, as in the case of telephone traffic, to hundreds of Mbit/s, when transmitting video streams;

- various statistical properties of the transmitted multimedia information flows (real-time traffic imposes strict requirements on network resources);

- a wide variety of network configurations, many technologies and transmission protocols (Gigabit Ethernet, etc.)

- multi-level processing of transmitted messages, which makes the service stability dependent on several levels of processing.

Traffic in the MSN consists of the following components: 1) multimedia traffic, which is very sensitive to delays; 2) data traffic; 3) signal information traffic; 4) e-mail traffic. In this case, the specified requirements for the service stability must be fully met. However, there are objective difficulties in the construction of the MSN control system and in the protection of network and subscriber information. These problems are caused by the complexity of the MSN structure, the diversity of the network, and the need to look at a lot of different network and information parameters. Therefore, prompt detection of network traffic anomalies is one of the key objectives of MSN management.

This article considers a new approach to traffic anomaly detection in MSN, based on the application of fuzzy logical inference. Approach to traffic anomaly detection in MSS, based on the application of fuzzy logical inference. The rules of such inference are used together with modified Identity-free algorithms.

The main theoretical contribution of the paper is as follows. First, it substantiates a model of multiservice traffic is substantiated. Second, it provides methods and algorithms for detecting of traffic anomalies in the MSN, based on the application of fuzzy logical inference. Finally, it has been experimentally proved that the proposed algorithms The proposed algorithms have practically maximal possible speed of operation.

To develop methods for detecting anomalies in MSN traffic, we propose to develop a model of multi-service traffic. The MSN traffic model is a combination of many stochastic processes. The proposed approach to the formation of a multiservice traffic model is based on the following factors: SP distribution laws; SP stationarity; SP self-similarity; characteristics selected for SP analysis. Different distribution laws are used to model different types of traffic. For example, if the modeled traffic is “Audio” or “Video”, then it gives the effect of self-similarity, and the Pareto distribution is used to model it. If the modeled traffic is generated by SMTP/TCP protocols, then the Poisson distribution or exponential distribution is used. An important factor is stationarity and non-stationarity, it is better to solve the problem of detecting anomalies in traffic if it is stationary. It is better to analyze traffic using various characteristics of a random process. Such characteristics are the maximum, minimum, and average values of the process intensity, standard deviation, etc. The average value of the process intensity is calculated using the formula:

$$S_{mid} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_i. \quad (1)$$

The following requirements are imposed on the developed algorithms for detecting anomalies in MSN traffic: functioning in real or near real time; maintaining a given service stability; and ease of implementation. The algorithms belong to the class of adaptive hybrid algorithms for identifying traffic parameters. They are used for both stationary and non-stationary traffic. Traffic is modeled in the form of SP. Each SP belongs to the corresponding class, which is determined by the SP distribution law.

The essence of the hybrid method for detecting anomalies in MSN traffic is that, on the one hand, algorithms are used without identifying adaptation to changing SP parameters. On the other hand, fuzzy inference is used to adjust algorithm parameters and make decisions.

The use of this hybrid approach is due to the need to estimate both current point and integral traffic parameters. Estimation of integral traffic parameters is performed in a sliding window. The estimation of current point parameters is performed from point to point simultaneously with

the integral estimation procedure. In this case, the estimates obtained in the sliding window are used as initial values for the unidentified procedure. To perform this procedure, two algorithms are used that differ in their capabilities for SP approximation. The combination of these approaches allows both to estimate the integral properties of the SP and to track the dynamics of its behavior.

The use of fuzzy inference allows us to build parametric estimates of the algorithm parameters from a small number of observations. In this case, it becomes possible to draw fuzzy conclusions about traffic anomalies.

Let SP be given in discrete time values $t_i=i, i=1, 2, \dots$. The first algorithm is the algorithm MSA:

$$S_{i+1} = S_{i-1}\mu_i(S_i - S_{i-1}). \quad (2)$$

The second algorithm is used when the probability density of SP values is symmetric. It is based on the use of PGP of the form

$$S_{i+1} = S_{i-1} + \mu_i \text{sign}(S_i - S_{i-1}). \quad (3)$$

This choice of the first and second algorithms provides an assessment of the dynamic properties of the SP. Since the MSA and PGP algorithms belong to the class of non-identifying algorithms, the time for traffic analysis and anomaly detection is significantly reduced. The quadratic function in the form of:

$$M \left\{ (S_1 - S_{i-1})^2 \right\} \quad (4)$$

Parameter μ_i for MSA и PGP must meet the following conditions:

$$0 < \mu_1 < 1, \mu_i = \text{const}. \quad (5)$$

The peculiarity of the MSA and PGP algorithms is the fact that it is necessary to adjust the value of the μ_i for different SP being evaluated and their statistical properties. It is proposed that the procedure for adjusting these algorithms should be based on the Mamdani fuzzy inference method, according to which the identification of the parameters of the MSA and PGP algorithms is carried out using rules that have the following form in general:

$$\begin{aligned} &IF \langle S_i = A \rangle AND \langle \sigma = B \rangle AND \\ &\langle \rho = D \rangle THEN \mu = R. \end{aligned} \quad (6)$$

The identification of anomalies in the MSN traffic is carried out on the basis of fuzzy inference of the following type:

$$\begin{aligned} &IF \langle S_i = A \rangle AND, \\ &\langle A \text{ complies with the security policy} \rangle \\ &THEN R. \end{aligned} \quad (7)$$

To perform the anomaly identification procedure, it is necessary to first train the fuzzy inference system with

experimental data. The experimental data is generated in advance.

When choosing the size of the sliding window, a reasonable compromise must be found between the rate of change of SP values, the size of the window, and the representativeness of the sample of SP values. This compromise is necessary to eliminate the effect of excessive smoothing of SP values.

Summarizing the nature of traffic behavior in the MSN is also based on the Mamdani method.

4 EXPERIMENTS

To experimentally test the proposed method and algorithm, we used an instrumented testbed. The testbed consists of a server and two workstations connected to a network using a router. The testbed is shown in Fig. 1.

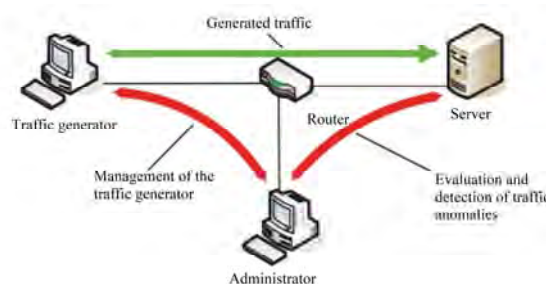


Figure 1 – Structure of the tool stand

One workstation was a traffic generator. The second station was the network administrator. The network administrator controlled the generator. The generator generated traffic with a given distribution law. At the same time, anomalies were introduced into the traffic randomly in accordance with the selected type of computer attack. The traffic passed through the router to the server. The administrator's task was to evaluate and identify traffic anomalies.

The generator generated stationary and non-stationary traffic Poisson and Pareto distributions. These distributions are the most typical for MSN. To generate anomalies, DoS attacks were used, which lead to a load on the communication channel. Non-stationary processes were modeled as multiplicative SP with deterministic and random modulating functions. The random modulating functions were first-order random autoregressive processes with different correlation coefficients. Adaptation to the parameters of the Poisson SP was performed using the MSA algorithm.) For SP with Pareto law, the algorithm of pseudogradient procedures was used.

The parameters of the adaptation algorithms were set using the following rules. The A, B, and D of these rules were determined in advance based on the training results. For this purpose, we used the experimental results presented in Fig. 2, which show the dependence of the value of the error in estimating the traffic intensity of a nonstationary SP on the value of the step coefficient of the MSA algorithm at different values of the correlation coefficient modulating the SP for Poisson traffic. The random proc-

ess had $a_0=100$, $\sigma=10$. P for different dependencies varied from 0.6 to 0.9999. It can be seen that at small values of the error μ , traffic estimates differ greatly from each other depending on the value of ρ .

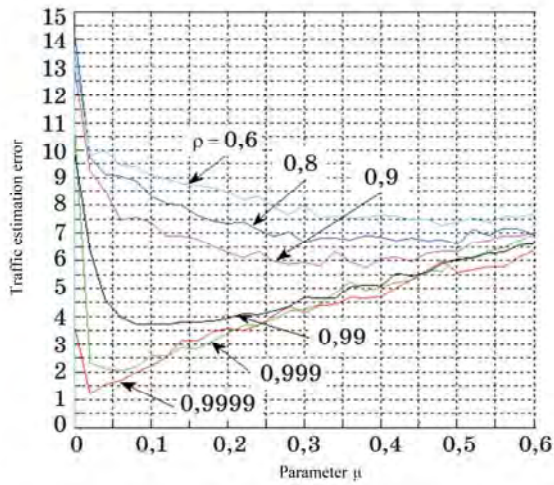


Figure 2 – Dependence of traffic estimation error on the value of the parameter

The traffic estimation error is represented vertically, and the μ is represented horizontally.

At large values of μ , these errors become approximately equal.

Based on the data presented in Fig. 2. the rules for setting the parameters of the modified stochastic approximation are formed. For example, at $S_i = 100$, $\sigma=10$ та $\rho=0.9999$ the parameter of the stochastic algorithm is approximately equal to 0.025. For $\rho=0.99$ the μ will have a value of approximately 0.12. The parameters σ and ρ are estimated in a sliding window.

An example of numerical modeling of an unsteady Poisson SP was analyzed in their works by scientists Ageev S. O., Sayenko I. B., Kotenko I. V. This example is shown in Fig. 3.

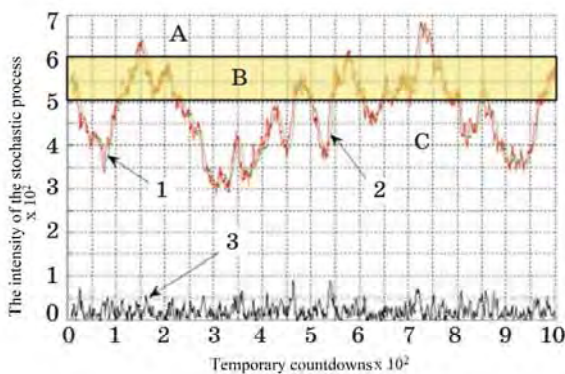


Figure 3 – Estimation of a non-stationary trend with a Poisson distribution:

- 1 – true trend value; 2 – trend estimate;
- 3 – error of trend estimate

The correlation coefficient of the process varied across experiments from 0.9 to 0.99999. SP had the following

parameters: initial value of the trend mean $m_0 = 500$, $\rho = 0.99$, size of the sliding window $r = 10$, $\mu = 0.05$, $\sigma = 100$. The proposed algorithm works almost without delays and has high estimation accuracy.

There are three zones associated with anomaly detection: Zone A indicates that there is a risk of anomalies and the risk level is unacceptable. Zone B indicates that there is a risk of anomalies and the level of risk is acceptable. There are no anomalies in the traffic located in zone C. The boundaries of zones A, B, and C is determined at the stage of pre-configuring the knowledge base of the fuzzy inference machine in accordance with the accepted security policy rules. The values of the trend estimates on the boundaries of zones A, B, and C are used to build the Mamdani rules using formula (8):

$$IF < S_i = A > AND,$$

$$< A \text{ complies with the security policy} > THEN R \quad (8)$$

For example, the rule for concluding that there are no anomalies is as follows:

$$IF < S_i \in Zone C > THEN.$$

There are no traffic anomalies.

The results of estimating the parameters (Table 1) of self-similar traffic with a Pareto distribution are shown in Fig. 4 and Fig. 5.

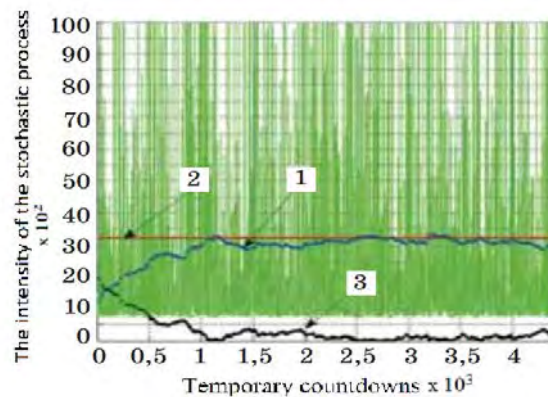


Figure 4 – Estimation of the stationary trend of self-similar traffic with distribution

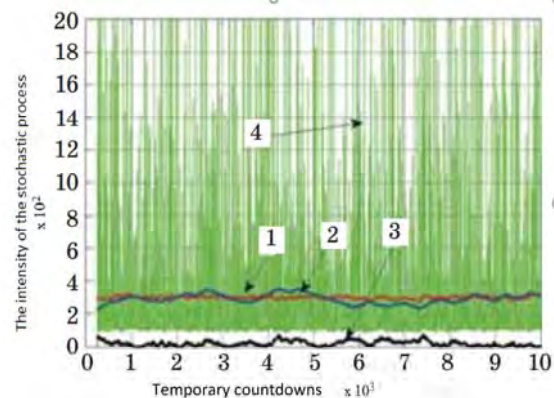


Figure 5 – Estimation of non-stationary trend of self-similar traffic with distribution

Table 1 – Parameters of steady-state and non-stationary process

Parameter	Stationary process	Non-stationary pr	Stationary process
Hearst parameter, H	0.85	0.75	0.85
The average value of the SP	32.5	250	32.5
Distribution parameter SP	1.3	–	1.3
Parameter of the MSN algorithm μ	0.004	0.13	0.004
Relative error of estimation, %	≤ 6.2	≤ 9.1	≤ 6.2

The final results of the evaluation of the developed algorithms for detecting anomalies in the traffic of the MSN for the distributions discussed above are shown in Table 2.

Table 2 – Experimental results of the algorithm evaluation

Distribution	Correlation coefficient, ρ	Average relative error of the estimate, %	Time of detection, time counts
Pareto (H 0.75)	0.99	12.0	80
	0.999	10.0	65
	0.9999	8.0	50
Poisson	0.99	8.6	27
	0.999	7.6	20
	0.9999	5.3	15

This table shows that the relative error of the algorithms is within 12% of the true trend value. This result should be considered within the normal range, given that the algorithms operate in real time, since the values obtained for the detection time range from 15 to 80 time samples. Thus, the developed algorithms for detecting anomalies in MSN traffic fully meet the requirements of efficiency and accuracy.

5 RESULTS

Different enterprises experience different types of malfunctions over time. They are primarily caused by significant losses incurred by operators due to downtime or inefficient use of network resources. Secondly, the functioning of the network depends heavily on the algorithms of the application software used in it. The term “network” here refers to the entire complex of hardware and software; and the term “network diagnostics” refers to the process of determining the causes of unsatisfactory operation of application software in this network. It is the quality of the application software in the network that is decisive from the point of view of users [8–11]. Other criteria, such as the number of data transmission errors, the degree of network resource utilization, hardware performance, etc., are secondary.

There can be several main reasons for unsatisfactory operation of application software in the network:

- damage to the cable system;
- defects in active equipment;

– overloading of network resources (communication channel and server);

– errors in the application software itself.

Often, some network defects mask others.

Thus, to reliably determine the cause of unsatisfactory operation of the application software.

Often, a network is analyzed only during periods of poor performance. In such cases, it is necessary to localize and correct existing network defects quickly. In this paper, we focus on the diagnostics of the network link layer, as this is the primary task when diagnosing a transmission network.

6 DISCUSSION

Analyzing the above, we note that a hybrid method for detecting anomalies in the MSN traffic using algorithms without identification, adaptation and fuzzy Mamdani inference is proposed. The peculiarity of multiservice traffic as an object of anomaly detection is the presence of stochastic processes in it, subject to different distribution laws. For the experimental evaluation of the proposed method and algorithms, we chose the Poisson and Pareto distribution laws that define the limiting cases of traffic regularity.

Experimental evaluation of the proposed method and algorithms has shown that they allow estimating the trends of these stochastic processes in real time, with high accuracy and with preservation of service quality.

Summarizing these situations that arise at many enterprises regarding troubleshooting, it should be noted in general that they consist of eight steps:

1. Definition of the problem;
2. Collecting the necessary information;
3. Evaluation of possible scenarios for solving the problem and determining the most likely causes of the malfunction;
4. Developing a plan for solving the problem;
5. Implementation of actions in accordance with the plan;
6. Evaluation of the results;
7. Repeating the sequence of steps if the malfunction were not eliminated;
8. Documenting the changes after successful troubleshooting.

The method allows you to monitor and manage faults in a multiservice network to determine the causes of their occurrence.

CONCLUSIONS

Summarizing the above, it is worth noting that the application of the developed method of troubleshooting management in a multiservice network helps to improve the service stability by timely detection of problems, reducing the time of their elimination and reducing downtime, which in turn affects the increase in service reliability.

The scientific novelty lies in the fact that for the first time, a method has been developed for traffic management problems and applied to traffic management tasks based on the analysis of the distribution of the number of

traffic management requests, which allows improving the service stability in multiservice networks.

The practical significance is that it is proposed to apply the development of the method to traffic management tasks at enterprises based on the analysis of the distribution of the number of applications.

Prospects for further research is to study and apply in practice methods to improve the service stability and reliability of services for users.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the research topic of the State Tax University “The use of intellectual technologies in the analysis of economic risks of the regions of Ukraine and V4 countries” (state registration number 0121U114593).

REFERENCES

1. Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Tron' V. V. Sintez zashemostijtkogo algoritmu dlja adaptivnogo keruvannja ruzozbagachennjam, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, №3, pp. 183–190. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-20>
2. Morkun V., Kravchenko O. Trivimirnij nechitkij kontrol' ul'trazvukovogo ochishhennja, *Acta Mechanica et Automatica*, 2021, 15 (3), pp. 169–176. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0022>.
3. Morkun V., Kravchenko O. Kontrol' procesu prostorovogo ul'trazvukovogo ochishhennja na osnovi ocinki jogo potocnogo stanu, *Druga miznarodna konferencija zi stalogo majbut'ogo: ekologichni, tehnologichni, social'ni ta ekonomichni pitannja (ICSF 2021)*, *E3S Web of Conferences* 280, 07016, 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007016>.
4. Leland W. E., Taqu M. S., Willinger W., and Wilson D. V. Metod for processing multiservice traffic in network node

- based on adaptive management of buffer resource, *On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version): IEEE/ACM Transactions on Networking*, 1994, № 2, pp. 1–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/90.282603>
5. Kosenko V., Persijanova Ye., Bieloc'kij O. Malieieva Metodi upravlinnja rozpodilom trafiku v informacijno-komunikacijnih mrezhah sistem kritichnoї infrastrukturi, *Innovacijni tehnologii ta naukovi rishennja dlja promislovosti*, 2017, № 2 (2), pp. 48–55. DOI: 10.30837/2522-9818.2017.2.048
 6. Kosenko V., Bugas D. Effectiveness analysis of resource usage of multiservice information and telecommunication network, *Technology audit and production reserves*, 2015, Vol. 5, No. 2 (25), pp. 19–23. DOI: 10.15587/2312-8372.2015.51710
 7. Xi N., Sun C., Ma J., Shen Y. Secure service composition with information flow control in service clouds, *Future Generation Computer Systems*, 2015, Vol. 49, pp. 142–148. DOI: 10.1016/j.future.2014.12.009
 8. Mangili M., Martignon F., Capone A. Optimal design of Information Centric Networks Original, *Computer Networks*, 2015, Vol. 91, pp. 638–653. DOI: 10.1016/j.comnet.2015.09.003
 9. Wang H., Zhang D., Shin K. G. Detecting SYN Flooding Attacks, *Proc. of IEEE INFOCOM. 2002. International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks MSN 2005*, Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, 2005, pp. 443–452. DOI: 10.1007/11599463_44
 10. Angrishi K. An end-to-end stochastic network calculus with effective bandwidth and effective capacity, *Computer Networks*, 2013, Vol. 57, Issue 1, pp. 78–84. DOI: 10.1016/j.comnet.2012.09.003
 11. Agrawal S., Agrawal J. Survey on Anomaly Detection using Data Mining Techniques, *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 60, pp. 708–713 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.220>

Received 15.02.2023.
Accepted 27.04.2023.

УДК 004.77

РОЗРОБКА МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАФІКУ МУЛЬТИСЕРВІСНИХ МЕРЕЖ

Моркун В. С. – д-р техн. наук, професор, професор Байройтського університету, Байрот, Німеччина.

Грищенко С. М. – канд. пед. наук, старший дослідник, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, Ірпінь, Україна.

Ніжегородцев В. О. – канд. пед. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, Ірпінь, Україна.

Філоненко М. М. – канд. фіз.-мат., наук, доцент, зав. кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Державного податкового університету, Ірпінь, Україна.

Лаговський В. В. – канд. економ. наук, доц. зав. кафедри кібернетики та прикладної математики Державного податкового університету, Ірпінь, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Постійне зростання обсягу інформації, збільшення швидкості передачі інформаційних потоків у цифрових мережах зв'язку, як і раніше, залишається актуальним завданням оцінки якості обслуговування потоків трафіку. Простим рішенням для забезпечення високої якості обслуговування є побудова мережі достатньої потужності для будь-якого трафіку, який буде кинутий на нього. Для розв'язання проблем аналізу телекомунікаційних систем необхідно мати у своєму розпорядженні відповідні моделі та інженерні методи, що дозволяють на основі даних вимірювань оцінювати якість надання послуг та прогнозувати характеристики їх роботи. У цих умовах розробка нових методів аналізу трафіку мультисервісних мереж, що забезпечують простоту розрахунків та їхню прийнятну точність, стає особливо актуальною.

Мета роботи полягає в дослідженні трафіку та якості забезпечення для користувачів.

Метод. Запропоновано гібридний метод виявлення аномалій у трафіку мультисервісних мереж, що використовує алгоритми без ідентифікаційної адаптації та нечіткого виведення Мамдані. Особливістю мультисервісного трафіку як об'єкту оцінювання існування аномалій є наявність у ньому стохастичних процесів, підпорядкованих різним законам розподілу. Для експериментальної оцінки запропонованих методу та алгоритмів було обрано закони розподілу Пуассона та Парето, що

визначають граничні випадки регулярності трафіку. Метод дозволяє забезпечити контроль та управління несправностями в мультисервісній мережі з метою визначення причин їх виникнення. До розроблених алгоритмів виявлення аномалій у трафіку мультисервісних мереж пред'являються такі вимоги: функціонування як реального чи близького до реального часу; підтримка заданої якості сервісу; простота реалізації. Алгоритми належать до класу адаптивних гібридних алгоритмів ідентифікації параметрів трафіку. Вони використовуються як для стаціонарних, так і для нестаціонарних трафіків. Трафіки моделюються у вигляді стохастичних процесів. Кожен належить до відповідного класу, що визначається законом розподілу стохастичних процесів.

Результати. Експериментальна оцінка запропонованих методу та алгоритмів показала, що вони дозволяють оцінювати тренди зазначених стохастичних процесів у реальному часі, з високою точністю та зі збереженням якості обслуговування.

Висновки. Застосування розробленого методу управління усуненням несправностями в мультисервісній мережі допомагає підвищити якість обслуговування шляхом своєчасного виявлення проблем, зменшення часу їх усунення та скорочення часу простоїв, що, своєю чергою, впливає на підвищення показників надійності послуг.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мультисервісні мережі, трафік, якість, несправності, метод, користувач.

ЛІТЕРАТУРА

1. Моркун В. С. Синтез зашумованого алгоритму для адаптивного керування рудозбагаченням / В. С. Моркун, Н. В. Моркун, С. М. Грищенко, В. В. Тронець // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2018. – № 3. – С. 183–190. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-3-20>
2. Моркун В. Тривимірний нечіткий контроль ультразвукового очищення / В. Моркун, О. Кравченко // *Acta Mechanica et Automatica*. – 2021. – 15 (3), – С. 169–176. <https://doi.org/10.2478/ama-2021-0022>.
3. Моркун В. Контроль процесу просторового ультразвукового очищення на основі оцінки його поточного стану / В. Моркун, О. Кравченко // Друга міжнародна конференція зі сталого майбутнього: екологічні, технологічні, соціальні та економічні питання (ICSF 2021). – E3S Web of Conferences 280, 07016. – 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128007016>.
4. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / [W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, and D. V. Wilson] // *On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version): IEEE/ACM Transactions on Networking*. – 1994. – № 2, – С. 1–15. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/90.282603>
5. Косенко В. Методи управління розподілом трафіку в інформаційно-комунікаційних мережах систем критичної інфраструктури / В. Косенко, Є. Персіянова, О. Белоцький, О. Малєєва // *Інноваційні технології та наукові рішення для промисловості*. – 2017. – № 2 (2). – С. 48–55. DOI: [10.30837/2522-9818.2017.2.048](https://doi.org/10.30837/2522-9818.2017.2.048)
6. Kosenko V. Effectiveness analysis of resource usage of multiservice information and telecommunication network / V Kosenko, D. Bugas // *Technology audit and production reserves*. – 2015. – Vol. 5, No. 2 (25). – С. 19–23. DOI: [10.15587/2312-8372.2015.51710](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2015.51710)
7. Xi N. Secure service composition with information flow control in service clouds / N. Xi, C. Sun, J. Ma, Y. Shen // *Future Generation Computer Systems*. – 2015. – Vol. 49. – С. 142–148. DOI: [10.1016/j.future.2014.12.009](https://doi.org/10.1016/j.future.2014.12.009)
8. Mangili M. Optimal design of Information Centric Networks Original / M. Mangili, F. Martignon, A. Capone // *Computer Networks*. – 2015. – Vol. 91. – С. 638–653. DOI: [10.1016/j.comnet.2015.09.003](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2015.09.003)
9. Wang H. Detecting SYN Flooding Attacks / H. Wang, D. Zhang, K. G. Shin // *Proc. of IEEE INFOCOM*. 2002. International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Networks MSN 2005: Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. – 2005. – С. 443–452. DOI: [10.1007/11599463_44](https://doi.org/10.1007/11599463_44)
10. Angrishi K. An end-to-end stochastic network calculus with effective bandwidth and effective capacity / K. Angrishi // *Computer Networks*. – 2013. – Vol. 57, Issue 1. – С. 78–84. DOI: [10.1016/j.comnet.2012.09.003](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2012.09.003)
11. Agrawal S. Survey on Anomaly Detection using Data Mining Techniques // S. Agrawal, J. Agrawal // *Procedia Computer Science*. – 2015. – Vol. 60. – С. 708–713 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.08.220>

METHOD FOR SELECTING A SOFTWARE DEVELOPMENT METHODOLOGY TAKING INTO ACCOUNT PROJECT CHARACTERISTICS

Seniv M. M. – PhD, Associate Professor of Software Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. With the development of the software industry, the number of applied methodologies and hybrid approaches based on them constantly increases, that is why, the choice of the most suitable/optimal methodology for the project is an urgent problem of software engineering, since the selection process is poorly formalized, requires sufficient experience of the person who will make this decision and depends on many related factors.

Objective. The support of decision-making in the process of choosing a methodology for the software project development and increase of the level of adequacy of the above choice.

Method. Based on the previously developed algorithm by the author, a generalized method for selecting the best software development methodology is proposed, which consists of 14 steps and takes into account the characteristics of the project, based on the multi-criteria analysis approaches, taking into consideration the opinions of experts for a more reasonable choice of the most suitable methodology for this project. The method uses the aggregated expert evaluation. It was decided to use the AHP to calculate the criteria weights. Based on the established values of criteria, their weights and expert evaluation, the score is calculated for each methodology using the weighted sum and TOPSIS methods.

Results. The application of the developed method to the data of actual projects showed a match in 83% of cases (in five out of six cases, the application of the method resulted in the selection of methodology that corresponded to the one actually used in an existing project). In cases when the methodology chosen by the proposed method differed from the one that was actually used, the application of the proposed method recommends going to the stage of the initial determination of criteria and their weights, which will allow making a more adequate choice of methodology.

Conclusions. The proposed method can be applied in practice by software project managers to support the decision-making process, and will allow reducing time spent on project management.

KEYWORDS: software; software development methodologies; software engineering.

ABBREVIATIONS

TOPSIS is Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution;

AHP is Analytic Hierarchy Process;

PAPRIKA is Potentially All Pairwise Rankings of all possible Alternatives;

XP is Extreme Programming;

DSDM is Dynamic Systems Development Method

RAD is Rapid Application Development

ROC is Rank Order Centroid;

SDLC is Software Development Life Cycle;

SWEBOK is Software Engineering Body of Knowledge;

PRINCE is Projects in Controlled Environments;

PMBOK is Project Management Body of Knowledge;

SMARTER is Specific, Measurable, Achievable, Realistic, Time-Bound, Evaluate, and Reviewed

INTRODUCTION

The modern process of creating software products is based on different aspects of software engineering, including the use of various software development methodologies. Currently, there is quite a large number of software development methodologies, that formalize and optimize the processes of creating software components in particular and software projects in general and significantly facilitate and speed up the software development. Due to the diversity of these methodologies and software projects, the question arises of the optimal

selection of methodology for a particular project based on the information about it, since each software development methodology is designed for different types of teams, number of their members, different types of projects and their complexity, etc. In turn, the software products become more diversified, they have more characteristics, the consideration/ignorance of which can have a significant impact on the success of the project. Besides, the process of choosing a methodology for each project may depend on a number of subjective factors, such as experience of the person making the decision, experience of applying a particular methodology by the development team, wishes of the customer, industry trends, and many others. Therefore, when choosing a software development methodology, project managers face certain difficulties, which, in addition to the above aspects, are that different types of software projects require different approaches, as each category of projects has different priorities and goals; moreover, the clear and standardized criteria for choosing a software development methodology have not yet been defined [1–3]. Given the above, it can be argued that the development of new methods for choosing the best software development methodology, which will take into account various characteristics of software projects, is an urgent scientific task. Thus, the **objective of the study** is to create a generalized method for selecting the best software development methodology, taking into account the characteristics of the project and opinions of experts, based on the approaches of multi-criteria

analysis. **The object of the study** is the process of selecting a software development methodology, **the subject of the study** is the methods and tools for choosing the most suitable software development methodology for the project, taking into account its characteristics and expert opinions.

1 PROBLEM STATEMENT

Given: the set $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_7\}$ of alternatives (software development methodologies) and the set of $N = \{N_1, N_2, \dots, N_{23}\}$ criteria (project characteristics) with the weight of the i -th criterion w_i . It is necessary to determine the best alternative out of Y s. For this purpose, it is necessary to construct a hierarchy in the form of a multitree and calculate the global priorities of alternatives: the priorities of alternatives for the entire hierarchy.

The input data are the results of a survey of experts in the form of matrices of pairwise comparisons at all nodes of the hierarchy. Hierarchical synthesis is used to weigh the own vectors of matrices of pairwise comparisons, as well as to calculate the general priorities of alternatives. As a result of constructing a hierarchy and implementing paired comparisons, matrices of paired comparisons should be constructed for all vertices of the hierarchy except leaves. The pairwise comparison method to calculate the aggregate evaluation (global priority) of alternatives (development methodologies) should be applied.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

One of the approaches to solving the problem of selecting a software development methodology is the SMARTER multi-criteria analysis method, which is used to select the agile methodology for small and medium-sized projects [1]. The selection process is as follows: a set of 13 criteria is determined; alternative solutions are defined (for DSDM, SCRUM, XP and Crystal methodologies); a matrix of methodology evaluation with regard to the criteria is created (based on the number of scientific papers which indicate that a certain value of the criterion is suitable for a certain software development methodology); the relative importance of criteria is determined and values of criteria weights are calculated using the ROC method; then the multi-attribute value of the function of each of the alternatives is set by the aggregation of functions, and as a result, the alternatives are ranked from best to worst [1].

The rule-based expert systems are also used to solve problems of such class [4]. The questionnaire consists of different questions about the characteristics of the project (project size, project type, level of possible risks, reliability, complexity, etc.), which can be updated or added by experts. The “set of facts” contains facts about recommendations for different possible values in rules. The “rule repository” is maintained as a set of “if...then” rules and it provides recommendations according to the characteristics of the project. A cascade model, spiral model, incremental model, XP, Scrum or RAD model can

be proposed based on these characteristics. The answers provided by a user are placed in the relevant rules of the “rule repository”, which are used by the “rule engine” for comparing the “set of facts”, structuring and displaying recommendations to a user through the display module (“SDLC recommendation display module”) [4]. As a drawback here, it should be noted that it is impossible to change the priority of criteria and the complexity of filling in the knowledge base, since it is necessary to take into account a large number of criteria and methodologies, which makes it difficult to expand the knowledge base, especially given that expert opinions often differ.

In addition, the AHP hierarchy analysis technique and TOPSIS method are used to solve similar tasks. TOPSIS is based on the concept that the ideal alternative has the shortest distance from the positive ideal solution and the longest distance from the negative ideal solution. AHP is used to calculate the criteria weights and to verify their consistency, using the relative consistency ratio. In the work [5], a method for selecting a project testing technique using these methods is described. In the work [6], for the selection of practices for organizing the software development process, it is proposed to use the PAPRIKA method, which is based on the users expressing their preferences regarding the relative importance of the criteria or attributes of interest for the made decision or choice, by pairwise comparison (ranking) of alternatives. 31 practices are evaluated in pairs against 11 criteria; a user is interviewed and based on the answers a list of practices recommended to use in the project development is formed [6].

A mathematical model and a method for choosing an approach to project management, taking into account the fuzzy representations of the applicability of existing approaches, is proposed in the work [7]. The choice is made between such approaches as PMBOK, ISO21500, PRINCE2, SWEBOK, Scrum, XP and Kanban. A number of project parameters that affect the result of the choice are also identified here, and the degree of their impact is determined.

The works [8, 9] are dedicated to the issue of the selection of methodology and the study of factors (organizational structure, characteristics of the team and software project) that affect the choice of the best software development methodology. A conclusion is drawn that the process of selecting the methodology is associated with certain organizational, project and team characteristics, and therefore is a non-trivial task. It is also noted that although flexible methodologies have become increasingly popular over the past decade, traditional methodologies still remain popular in the software development industry, and a hybrid approach is also often used [8].

The work [10] deals with a comparative analysis of the most widespread software development methodologies with an emphasis on the features of project management. The author focuses on taking into account those factors that affect the software development

process, namely: frequent software requirements changes, high dynamics of the technology stack and development standards, qualification of the development team and the team globalization and dispersion.

The paper [11] presents an approach that analyses the basic concepts of structural models and modelling in software engineering, using representation theory, investigates different types of interpretive reflections needed to track model entities with the entities they represent, as well as explains the difference between forward- and backward-looking models and considers the need to integrate products and processes into methodologies.

The Weighted sum and TOPSIS multi-criteria analysis methods were used in work [12]. To select a methodology for the development of software projects, taking into account their characteristics, experts evaluate the extent to which it is permissible to use a certain methodology for each possible characteristic of the project, i.e. each possible value of the criterion. The weights of expert opinion may vary. Given these weights, the expert evaluation is aggregated. Also in work [12] it was decided to use the AHP [13] to calculate the weights of criteria used to evaluate alternatives. A user makes a pairwise comparison of the criteria, and the absolute weights of criteria are calculated using the AHP. The pairwise comparison is made on a scale from 1 to 9. The AHP uses a consistency ratio as a measure to check the consistency of the weights obtained. This ensures that the weights are consistent. Based on the user-defined values of criteria, their weights and expert evaluation, the score for each methodology is calculated using the weighted sum and TOPSIS methods. The higher the score, the better the applicability of the methodology to the project [12].

Thus, having considered the above materials, it can be said with confidence that the number of used methodologies and hybrid approaches based on them constantly increases [14], therefore the choice of the most suitable/optimal methodology for the project is an urgent problem of software engineering, since the selection process is poorly formalized, requires sufficient experience of the person making this decision and depends on many related factors. Therefore, there is a need to develop a generalized method for selecting the best software development methodology, which will take into account the characteristics of the project, based on the methods of multi-criteria analysis, and opinions of experts for a more reasonable choice of the most suitable methodology for this project.

3 MATERIALS AND METHODS

To solve the problem of selecting the methodology for the development of software projects, taking into account their characteristics, the method was proposed, which is based on the algorithm presented in [12] and consists of 14 steps below, its block diagram is shown in Fig 1.

Step 1. Analysis of the initial data of the project. At this step, it is necessary to analyze the requirements to the project (functional, non-functional, etc.) as well as to analyse the quality attributes of the future software with stakeholders. This should be done in order to get an overview of the project (large/small/medium, complex/simple in terms of implementation, critical in terms of reliability/security requirements, real time, etc.)

Step 2. Determination of the list of methodologies most suitable for the project (expert evaluation). At this step, the experts should determine a list of six methodologies that will be most appropriate for this type of projects in general and for this specific project, in particular. If the experts cannot unambiguously determine the required list due to insufficient data of requirements analysis, it is necessary to go back to Step 1, otherwise, proceed to Step 3.

Step 3. Initial determination of a set of criteria and their weights. At this step, it is necessary to determine a set of required criteria by which the characteristics of projects will be determined, with the appropriate setting of initial values and their gradations. The set of 23 criteria presented in [7] is proposed as the base one, but if required, this set and values of criteria can be adjusted by experts, taking into account the information obtained during further steps.

Step 4. Providing expert evaluation of the possible criteria values in relation to methodologies. At this step, it is necessary to gather the expert evaluation of all possible values of criteria in relation to the list of methodologies specified in Step 2. If the experts determine that the list of criteria and the corresponding range of scores fully reflect the characteristics of the project, then proceed to Step 4, otherwise, go back to Step 3 and adjust the set of necessary criteria with the appropriate setting of the initial values and their gradations.

Step 5. Setting the values of criteria and their weights according to the characteristics of the project. At this step, the current values of criteria and their weights are set according to the characteristics of a specific project; if required, some of the criteria may be omitted.

Step 6. Specifying the evaluation of criteria values by hierarchy analysis technique. At this step, it should be determined whether it is necessary to clarify the evaluation of criteria values by the hierarchy analysis technique, taking into account the expert evaluation consistency index, if yes, proceed to Step 7, if not, skip to Step 9.

Step 7. Pairwise comparison of the importance of criteria. A pairwise comparison of the importance of all set criteria with each other takes place here and the relative consistency is determined, if it is more than 0.2, then it is necessary to go to Step 6, if it is less than 0.2, proceed to Step 8.

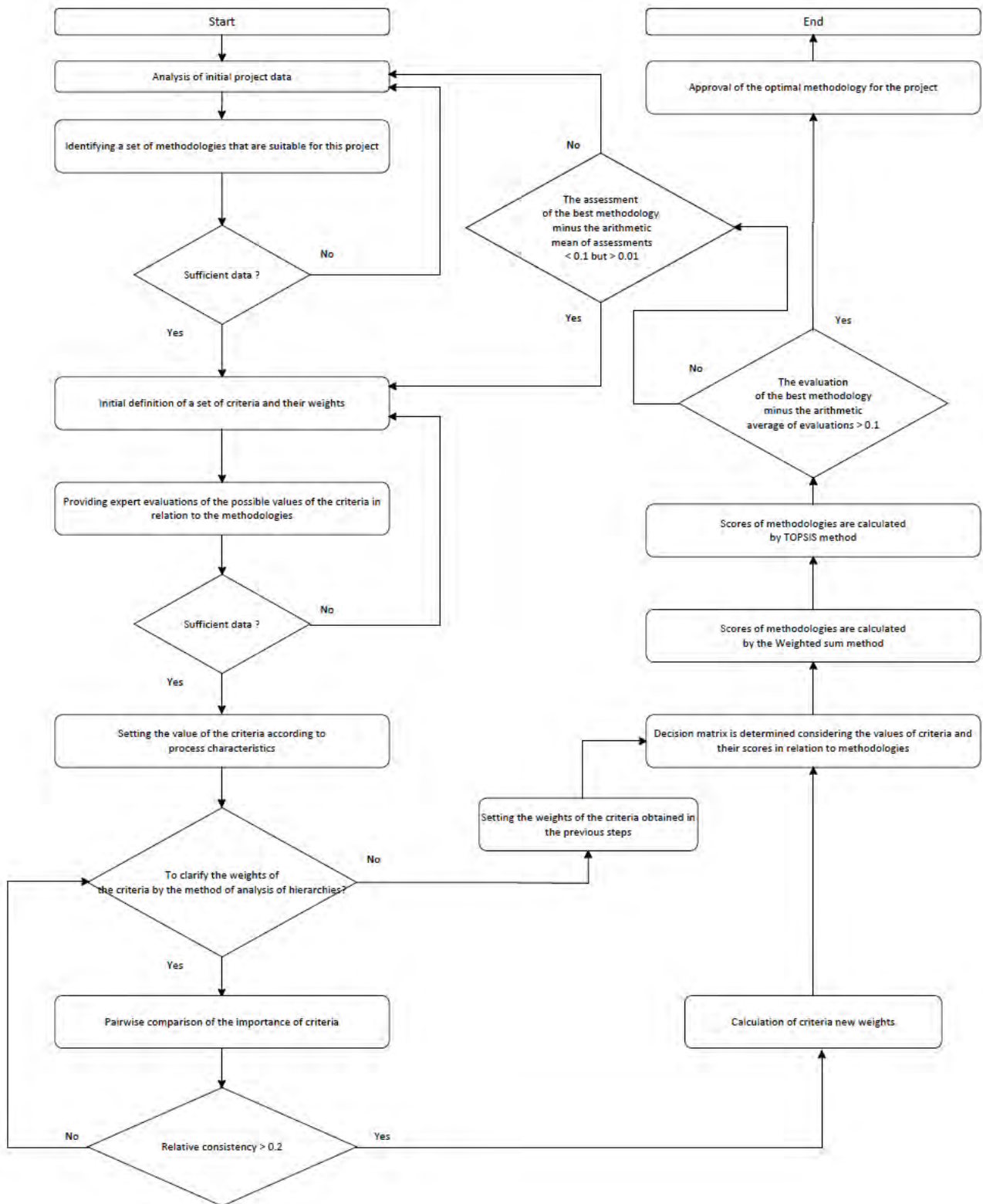


Figure 1 – Block diagram of the method for selection of a software development methodology taking into account project characteristics

Step 8. Setting new criteria values. At this step, it is necessary to set new criteria and their weights, taking into account the information obtained in the previous steps. Then proceed to Step 10.

Step 9. Setting the values of criteria obtained in the previous steps. The values of criteria and their weights are taken as those set in Step 5.

Step 10. Determination of the decision matrix taking into consideration the values of criteria and their scores in

relation to methodologies. At this step, the decision matrix with $m \times n$ dimension is determined, where m is the number of methodologies and n is the number of criteria, the values of which are set by a user. The matrix consists of evaluation of the established values of criteria in relation to methodologies.

Step 11. Calculation of scores for methodologies using the weighted sum method. At this step, the scores for methodologies using the weighted sum method are determined.

Step 12. Calculation of scores for methodology by the TOPSIS method. The scores for methodologies are determined using the TOPSIS method:

- a) A weighted normalised matrix is determined.
- b) A positive and a negative decision is determined.

c) The Euclidean distance and relative proximity of each of the alternatives (methodologies) to ideal solutions are calculated.

Step 13. Determination of the most suitable methodology. If the score of the best methodology minus the arithmetic mean of scores is >0.1 , then this methodology is the most suitable one, and you proceed to Step 14, if not, then it is necessary to check whether the score of the best methodology minus the arithmetic mean of scores is <0.1 but >0.01 , if yes, then you should proceed to Step 3, if no, go back to Step 1.

Step 14. Approval of the most suitable methodology. At this step, the most suitable methodology for this project is approved.

4 EXPERIMENTS

Six anonymized commercial projects developed by LinkUp Studio (<https://linkupst.com/>) were selected for the experiment and all were implemented using the Scrum methodology. The main characteristics of the projects are shown in Table 1, which contains a set of 23 criteria and their corresponding values. The justification for the selection of criteria and the scale of values for each criterion is given in [12]. In this table, to simplify the presentation, the ranked criteria values from 1 to 4 are shown, where 1 is the lowest value and 4 is the highest. A brief description of the subject area of the projects: Project1 (P1) and Project2 (P2) – software products for the advertising business, Project3 (P3) and Project4 (P4) – mobile games, Project5 (P5) – house rental web platform, Project6 (P6) – web platform for arranging meals for groups of people. The common features for these projects are that the project budgets are less than 100 thousand US dollars, the number of people in the team is less than 10 and the requirements change is not high ($< 7\%$ per month).

Table 1 – The criteria values for the projects involved in the experiment

N	Parameter	Projects					
		P1	P2	P3	P4	P5	P6
1.	Project cost	1	1	1	1	1	1
2.	Requirements change percent/month	1	1	1	1	1	1
3.	Number of people involved in the project	1	1	1	1	1	1
4.	Consequences in case of unsatisfactory project outcome	1	2	2	2	2	1
5.	Work experience in the given field	1	2	1	2	2	1
6.	Requirements to the realization period of the project	2	3	3	2	3	2
7.	Teams ability to work effectively in freedom or order	3	3	2	2	2	3
8.	Understanding of requirements, adapting ability, initiative	3	4	2	3	2	3
9.	Probability of occurrence of managerial risks (inefficient planning, controlling, communication problems, etc.)	1	2	2	1	2	2
10.	Knowledge of applied tools and methods	3	4	1	4	4	3
11.	Means of communication	2	4	4	4	3	3
12.	Frequency of reporting to the Customer	3	2	2	2	1	2
13.	Understanding the scope of works	2	2	2	2	3	2
14.	Requirements to the project quality	2	2	2	2	3	4
15.	Probability of occurrence of technical, manufacturing or qualitative risks	3	2	3	2	1	2
16.	Probability of occurrence of external risks (disruption of work by contractors, unfavourable political situation, etc.)	1	1	1	1	1	1
17.	Probability of occurrence of organizational risks (disruption of funding, delivery of resources, inaccurate prioritizing, etc.)	1	1	1	1	3	1
18.	Requirements to the precise compliance with a deadline	1	1	1	2	2	3
19.	Ability to admit mistakes	4	4	4	4	3	4
20.	Learning ability	3	4	2	3	3	3
21.	Experience of cooperation	2	3	2	3	3	2
22.	Teams ability to clearly formulate and openly express ideas	3	4	3	3	4	3
23.	Customers experience of working with this project team	1	1	1	4	1	1

5 RESULTS

The application of the above method for the projects P1–P6 had the following results.

Table 2 – The result of selection of methodology for the project P1

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
Scrum	0.29	0.63	0.46
SWEBOK Guide	0.26	0.43	0.34
PMBOK Guide	0.25	0.42	0.33
ISO21500	0.25	0.42	0.33
XP	0.22	0.45	0.33
Kanban	0.22	0.45	0.33
PRINCE2	0.24	0.4	0.32

For the project P1, Scrum was determined the best methodology (according to Step 13 of the above method, its score minus the arithmetic mean of scores = $0.111428571 > 0.1$), which corresponded to the real situation in the project.

Table 3 – The result of selection of methodology for the project P2

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
Scrum	0.32	0.67	0.49
Kanban	0.25	0.54	0.39
SWEBOK Guide	0.24	0.43	0.34
XP	0.21	0.43	0.32
PMBOK Guide	0.22	0.41	0.32
ISO21500	0.22	0.41	0.32
PRINCE2	0.2	0.39	0.3

For the project P2, Scrum was also determined the best methodology (according to Step 13 of the above method, its score minus the arithmetic mean of scores = $0.135714286 > 0.1$), which corresponded to the real situation in the project.

Table 4 – The result of selection of methodology for the project P3

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
SWEBOK Guide	0.31	0.52	0.41
Scrum	0.24	0.55	0.4
ISO21500	0.29	0.49	0.39
PMBOK Guide	0.29	0.49	0.39
PRINCE2	0.27	0.47	0.37
Kanban	0.19	0.49	0.34
XP	0.15	0.37	0.26

For the project P3, SWEBOK Guide was determined the best methodology, but according to Step 14 of the above method, its score minus the arithmetic mean of scores is $0.01 < 0.044285714 < 0.1$, which requires to go back to the stage of initial determination of criteria and their weights (Step 3).

Table 5 – The result of selection of methodology for the project P4

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
Scrum	0.3	0.63	0.46
Kanban	0.24	0.52	0.38
SWEBOK Guide	0.27	0.44	0.35
PMBOK Guide	0.24	0.42	0.33
ISO21500	0.24	0.42	0.33
XP	0.21	0.41	0.31
PRINCE2	0.23	0.4	0.31

For the project P4, Scrum was determined the best methodology (according to Step 13 of the above method,

its score minus the arithmetic mean of scores = $0.107142857 > 0.1$), which corresponded to the real situation in the project.

Table 6 – The result of selection of methodology for the project P5

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
Scrum	0.29	0.62	0.45
Kanban	0.22	0.53	0.38
SWEBOK Guide	0.25	0.46	0.36
PMBOK Guide	0.23	0.43	0.33
ISO21500	0.23	0.43	0.33
PRINCE2	0.22	0.42	0.32
XP	0.16	0.38	0.27

For the project P5, Scrum was determined the best methodology (according to Step 13 of the above method, its score minus the arithmetic mean of scores = $0.101428571 > 0.1$), which corresponded to the real situation in the project.

Table 7 – The result of selection of methodology for the project P6

Methodology	Weighted Sum	TOPSIS	AVG
Scrum	0.3	0.65	0.48
SWEBOK Guide	0.25	0.44	0.34
Kanban	0.21	0.47	0.34
XP	0.21	0.46	0.34
PMBOK Guide	0.23	0.41	0.32
ISO21500	0.23	0.41	0.32
PRINCE2	0.21	0.41	0.31

For the project P6, Scrum was also determined the best methodology (according to Step 13 of the above method, its score minus the arithmetic mean of scores = $0.13 > 0.1$), which corresponded to the real situation in the project.

6 DISCUSSION

As can be seen from the results obtained, the use of the method for selecting the software development methodology, taking into account the characteristics of the project, allows determining the most suitable development methodology with a high degree of adequacy, since in five out of six cases, the application of the method resulted in the selection of methodology that corresponded to the methodology actually used in an actual project. In case of the project P3, the methodology chosen by the proposed method differed from the one that was actually used, but Step 13 of this method (Determination of the most suitable methodology) emphasizes that if the score of the best methodology minus the arithmetic mean of scores is > 0.1 , then this methodology is the most suitable and it is necessary to go to Step 14, if not, then it is necessary to check whether the score of the best methodology minus the arithmetic mean of scores is < 0.1 but > 0.01 , if yes, then go to Step 3, if not, go back to Step 1. It is in the case of the project P3 that the proposed method recommends proceeding to the stage of initial determination of criteria and their weights (Step 3). It should also be noted that the Scrum methodology, which was actually used in this project, was the second of the most optimal methodologies for this project and received the score close to the best (Table 4), thus, changing the criteria weights may lead to the selection of this methodology when using the proposed method.

CONCLUSIONS

This article describes the solution to the problem of adequate selection of the best software development methodology, taking into account the characteristics of the project. In the course of solving the problem, an analytical review of the most widespread approaches to the choice of software development methodology as of today was performed, which showed the existing shortcomings of such selection. The method was developed for selecting the best methodology for developing a software project, taking into account its characteristics. The method uses aggregated expert evaluation; it was decided to use the AHP to calculate the criteria weights. Based on the user-defined values of criteria, their weights and expert evaluation, the score for each methodology is calculated using the weighted sum and TOPSIS methods. The application of the developed method to the data of existing projects showed a match in 83% of cases (in five out of six cases, the use of the method resulted in the selection of methodology that corresponded to the methodology actually used in a real project). In case when the methodology chosen by the proposed method differed from the one actually used, the application of the proposed method recommends going to the stage of initial determination of criteria and their weights, which will allow selecting the methodology more adequately. The scientific novelty of the obtained results is that for the first time a generalized method for choosing the best software development methodology has been developed, taking into account the characteristics of the project, which implements the process of choosing a methodology using the methods of multi-criteria analysis AHP, TOPSIS and weighted sum and, unlike the existing ones, provides for gathering of expert evaluation taking into account the values of criteria set by a user independently, which allows reasonably determining the methodology that is most suitable for this project.

The practical value of the results of this work is that the application of this method will make it possible to reasonably choose the methodology for developing a software project, taking into account its characteristics, which will be especially useful for project managers with little experience, and will also allow reducing time spent on project management.

The prospects for further research are to verify the application of the developed method in software projects of various types and to expand the list of methodologies and project characteristics that will be taken into account when selecting the best development methodology.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses gratitude to Vitaliy Yakovyna, Doctor of technical science, professor for research support and a fruitful paper discussion. The author also thanks the LinkUp company for providing data of projects

REFERENCES

1. Silva V. B. S., Schramm F. and Damasceno A. C. A multicriteria approach for selection of agile methodologies in software development projects, *2016 IEEE International*

- Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. Budapest, Hungary, 2016, pp. 2056–2060. DOI:10.1109/SMC.2016.7844542.
2. Preeti Rai Impact of Different Methodologies in Software Development Process, (IJCSIT), *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 2014, Vol. 5 (2), pp. 1112–1116.
3. Harb Y. A., Noteboom C. Evaluating Project Characteristics for Selecting the Best-fit Agile Software Development Methodology: A Teaching Case Evaluating Project Characteristics for Selecting the Bestfit, *Journal of the Midwest Association for Information Systems*, 2015, Vol. 1 (1), pp. 33–52
4. Kumar K., Kumar S. A Rule-based Recommendation System for Selection of Software Development Life Cycle Models, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2013, Vol. 38, Issue 4, pp. 1–6. DOI: 10.1145 /2492248.2492269
5. Victor M., Upadhyay N. Selection of Software Testing Technique: A Multi Criteria Decision Making Approach, *Trends in Computer Science, Engineering and Information Technology. CCSEIT 2011. Communications in Computer and Information Science, Goa-403726, India 2011, proceedings*. Springer, Berlin, Heidelberg, Vol. 204, pp. 453–462. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24043-0_46
6. Gil Hernández-Ledesma, Erik G. Ramos, Carlos A. Fernández-y-Fernández et al. Selection of Best Software Engineering Practices: A Multi- Criteria Decision Making Approach, *Research in Computing Science*, 2017, № 136, pp. 47–60. DOI: 10.13053/rcs-136-1-4
7. Kononenko I. V., Lutsenko S. Yu. Method for selection of project management approach based on fuzzy concepts, *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Strategic management, portfolio, program and project management*, 2017, Vol. 2 (1224), pp. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2017.1224.2>
8. Vijayarathy L. R., Butler C. W. Choice of Software Development Methodologies: Do Organizational, Project, and Team Characteristics Matter? *IEEE Software*, 2016, Vol. 33, № 5, P. 86–94. DOI: 10.1109/MS.2015.26.
9. Matharu G. S., Mishra A., Singh H. et al. Empirical Study of Agile Software Development Methodologies: A Comparative Analysis, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2015, Vol. 40, № 1, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1145/2693208.2693233>
10. Despa M. L. Comparative study on software development methodologies, *Database Systems Journal*, 2014, Vol. V, № 3/2014, pp. 37–56.
11. Gonzalez-Perez C., Henderson-Sellers B. Modelling software development methodologies: A conceptual foundation, *Journal of Systems and Software*, 2007, Vol. 80, № 11, pp. 1778–1796. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.02.048>
12. Seniv M. M., Kovtoniuk A. M., Yakovyna V. S. Tools for selecting a software development methodology taking into account project characteristics, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022, № 2, pp. 175–188. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-17>
13. Saaty T. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decisionmaking, *Multiple Criteria Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science / Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds). Springer, NY*, 2016, Vol. 233, pp. 363–419.
14. Symets I., Yakovyna V., Seniv M. The Relation between Software Development Methodologies and Factors Affecting Software Reliability, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : 15th IEEE International Conference*. Lviv-Zbarazh, 23–26 September, 2020, pp. 377–381. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321937

Received 20.03.2023.
Accepted 07.04.2023.

МЕТОД ВИБОРУ МЕТОДОЛОГІЇ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З УРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЕКТУ

Сенів М. М. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри Програмного забезпечення, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. З розвитком програмної індустрії постійно зростає кількість застосовуваних методологій та гібридних підходів на їхній основі, тому вибір найбільш відповідної/оптимальної для даного проекту є актуальною проблемою програмної інженерії, оскільки процес вибору є слабо формалізованим, вимагає достатнього досвіду особи, яка буде приймати дане рішення та залежить від багатьох супутніх факторів.

Мета. Підтримка прийняття рішень в процесі вибору методології розроблення програмного проекту та підвищення ступеня адекватності вищезазначеного вибору

Метод. На основі попередньо розробленого автором алгоритму запропоновано узагальнений метод вибору оптимальної методології розробки програмного забезпечення, який складається з 14 кроків та враховує характеристики проекту базуючись на підходах багатокритеріального аналізу з урахуванням думок експертів для більш обґрунтованого вибору найбільш відповідної даному проекту методології. Метод використовує агреговані експертні оцінки, для обчислення ваг критеріїв вирішено використовувати АНР. Базуючись на встановлених значеннях критеріїв, їх ваг та експертних оцінках, обчислюється бал для кожної методології за допомогою методів Weighted Sum та TOPSIS.

Результати. Застосування розробленого методу на даних реальних проектів показало співпадіння у 83% випадків (в п'яти з шести випадків застосування методу дало вибір методології, яка відповідала тій, що насправді застосовувалась на реальному проекті). У випадку, коли вибрана запропонованим методом методологія відрізнялась від тієї, що була застосована насправді, застосування запропонованого методу рекомендує перейти до етапу початкового визначення критеріїв та їхніх ваг, що дасть змогу більш адекватно здійснити вибір методології.

Висновки. Запропонований метод може бути застосований в практичній діяльності керівниками програмних проектів для підтримки процесу прийняття рішень, а також дасть можливість скоротити часові затрати управління проектом.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: програмне забезпечення; методології розробки програмного забезпечення; інженерія програмного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА

1. Silva V. B. S. A multicriteria approach for selection of agile methodologies in software development projects / V. B. S. Silva, F. Schramm and A. C. Damasceno // 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC). – Budapest, Hungary. – 2016. – P. 2056–2060. DOI: 10.1109/SMC.2016.7844542.
2. Preeti Rai Impact of Different Methodologies in Software Development Process, (IJCSIT) / R. Preeti // International Journal of Computer Science and Information Technologies. – 2014. – Vol. 5 (2). – P. 1112–1116.
3. Harb Y. A. Evaluating Project Characteristics for Selecting the Best-fit Agile Software Development Methodology: A Teaching Case Evaluating Project Characteristics for Selecting the Bestfit / Y. A. Harb, C. Noteboom // Journal of the Midwest Association for Information Systems. – 2015. – Vol. 1 (1). – P. 33–52
4. Kumar K. A Rule-based Recommendation System for Selection of Software Development Life Cycle Models / K. Kumar, S. Kumar // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. – 2013. – Vol. 38, Issue 4. – P. 1–6. DOI: 10.1145/2492248.2492269
5. Victor M. Selection of Software Testing Technique: A Multi Criteria Decision Making Approach / M. Victor, N. Upadhyay // Trends in Computer Science, Engineering and Information Technology. CCSEIT 2011. Communications in Computer and Information Science, Goa-403726, India 2011: proceedings. – Springer, Berlin, Heidelberg. – Vol. 204. – P. 453–462. https://doi.org/10.1007/978-3-642-24043-0_46
6. Selection of Best Software Engineering Practices: A Multi-Criteria Decision Making Approach / Gil Hernández-Ledesma, Erik G. Ramos, Carlos A. Fernández-y-Fernández et al. // Research in Computing Science. – 2017. – № 136. – P. 47–60. DOI: 10.13053/rcs-136-1-4
7. Kononenko I. V. Method for selection of project management approach based on fuzzy concepts / I. V. Kononenko S. Yu. Lutsenko // Bulletin of NTU “KhPI”. Series: Strategic management, portfolio, program and project management. – 2017. – Vol. 2 (1224). – P. 8–17. DOI: <https://doi.org/10.20998/2413-3000.2017.1224.2>
8. Vijayasathy L.R. Choice of Software Development Methodologies: Do Organizational, Project, and Team Characteristics Matter? / L. R. Vijayasathy, C. W. Butler // IEEE Software. – 2016. – Vol. 33, № 5. – P. 86–94. DOI: 10.1109/MS.2015.26.
9. Empirical Study of Agile Software Development Methodologies: A Comparative Analysis / G. S. Matharu, A. Mishra, H. Singh et al. // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. – 2015. – Vol. 40, № 1. – P. 1–6. <https://doi.org/10.1145/2693208.2693233>
10. Despa M. L. Comparative study on software development methodologies / M. L. Despa // Database Systems Journal. – 2014. – Vol. V, № 3/2014. – P. 37–56.
11. Gonzalez-Perez C. Modelling software development methodologies: A conceptual foundation / C. Gonzalez-Perez, B. Henderson-Sellers // Journal of Systems and Software. – 2007. – Vol. 80, № 11, – P. 1778–1796. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2007.02.048>
12. Seniv M. M. Tools for selecting a software development methodology taking into account project characteristics / M. M. Seniv, A. M. Kovtoniuk, V. S. Yakovyna // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2022. – № 2– P. 175–188. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-2-17>
13. Saaty T. The analytic hierarchy and analytic network processes for the measurement of intangible criteria and for decisionmaking / T. Saaty // Multiple Criteria Decision Analysis. International Series in Operations Research & Management Science / Greco S., Ehrgott M., Figueira J. (eds). – Springer, NY. – 2016. – Vol. 233. – P. 363–419.
14. Symets I. The Relation between Software Development Methodologies and Factors Affecting Software Reliability / I. Symets, V. Yakovyna, M. Seniv // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : 15th IEEE International Conference, Lviv-Zbarazh, 23–26 September. – 2020. – P. 377–381. DOI: 10.1109/CSIT49958.2020.9321937

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 519.71

СТАБІЛІЗАЦІЯ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ З ЧАСОВИМИ ЗАТРИМКАМИ ЗА СТАНОМ ТА ОБМЕЖЕННЯМИ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ

Дорофєєв Ю. І. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Любчик Л. М. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерної математики та аналізу даних, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Мельников О. С. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Наявність затримок у часі має місце в багатьох складних динамічних системах, поширених у сферах сучасних комунікаційних та інформаційних технологій, зокрема при вирішенні задачі стабілізації мережевих керованих систем та високошвидкісних мереж зв'язку. У багатьох випадках часові затримки призводять до зниження ефективності систем та, навіть, до порушення умов стійкості. Для аналізу стійкості та синтезу стабілізуючих регуляторів для дискретних динамічних систем з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом в останнє десятиліття було запропоновано багато цікавих рішень з використанням методу функціоналів Ляпунова-Красовського. Наявність нелінійних обмежень на амплітуду керуючих впливів, зокрема у вигляді насичення, додатково ускладнює задачу та потребує розробки нових підходів та методів.

Мета. Мета роботи полягає у запровадженні процедури обчислення матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку за станом, який забезпечує асимптотичну стійкість досліджуваної системи, а також процедури обчислення максимального допустимого значення часової затримки за станом, за якого може бути забезпечена стійкість замкнутої системи для заданого набору допустимих початкових умов.

Метод. В роботі використано метод дескрипторного перетворення моделі замкнутої системи та запропоновано поширення методу інваріантних еліпсоїдів на системи з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом. Застосування методу функціоналів Ляпунова-Красовського та техніки лінійних матричних нерівностей дозволило звести задачу обчислення матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку до задачі напіввизначеного програмування, яка вирішується чисельно. Запропоновано ітераційний алгоритм вирішення білінійної матричної нерівності для обчислення максимального допустимого значення часової затримки за станом.

Результати. Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу в задачах стабілізації дискретних систем в умовах дії часових затримок за станом та нелінійних обмежень на керуючі впливи і дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці з метою аналізу стійкості та синтезу стабілізуючих регуляторів, а також обчислення максимального допустимого значення часових затримок.

Висновки. Запропоновано підхід, який дозволяє поширити метод інваріантних еліпсоїдів на дискретні динамічні системи з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом для вирішення задачі стабілізації системи за допомогою статичного зворотного зв'язку за станом на основі застосування методу функціоналів Ляпунова-Красовського. Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу в умовах наявності нелінійних обмежень на керуючі впливи типу насичення.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: стабілізація, часова затримка, насичення управління, функціонал Ляпунова-Красовського, метод інваріантних еліпсоїдів, лінійна матрична нерівність.

АБРЕВІАТУРИ

ЛМН – лінійна матрична нерівність;
МІЕ – метод інваріантних еліпсоїдів;
ФЛ – функція Ляпунова;
ФЛК – функціонал Ляпунова-Красовського.

НОМЕНКЛАТУРА

$A, A_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – стаціонарні матриці станів системи;
 $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ – стаціонарна матриця входів системи;
 I_n – одинична матриця розмірністю $n \times n$;

$K \in \mathbb{R}^{m \times n}$ – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку;

$0_{n \times m}$ – нульова матриця розмірністю $n \times m$;

$P_1 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симетрична додатно визначена матриця;

$P_2, P_3, W_2, W_3 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – допоміжні матриці;

$Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симетрична додатно визначена матриця;

$W_1, Z \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – симетричні додатно визначені матриці інваріантних еліпсоїдів;

$V(k)$ – функціонал Ляпунова-Красовського;

d^m – максимальне значення часової затримки;

$d(k) \in \mathbb{Z}_+$ – затримка в момент часу k ;

$iter$ – максимальна кількість ітерацій алгоритму;

$k = 0, 1, 2, \dots$ – номер дискретного моменту часу;

u_i^m – максимальне значення i -тої компоненти вектора входів $u(k)$;

тощо $u(k) \in \mathbb{R}^m$ – вектор керування в момент часу k ;

$x(k) \in \mathbb{R}^n$ – вектор станів системи в момент часу k ;

δ – допустима величина помилки;

$\varepsilon(W_1), \varepsilon(Z)$ – еліпсоїди з матрицями W_1 та Z , відповідно;

$\lambda(A)$ – спектр матриці A .

ВСТУП

Для дослідження широкого спектру динамічних систем використовують моделі з часовими затримками за станом. До систем такого класу, зокрема, належать мережеві виробничі та транспортні системи, системи зв'язку, підтримки прийняття рішень тощо [1]. Наявність затримок в часі може призводити до зниження продуктивності та, навіть, порушення умов стійкості систем управління. Тому аналіз стійкості та синтез методів стабілізації динамічних систем із затримками за станом має як практичне, так і теоретичне значення. Часові затримки можуть бути постійними, але найбільше уваги в літературі приділяється ситуації, коли затримки змінюються в часі, а їх величини є невідомими, проте обмеженими [2, 3].

Процеси управління динамічними системами ще більш ускладнюються, якщо існують обмеження на керуючі впливи. На практиці такі вимоги виникають доволі часто через неможливість регуляторів синтезувати сигнали управління з необмеженою амплітудою. Наявність обмежень типу насичення викликає необхідність застосування моделей з нелінійностями [4, 5]. В цьому випадку методи аналізу стійкості та синтезу стабілізуючих регуляторів, які використовуються для лінійних систем, не можуть бути безпосередньо застосовані. Тому виникає необхідність розробки нових

підходів до вказаної проблеми з використанням методу функціоналів Ляпунова-Красовського та техніки лінійних матричних нерівностей.

Об'єктом дослідження є процеси управління динамічними дискретними системами з невизначеними, але обмеженими часовими затримками за станом та нелінійними обмеженнями сигналів управління типу насичення.

Предмет дослідження складає процедура синтезу закону керування у вигляді стаціонарного зворотного зв'язку за станом на основі застосування методу функціоналів Ляпунова-Красовського та техніки лінійних матричних нерівностей.

Мета роботи полягає у запровадженні процедури обчислення матриці коефіцієнтів зворотного зв'язку за станом на основі методу інваріантних еліпсоїдів, а також ітераційного алгоритму вирішення білінійної матричної нерівності з метою обчислення максимальної допустимої величини часової затримки.

1 ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Розглянемо дискретну модель динамічної системи з невизначеними, але обмеженими часовими затримками за станом

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + A_d x(k-d(k)) + Bu(k), \\ x(k) &= \phi(k), \quad k \in [-d^m, \dots, 0], \end{aligned} \quad (1)$$

де $d(k)$ – додатне ціле число, яке відповідає нерівності

$$0 \leq d(k) \leq d^m. \quad (2)$$

Вважається, що вектор керуючих дій відповідає обмеженням по амплітуді у вигляді насичення, які мають вигляд

$$|u_i(k)| \leq u_i^m, \quad i = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Закон керування визначається у вигляді статичного зворотного зв'язку за станом $u(k) = Kx(k)$. Через обмеження (3) ефективний керуючий сигнал, що подається на систему (1), визначається таким чином

$$u(k) = \text{sat}(Kx(k)), \quad (4)$$

де $u_i(k) = \text{sat}(K_i x(k)) = \text{sign}(K_i x(k)) \min\{u_i^m, |K_i x(k)|\}$.

З метою згладжування небажаних ефектів, спричинених насиченістю керування, сформуємо компенсуючий сигнал, який моделює нелінійну зону нечутливості та визначається як різниця між сигналом керування та ефективним вихідним сигналом регулятора

$$\psi(Kx(k)) = Kx(k) - \text{sat}(Kx(k)). \quad (5)$$

Тоді рівняння замкнутої системи набуде вигляду

$$x(k+1) = (A + BK)x(k) + A_d x(k - d(k)) - B\psi(Kx(k)). \quad (6)$$

З урахуванням наведених вище відомостей в роботі вирішуються такі задачі.

1. Знайти матрицю зворотного зв'язку K , яка забезпечує асимптотичну (або експоненціальну) стійкість системи (6) з невизначеними, але обмеженими часовими затримками за станом (2) та нелінійними обмеженнями (3) керуючих сигналів типу насичення.

2. Знайти максимальне значення часової затримки за станом d^m , за якого може бути забезпечена асимптотична (або експоненціальна) стійкість замкнутої системи для заданого набору допустимих початкових умов.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В багатьох дослідженнях з теорії автоматичного управління доведено, що часові затримки є причиною погіршення продуктивності динамічних систем, а в деяких випадках можуть призводити до порушення умов стійкості. Часові затримки можуть мати місце як у неперервних, так і в дискретних системах і можуть бути постійними або змінюватись у часі, але дослідженням саме систем з дискретним часом автори приділяють набагато менше уваги.

В літературі, яка присвячена аналізу стійкості та методам стабілізації дискретних систем з часовими затримками за станом, окремий клас складають системи з постійною затримкою, тому що вони можуть бути перетворені до еквівалентних систем без затримки за допомогою методу розширення станів (див., наприклад, [6] та посилання там). Однак, такий підхід неможливо застосувати до систем з невідомими, але обмеженими часовими затримками.

Для систем із затримками, які змінюються в часі, але мають невелику тривалість, зазвичай, використовують підхід на основі дескрипторного перетворення моделі [7], що дозволяє за рахунок введення додаткових змінних, алгебраїчно пов'язаних зі змінними станів, отримати модель з новими властивостями, які не є характерними для звичайного способу опису динамічних систем.

Для дослідження систем з невизначеними часовими затримками або такими, що змінюються в часі, зазвичай використовують методи аналізу стійкості в часовій області, які базуються на теорії стійкості О. М. Ляпунова та її узагальненнях [8].

В першому з них використовують функціонали Ляпунова-Красовського, аргументом яких, поряд з компонентами вектора станів системи, є компоненти вектора станів з затримками. Метод ФЛК дозволив отримати критерій експоненціальної стійкості лінійних дискретних стаціонарних систем з часовими затримками. © Дорофєєв Ю. І., Любчик Л. М., Мельников О. С., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-15

тримками, а саме існування додатно визначеного функціоналу Ляпунова-Красовського, який має від'ємну першу різницю за часом вздовж всіх траєкторій системи [9].

Друге узагальнення прямого методу Ляпунова на системи з часовими затримками запропонував Б. С. Разуміхін. У ньому для аналізу стійкості використовується ФЛ, а від'ємна визначеність її першої різниці перевіряється тільки на множині функцій, що задовольняють спеціальному обмеженню – умові Разуміхіна.

Головна ідея обох узагальнень полягає в отриманні достатніх умов стійкості систем з часовими затримками шляхом побудови відповідного ФЛК або відповідної ФЛ, спосіб вибору яких є визначальним при виведенні критеріїв стійкості. Однак, тільки після того, як дослідники стали застосовувати техніку лінійних матричних нерівностей, а також були розвинені обчислювальні методи, засновані на ідеях опуклої оптимізації [10], для реалізації яких були розроблені відповідні алгоритми та програмне забезпечення, вдалося спростити процес побудови ФЛК і ФЛ, що сприяло розвитку та поширенню застосування зазначених методів.

В даний час продовжують з'являтися нові результати досліджень (див., наприклад, [11–13]), які можна розділити на два класи. До першого належать критерії, в яких умови стійкості не залежать від величини затримки. До другого класу відносяться критерії, в яких використовується інформація про величину інтервалу, що описує невизначеність затримки. Зазвичай критерії, що залежать від величини затримки, є менш консервативними, оскільки в них пропонуються умови, які забезпечують стійкість замкнутих систем тільки за умови, що величина затримки не перевищує певного значення. Тоді як в критеріях, що не залежать від затримки, розглядаються умови стійкості системи при будь-якій величині затримки. Тому в останні роки увагу дослідників здебільшого приваблювало вивчення критеріїв стійкості для систем з інтервально невизначеними часовими затримками, які залежать від величини інтервалу. Варто відзначити, що більшість отриманих результатів відносяться до систем неперервного часу, водночас дискретним системам приділяється значно менше уваги.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Слідуючи [4], ведемо матрицю $G \in \mathbb{R}^{m \times n}$ та визначимо багатогранну множину

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n : |(K_i - G_i)x| \leq u_i^m, i = 1, \dots, m\}. \quad (7)$$

Тоді щодо нелінійності $\psi(Kx(k))$ в [4] доведено лему.

Лема 1. Розглянемо функцію $\psi(Kx)$, визначену в (5). Якщо $x \in S$, тоді співвідношення

$$\psi^T(Kx)T[\psi(Kx) - Gx] \leq 0 \quad (8)$$

виконується для будь-якої діагональної додатно визначеної матриці $T \in \mathbb{R}^{m \times m}$.

Результат, отриманий у Лемі 1, можна розглядати як узагальнення класичної секторної умови, що дозволить пізніше отримати умови стійкості замкнутої системи у формі ЛМН.

Виконаємо еквівалентне дескрипторне перетворення [14] моделі (6):

$$\begin{cases} x(k+1) = y(k), \\ 0 = -y(k) + A_C x(k) + A_d x(k-d(k)) - B\psi(Kx(k)), \end{cases} \quad (9)$$

де $A_C = A + BK$.

Підкреслимо, що для заданих початкових умов $x(k) = \phi(k)$, $k \in [-d^m, \dots, 0]$ $x(k)$ задовольняє рівнянню (6) для будь-якого $k \geq 0$, якщо $x(k)$ задовольняє рівнянням (9).

Тоді результат розв'язання задачі синтезу стабілізуючого лінійного статичного зворотного зв'язку подано у вигляді теореми.

Теорема 1. Для заданого цілого $d^m > 0$ система (1) з невизначеними, але обмеженими часовими затримками за станом $d(k)$, які задовольняють умовам (2), та нелінійними обмеженнями (3) на керуючі впливи є робастно стійкою, якщо існують матриці $W_1 = W_1^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $Z = Z^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $R = R^T \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $W_2, W_3 \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $Y, N \in \mathbb{R}^{m \times n}$, які є рішенням оптимізаційної задачі

$$\text{trace}(W_1) + \text{trace}(Z) \rightarrow \min \quad (10)$$

при обмеженнях

$$\begin{bmatrix} -W_1 & -W_1 A^T - Y^T B^T - W_2^T A_d^T & 0_{n \times n} & N^T & W_2^T & W_1 \\ * & -A_d W_3 - W_3^T A_d^T & Z & BR & W_3^T & 0_{n \times n} \\ * & * & -Z & 0_{n \times m} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & -2R & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} \\ * & * & * & * & -W_1 & 0_{n \times n} \\ * & * & * & * & * & -\frac{1}{d^m + 1} Z \end{bmatrix} < 0, \quad (11)$$

$W_1 \succ 0$, $Z \succ 0$, $R \succ 0$.

При цьому закон керування визначається рівнянням

$$u(k) = YW_1^{-1}x(k). \quad (12)$$

Доведення. Введемо складений вектор $\xi(k) = \text{col}\{x(k), y(k), x(k-d(k)), \psi(Kx(k))\}$ та побудуємо функціонал Ляпунова-Красовського

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k) + V_3(k), \quad (13)$$

терми якого визначаються таким чином:

$$\begin{aligned} V_1(k) &= \xi^T(k)EP\xi(k), \quad V_2(k) = \sum_{i=k-d(k)}^{k-1} x^T(i)Qx(i), \\ V_3(k) &= \sum_{j=-d^m+2}^1 \sum_{l=k+j-1}^{k-1} x^T(l)Qx(l), \\ E &= \text{block diag}\{I_n, 0_{(2n+m) \times (2n+m)}\}, \\ P &= \begin{bmatrix} P_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ P_2 & P_3 & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & I_n & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Перший терм у виразі (13) запишемо у вигляді

$$V_1(k) = \xi^T(k)EP\xi(k) = x^T(k)P_1 x(k) \quad (14)$$

та обчислимо його першу різницю по k в силу системи (9)

$$\begin{aligned} \Delta V_1(k) &= x^T(k+1)P_1 x(k+1) - x^T(k)P_1 x(k) = \\ &= y^T(k)P_1 y(k) - 2 \begin{bmatrix} x^T(k) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} P \begin{bmatrix} \frac{1}{2}x(k) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Замінивши перший 0 в правій частині (15) на вираз в (9), отримаємо

$$\Delta V_1(k) = \xi^T(k)W\xi(k), \quad (16)$$

де

$$\begin{aligned} W &= \begin{bmatrix} 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & P_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix} - \\ &- P^T \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I_n & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ A_C & A_d & -I_n & -B \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I_n & A_C^T & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & A_d^T & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & -I_n & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & -B^T & 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix} P. \end{aligned}$$

Перша різниця по k другого терма в (13) дорівнює

$$\begin{aligned} \Delta V_2(k) &= \sum_{i=k+1-d(k+1)}^k x^T(i)Qx(i) - \sum_{i=k-d(k)}^{k-1} x^T(i)Qx(i) = \\ &= \sum_{i=k+1-d(k+1)}^k x^T(i)Qx(i) + x^T(k)Qx(k) - \\ &- x^T(k-d(k))Qx(k-d(k)) + \sum_{i=k+1}^{k-1} x^T(i)Qx(i) - \\ &- \sum_{i=k+1-d(k)}^{k-1} x^T(i)Qx(i). \end{aligned} \quad (17)$$

Оскільки $d(k) \geq 0$, отримаємо

$$\sum_{i=k+1}^{k-1} x^T(i)Qx(i) - \sum_{i=k+1-d(k)}^{k-1} x^T(i)Qx(i) \leq 0.$$

Остання нерівність разом з (17) дозволяє стверджувати

$$\Delta V_2(k) \leq \sum_{i=k+1-d(k+1)}^k x^T(i)Qx(i) + x^T(k)Qx(k) - x^T(k-d(k))Qx(k-d(k)).$$

Для третього терма в (13) отримаємо

$$\begin{aligned} \Delta V_3(k) &= \sum_{j=-d^m+2}^1 (x^T(k)Qx(k) - x^T(k+j-1)Qx(k+j-1)) = \\ &= d^m x^T(k)Qx(k) - \sum_{i=k+1-d^m}^k x^T(i)Qx(i). \end{aligned}$$

Оскільки $d(k) \leq d^m$, отримаємо

$$\sum_{i=k+1-d(k+1)}^k x^T(i)Qx(i) - \sum_{i=k+1-d^m}^k x^T(i)Qx(i) \leq 0.$$

Тоді випливає, що

$$\Delta V_2(k) + \Delta V_3(k) \leq -d^m x^T(k)Qx(k) - x^T(k-d(k))Qx(k-d(k)). \quad (18)$$

За умови, що $x(k) \in S$, з Леми 1 випливає нерівність

$$\Delta V(k) \leq \Delta V(k) - 2\psi^T(Kx)T[\psi(Kx) - Gx], \quad (19)$$

де T – деяка діагональна додатно визначена матриця.

Тоді з урахуванням (16), (18), (19) отримаємо

$$\Delta V(k) \leq \xi^T(k)\Psi\xi(k),$$

де

$$\Psi = \begin{bmatrix} (d^m+1)Q & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & G^T T \\ 0_{n \times n} & P_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & -Q & 0_{n \times m} \\ TG & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & -2T \end{bmatrix} - P^{-T} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I_n & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ A_C & A_d & -I_n & -B \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}I_n & A_C^T & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & A_d^T & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & -I_n & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & -B^T & 0_{m \times n} & 0_{m \times m} \end{bmatrix} P.$$

Отже, достатньою умовою стійкості замкнутої системи (6) є виконання матричної нерівності

$$\Psi < 0. \quad (20)$$

Перепишемо нерівність (20) у вигляді

$$\begin{bmatrix} \Lambda & -A_C P_3 - P_2 A_d & P_2^T & G^T T + P_2^T B \\ * & P_1 - P_3^T A_d - A_d^T P_3 & P_3^T & P_3^T B \\ * & * & -Q & 0_{n \times m} \\ * & * & * & -2T \end{bmatrix} < 0, \quad (21)$$

де $\Lambda = (d^m+1)Q - P_1 - A_C^T P_2 - P_2^T A_C$.

Для того, щоб отримати лінійну матричну нерівність, введемо обернену матрицю P^{-1} . Не важко переконатись у (21), що $P_3 + P_3^T < 0$. Оскільки $P_1 > 0$, тоді матриця P є неособливою. Визначимо

$$P^{-1} = W = \begin{bmatrix} W_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ W_2 & W_3 & 0_{n \times n} & 0_{n \times m} \\ 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & I_n & 0_{n \times m} \\ 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & I_m \end{bmatrix}.$$

Виконавши конгруентне перетворення матриці нерівності (21) за допомогою матриці W^T , отримаємо еквівалентну нерівність

$$\begin{bmatrix} (d^m+1)W_1 Q W_1 - W_1 & -W_1 A_C^T - W_2^T A_d^T & 0_{n \times n} & W_1 G^T T \\ * & -A_d W_3 - W_3^T A_d^T & I_n & B \\ * & * & -Q & 0_{n \times m} \\ * & * & * & -2T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_2^T \\ W_3^T \\ 0_{n \times n} \\ 0_{m \times n} \end{bmatrix} P_1 [W_2 \ W_3 \ 0_{n \times n} \ 0_{n \times m}] < 0.$$

Двічі застосувавши доповнення Шура, подамо матрицю нерівності у вигляді

$$\begin{bmatrix} -W_1 & -W_1 A_C^T & -W_2^T A_d^T & 0_{n \times n} & W_1 G^T T & W_2^T & W_1 \\ * & -A_d W_3 & -W_3^T A_d^T & I_n & B & W_3^T & 0_{n \times n} \\ * & * & -Q & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & -2T & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} \\ * & * & * & * & -W_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & * & * & * & -\frac{1}{d^m + 1} Q^{-1} \end{bmatrix} \cdot (22)$$

Введемо позначення $Y = KW_1$, $Z = Q^{-1}$, $R = T^{-1}$, $N = GW_1$. Тоді матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку відновлюється таким чином $K = YW_1^{-1}$. Виконавши конгруентне перетворення матриці (22) за допомогою блоково-діагональної матриці $\text{diag}\{I_{2n}, Q^{-1}, T^{-1}, I_{2n}\}$ та застосувавши введені матричні змінні, отримасмо ЛМН (11).

Для побудови оптимального керування в сенсі критерія, який буде обрано далі, скористаємось методом інваріантних еліпсоїдів [15, 16]. Еліпсоїд, який описується нерівністю

$$\varepsilon(W_1) = \{x \in \mathbb{R}^n : x^T(k)W_1^{-1}x(k) \leq 1\} \quad (23)$$

називають інваріантним за станом для системи (6), а також еквівалентної дескрипторної системи (9), якщо будь-яка траєкторія системи, яка розпочалась в еліпсоїді, залишається в ньому для будь-якого моменту часу $k \geq 0$.

Визначимо по аналогії сімейство еліпсоїдів, які є інваріантними за станом із затримками для досліджуваної системи

$$\varepsilon(Z) = \{x \in \mathbb{R}^n : x^T(k-i)Z^{-1}x(k-i) \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, d^m\}. \quad (24)$$

Тоді сума еліпсоїда (23) та сімейства еліпсоїдів (24), яка розглядається в сенсі еліпсоїдальної апроксимації по мінімуму об'єму, може розглядатись як апроксимація множини досяжності замкнутої системи (6), тобто дозволяє характеризувати вплив часових затримок на траєкторію системи.

Третій терм ФЛК (13) перепишемо у вигляді

$$V_3(k) = \sum_{i=1}^{d^m-1} (d^m - i)x^T(k-i)Qx(k-i). \quad (25)$$

Результати порівняння виразів (14) та (23), а також (25) та (24) дозволяють стверджувати, що якщо виконуються умови

$$P_1 = W_1^{-1}, \quad Q = Z^{-1}, \quad (26)$$

тоді сума еліпсоїда (23) та сімейства еліпсоїдів (24) є множиною, яка виступає верхньою оцінкою множини рівня ФЛК (13).

Отже, на основі використання МІЕ задача синтезу закону керування зводиться до побудови регулятора, який забезпечує мінімізацію за певним критерієм суми інваріантних еліпсоїдів при заданих обмеженнях. В якості критерію в роботі обрано суму квадратів напівосей еліпсоїдів, тобто суму сліда матриці W_1 та сліда матриці Z .

Таким чином, приходимо до оптимізаційної задачі (10) при обмеженнях, які подано у вигляді лінійних матричних нерівностей (11). ■

Зауваження 1. Оптимізаційна задача (10) при обмеженнях (11) є задачею напіввизначеного програмування, яка вирішується чисельно за допомогою відповідних вільно розповсюджуваних програмних пакетів на основі MATLAB.

Теорема 1 визначає залежну від величини затримки умову робастної стабілізації, подану в термінах розв'язуваності ЛМН, для дискретної лінійної динамічної системи з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом та нелінійними обмеженнями на амплітуду керуючих дій у вигляді насичення.

Перш ніж приступати до вирішення задачі синтезу робастного стабілізуючого управління, доцільно розв'язати задачу обчислення максимальної величини затримки за станом d^m , за якої виконуються умови асимптотичної (або експоненціальної) стійкості замкнутої системи.

Розглянемо систему (1) з невизначеними, але обмеженими часовими затримками за станом (2) та нелінійними обмеженнями (3) на керуючі впливи, і нехай скалярна величина $\hat{d}^m = 1/\alpha - 1$ отримана в результаті вирішення оптимізаційної задачі

$$\alpha \rightarrow \min \quad (27)$$

при обмеженнях

$$\begin{bmatrix} -W_1 & -W_1 A^T & -Y^T B^T & -W_2^T A_d^T & 0_{n \times n} & N^T & W_2^T & W_1 \\ * & -A_d W_3 & -W_3^T A_d^T & Z & BR & W_3^T & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & -Z & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & * & -2R & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} & 0_{m \times n} \\ * & * & * & * & * & -W_1 & 0_{n \times n} & 0_{n \times n} \\ * & * & * & * & * & * & * & -\alpha Z \end{bmatrix} < 0, \quad (28)$$

$$W_1 > 0, \quad Z > 0, \quad R > 0, \quad 0 < \alpha < 1,$$

де оптимізація виконується за матричними змінними $W_1 = W_1^T$, $Z = Z^T$, $R = R^T$, W_2 , W_3 , Y , N .

Тоді при виконанні умови $d(k) \leq \hat{d}^m$ для досліджуваної системи існує стабілізуючий регулятор у вигляді статичного зворотного зв'язку за станом (12).

Пошук рішення задачі (27) при обмеженнях (28) ускладнюється тим, що перша з нерівностей (28) є

білінійною матричною нерівністю, оскільки містить добуток скалярної змінної α та матричної змінної Z . Тому для обчислення максимальної величини затримки за станом запропоновано ітераційний алгоритм.

1. Ініціалізація:

– для заданої величини d^m обчислити початкове значення змінної $\alpha_{(0)} = 1/(d^m + 1)$;

– встановити максимальну кількість ітерацій алгоритма $iter$ та величину помилки δ ;

– встановити номер ітерації $j \leftarrow 0$.

2. Встановити $j \leftarrow j + 1$. Знайти значення матриць

$W_{1(j)}, W_{2(j)}, W_{3(j)}, Z_{(j)}, Y_{(j)}, N_{(j)}, R_{(j)}$ шляхом розв'язання задачі (10) при обмеженнях (11), де $d^m = \frac{1}{\alpha} - 1$, використовуючи значення $\alpha_{(j-1)}$.

3. Знайти значення змінної $\alpha_{(j)}$ шляхом розв'язання задачі (27) при обмеженнях (28), використовуючи матрицю $Z_{(j)}$, отриману на кроці 2.

4. Перевірити виконання умов зупинки $j \geq iter$ або $|\alpha_{(j)} - \alpha_{(j-1)}| \leq \delta$ та, якщо жодна з них не виконана, повторити кроки 2–4. В іншому випадку зупинити алгоритм.

Зауваження 2. Запропонований алгоритм, строго кажучи, не гарантує збіжності рішення. Однак, подібний підхід добре зарекомендував себе при чисельному моделюванні та застосовується у багатьох практичних додатках [17].

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для ілюстрації ефективності отриманих теоретичних результатів розглянемо чисельний приклад, який наведено в [12]. Динамічна система описується моделлю (1) з такими параметрами:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -2 & -3 \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} 0,01 & 0,1 \\ 0 & 0,1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, d^m = 10, u^m = 3.$$

Встановивши $d(k) \equiv 0$ в (1), легко побачити, що необхідною умовою стійкості системи є виконання нерівності $|\lambda(A + A_d)| < 1$. В даному випадку система є нестійкою, оскільки $\lambda(A + A_d) = -1,445 \pm i \cdot 0,288$.

В результаті вирішення задачі (10) при обмеженнях (11) за допомогою вільно розповсюдженого пакету *cvx* [18] отримано:

$$W_1 = 10^{-14} \begin{bmatrix} 2,657 & 0,001 \\ 0,001 & 1,287 \end{bmatrix}, W_2 = 10^{-15} \begin{bmatrix} 0,011 & 0,709 \\ 0,033 & 5,296 \end{bmatrix}, \\ W_3 = 10^{-14} \begin{bmatrix} 0,158 & 0,003 \\ 1,128 & -0,383 \end{bmatrix}, Z = 10^{-14} \begin{bmatrix} 0,022 & -0,051 \\ -0,051 & -3,049 \end{bmatrix}, \\ Y = 10^{-14} [5,311 \quad 3,873], R = 1,153 \cdot 10^{-13}.$$

Тоді для будь-яких початкових умов $x(0) \in S$, де багатогранна множина, обчислена на підставі (7) та отриманих результатах, має вигляд $S = \{x \in \mathbb{R}^2 : |x_1| \leq 2,5; |x_2| \leq 2,007\}$, регулятор (12) з матрицею $K = [1,998 \quad 3,008]$ стабілізує досліджувану систему, оскільки отримано $\lambda(A + BK + A_d) = 0,059 \pm i \cdot 0,016$.

Обчислимо початкове значення змінної $\alpha_{(0)} = 1/(d^m + 1) = 0,091$ та застосуємо запропонований ітераційний алгоритм. Після зупинення алгоритму на третій ітерації отримано максимальне допустиме значення часової затримки за станом для досліджуваної системи $\hat{d}^m = 99$.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Оберемо початкові умови $x^T(0) = [2 \quad -2]$ та змодельуємо перехідний процес в дискретній системі із затримками за станом, які змінюються в часі. Величина затримки $d(k), k = 0, 1, 2, \dots$ на кожному кроці генерувалась випадковим чином так, щоб виконувалась вимога (2). Отримані результати представлено на рис. 1 та рис. 2.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналізуючи отримані результати моделювання, можна побачити, що запропонований підхід дозволяє отримати достатньо високі результати. Розглянута дискретна система з невідомими, але обмеженими затримками за станом та нелінійними обмеженнями на керуючі впливи є стійкою при застосуванні запропонованого методу синтезу статичного зворотного зв'язку за станом.

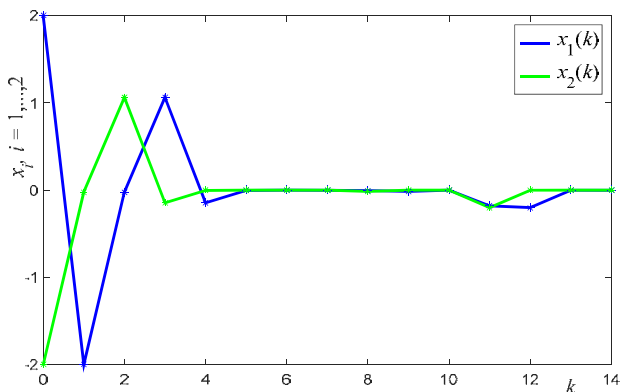


Рисунок 1 – Графік зміни станів $x_1(k)$ та $x_2(k)$

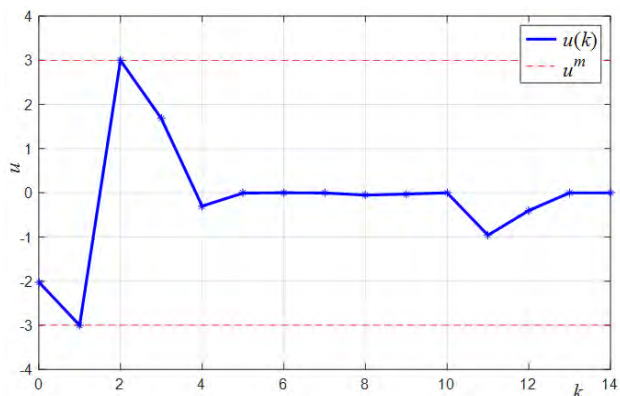


Рисунок 2 – Графік зміни керуючих впливів $u(k)$

На рис. 1 видно, що після переходу системи на 5-му кроці до стану рівноваги на 11–12 кроках спостерігаються ненульові значення станів, що, очевидно, є результатом впливу станів із затримками. Але дія регулятора впродовж двох кроків повертає систему до стану рівноваги.

На рис. 2 видно, що на 1-му та 2-му кроках моделювання величини керуючих дій обмежуються наявною вимогою $|u(k)| \leq u^m = 3$, але це не призводить до порушення умов стійкості замкнутої системи.

ВИСНОВКИ

Запропоновано підхід, який дозволяє поширити метод інваріантних еліпсоїдів на дискретні динамічні системи з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом для вирішення задачі стабілізації системи за допомогою статичного зворотного зв'язку за станом на основі застосування методу функціоналів Ляпунова-Красовського. Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу в умовах наявності нелінійних обмежень на керуючі впливи у вигляді насичення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у поширенні методу інваріантних еліпсоїдів на дискретні динамічні системи з невідомими, але обмеженими часовими затримками за станом.

В роботі вперше запропоновано ітераційний алгоритм для вирішення білінійної матричної нерівності з

метою обчислення максимальної величини часової затримки.

Практичне значення: результати чисельного моделювання дозволяють рекомендувати запропонований підхід для використання на практиці з метою аналізу стійкості та синтезу стабілізуючих регуляторів для дискретних динамічних систем з часовими затримками за станом.

Перспективи подальших досліджень полягають в можливостях поширення запропонованого підходу на дискретні динамічні системи з часовими затримками по управлінню, а також в умовах дії невідомих, але обмежених зовнішніх збурень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mahmoud M. S. Recent Progress in Stability and Stabilization of Systems with Time-Delays / M. S. Mahmoud // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2017. – Article ID 7354654. – 25 p. DOI: 10.1155/2017/7354654
2. Stabilization of Neutral Systems with Saturating Control Inputs / [J. M. Gomes da Silva Jr., A. Seuret, E. Fridman, J.-P. Richard] // *International Journal of Systems Science*. – 2010. – Vol. 42(7). – P. 1093–1103. DOI: 10.1080/00207720903353575
3. Zhang Y. Design of Robust Output Feedback Guaranteed Cost Control for a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems / Y. Zhang, Y. Dong, T. Li // *International Journal of Engineering Mathematics*. – 2014. – Article ID 628041. – 9 p. DOI: 10.1155/2014/628041
4. Stability and stabilization of linear systems with saturating actuators / [S. Tarbouriech, G. Garcia, J. M. Gomes da Silva Jr., I. Queinnec]. – Springer Science & Business Media, 2011. – 451 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-941-3
5. Delay Dependent Anti-windup Synthesis for Time-varying Delay Systems with Saturating Actuators / [N. El Fezazi, F. El Haoussi, E. H. Tissir, F. Tadeo] // *International Journal of Computer Applications*. – 2015. – Vol. 111, No. 1. DOI: 10.5120/19499-1107
6. Chang Y.-C. LMI approach to static output feedback simultaneous stabilization of discrete-time interval systems with time delay / Y.-C. Chang, S.-F. Su, S.-S. Chen // *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*. – Shanghai, 2004. – Vol. 7. – P. 4144–4149. DOI: 10.1109/ICMLC.2004.1384566
7. Lyubchik L. M. Consensus control of multi-agent systems with input delays: a descriptor model approach / L. M. Lyubchik, Y. I. Dorofiev // *Mathematical Modeling and Computing*. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 333–343. DOI: 10.23939/mmc2019.02.333
8. Fridman E. Tutorial on Lyapunov-based methods for Time-Delay Systems / E. Fridman // *European Journal of Control*. – 2014. DOI: 10.1016/j.ejcon.2014.10.001
9. Yu M. Robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delays / M. Yu, L. Wang, T. Chu // *Proceedings of the American Control Conference: Portland, USA, June 2005*. – Vol. 5. – P. 3435–3440. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470503
10. Leite V. J. S. A convex approach for robust state-feedback control of discrete-time systems with state delay / V. J. S. Leite, S. Tarbouriech, P. L. D. Peres // *Proceedings of the American Control Conference (AAC '04): Boston, Mass, USA, June 2004*. – Vol. 3. – P. 2870–2875. DOI: 10.1109/ACC.2004.182543

11. Alexandrova I. A new LKF approach to stability analysis of linear systems with uncertain delays / I. Alexandrova, A. Zhabko // *Automatica*. – 2018. – Vol. 91. – P. 173–178. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.01.012
12. Zhou B. Improved Razumikhin and Krasovskii approaches for discrete-time time-varying time-delay systems / B. Zhou // *Automatica*. – 2018. – Vol. 91. – P. 256–269. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.01.004
13. Lin H. New Lyapunov-Krasovskii Functional for Stability Analysis of Linear Systems with Time-Varying Delay / H. Lin, H. Zeng, W. Wang // *Journal of Systems Science and Complexity*. – 2021. – Vol. 34. – P. 632–641. DOI: 10.1007/s11424-020-9179-8
14. Boukas E.-K. Discrete-time systems with time-varying time delay: stability and stabilizability / E.-K. Boukas // *Mathematical Problems in Engineering*. – 2006. – Article ID 42489. – 10 p. DOI: 10.1155/MPE/2006/42489
15. Poznyak A. Attractive ellipsoids in robust control / A. Poznyak, A. Polyakov, V. Azhmyakov. – Basel : Springer International Publishing, 2014. – 348 p. DOI: 10.1007/978-3-319-09210-2
16. Rotondo D. On the optimization of actuator saturation limits for LTI systems: an LMI-based invariant ellipsoid approach / D. Rotondo, G. Rizzello // *IFAC-PapersOnLine*. – 2020. – Vol. 53, No. 2. – P. 5567–5572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1568
17. Mulder E. Multivariable anti-windup controller synthesis using bilinear matrix inequalities / E. Mulder, M. Kothare, M. Morari // *European Journal of Control*. – 2000. – Vol. 7, No. 5. – P. 455–464. DOI: 10.1016/S0947-3580(00) 71106-X
18. Grant M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 [Electronic resource] / M. Grant, S. Boyd // Mode of access: URL: <http://cvxr.com/cvx>. – Last access: 12.02.23.

Стаття надійшла до редакції 10.03.2023.
Після доробки 17.05.2023.

UDC 519.71

STABILIZATION OF DISCRETE-TIME SYSTEMS WITH STATE-DELAYS AND SATURATING CONTROL INPUTS

Dorofieiev Yu. I. – Dr. Sc., Head of the Department of System Analysis and Information Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

Lyubchik L. M. – Dr. Sc., Professor at the Department of Computer Mathematics and Data Analysis, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

Melnikov O. S. – PhD, Associated Professor at the Department of System Analysis and Information Technologies, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The presence of time delays occurs in many complex dynamical systems, particularly in the areas of modern communication and information technologies, such as the problem of stabilizing networked control systems and high-speed communication networks. In many cases, time-delays lead to a decrease in the efficiency of such systems and even to the loss of stability. In the last decade, many interesting solutions using the Lyapunov-Krasovskii functional have been proposed for stability analysis and synthesis of a stabilizing regulator for discrete-time dynamic systems with unknown but bounded state-delays. The presence of nonlinear constraints on the amplitude of controls such as saturation further complicates this problem and requires the development of new approaches and methods.

Objective. The purpose of this study is to develop a procedure for calculating the control gain matrix of state feedback that ensures the asymptotic stability of the analyzed system, as well as a procedure for calculating the maximum permissible value of the state-delay under which the stability of the closed-loop system can be ensured for a given set of admissible initial conditions.

Method. The paper uses the method of descriptor transformation of the model of a closed-loop system and extends the invariant ellipsoids method to systems with unknown but bounded state-delays. The application of the Lyapunov-Krasovskii functional and the technique of linear matrix inequalities made it possible to reduce the problem of calculating the control gain matrix to the problem of semi-definite programming, which can be solved numerically. An iterative algorithm for solving the bilinear matrix inequality is proposed for calculating the maximum permissible value of the time-delay.

Results. The results of numerical modeling confirm the effectiveness of the proposed approach in the problems of stabilizing discrete-time systems under the conditions of state-delays and nonlinear constraints on controls, which allows to recommend the proposed method for practical use for the problem of stability analysis and synthesis of stabilizing regulator, as well as for calculating the maximum permissible value of time-delay.

Conclusions. An approach is proposed that allows extending the invariant ellipsoids method to discrete-time dynamic systems with unknown but bounded state-delays for solving the problem of system stabilization using static state feedback based on the application of the Lyapunov-Krasovskii functional. The results of numerical modeling confirm the effectiveness of the proposed approach in the presence of the saturation type nonlinear constraints on the control signals.

KEYWORDS: stabilization, time-delay, saturating control, Lyapunov-Krasovskii functional, invariant ellipsoids method, linear matrix inequality.

REFERENCES

1. Mahmoud M. S. Recent Progress in Stability and Stabilization of Systems with Time-Delays, *Mathematical Problems in Engineering*, 2017, Article ID 7354654, 25 p. DOI: 10.1155/2017/7354654
2. Gomes da Silva Jr. J. M., Seuret A., Fridman E., Richard J.-P. Stabilization of Neutral Systems with Saturating Control Inputs, *International Journal of Systems Science*, 2010, Vol. 42(7), pp. 1093–1103. DOI: 10.1080/00207720903353575

© Дорофєєв Ю. І., Любчик Л. М., Мельников О. С., 2023
DOI 10.15588/1607-3274-2023-2-15



3. Zhang Y., Dong Y., Li T. Design of Robust Output Feedback Guaranteed Cost Control for a Class of Nonlinear Discrete-Time Systems, *International Journal of Engineering Mathematics*, 2014, Article ID 628041, 9 p. DOI: 10.1155/2014/628041
4. Tarbouriech S., Garcia G., Gomes da Silva Jr. J. M., Queinnec I. Stability and stabilization of linear systems with saturating actuators. Springer Science & Business Media, 2011, 451 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-941-3
5. El Fezazi N., El Haoussi F., Tissir E. H., Tadeo F. Delay Dependent Anti-windup Synthesis for Time-varying Delay Systems with Saturating Actuators, *International Journal of Computer Applications*, 2015, Vol. 111, No. 1. DOI: 10.5120/19499-1107
6. Chang Y.-C., Su S.-F., Chen S.-S. LMI approach to static output feedback simultaneous stabilization of discrete-time interval systems with time delay, *Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, 2004, Vol. 7, pp. 4144–4149. DOI: 10.1109/ICMLC.2004.1384566
7. Lyubchik L. M., Dorofieiev Y. I. Consensus control of multi-agent systems with input delays: a descriptor model approach, *Mathematical Modeling and Computing*, 2019, Vol. 6, No. 2, pp. 333–343. DOI: 10.23939/mmc2019.02.333
8. Fridman E. Tutorial on Lyapunov-based methods for Time-Delay Systems, *European Journal of Control*, 2014. DOI: 10.1016/j.ejcon.2014.10.001
9. Yu M., Wang L., Chu T. Robust stabilization of discrete-time systems with time-varying delays, *Proceedings of the American Control Conference*, Portland, USA, June 2005, Vol. 5, pp. 3435–3440. DOI: 10.1109/ACC.2005.1470503
10. Leite V. J. S., Tarbouriech S., Peres P. L. D. A convex approach for robust state-feedback control of discrete-time systems with state delay, *Proceedings of the American Control Conference (AAC '04)*, Boston, Mass, USA, June 2004, Vol. 3, pp. 2870–2875. DOI: 10.1109/ACC.2004.182543
11. Alexandrova I., Zhabko A. A new LKF approach to stability analysis of linear systems with uncertain delays, *Automatica*, 2018, Vol. 91, pp. 173–178. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.01.012
12. Zhou B. Improved Razumikhin and Krasovskii approaches for discrete-time time-varying time-delay systems, *Automatica*, 2018, Vol. 91, pp. 256–269. DOI: 10.1016/j.automatica.2018.01.004
13. Lin H., Zeng H., Wang W. New Lyapunov-Krasovskii Functional for Stability Analysis of Linear Systems with Time-Varying Delay, *Journal of Systems Science and Complexity*, 2021, Vol. 34, pp. 632–641. DOI: 10.1007/s11424-020-9179-8
14. Boukas E.-K. Discrete-time systems with time-varying time delay: stability and stabilizability, *Mathematical Problems in Engineering*, 2006, Article ID 42489, 10 p. DOI: 10.1155/MPE/2006/42489
15. Poznyak A., Polyakov A., Azhmyakov V. Attractive ellipsoids in robust control. Basel, Springer International Publishing, 2014, 348 p. DOI: 10.1007/978-3-319-09210-2
16. Rotondo D., Rizzello G. On the optimization of actuator saturation limits for LTI systems: an LMI-based invariant ellipsoid approach, *IFAC-PapersOnLine*, 2020, Vol. 53, No. 2, pp. 5567–5572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1568
17. Mulder E., Kothare M., Morari M. Multivariable anti-windup controller synthesis using bilinear matrix inequalities, *European Journal of Control*, 2000, Vol. 7, No. 5, pp. 455–464. DOI: 10.1016/S0947-3580(00) 71106-X
18. Grant M., Boyd S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 [Electronic resource], Mode of access: URL: <http://cvxr.com/cvx>, Last access: 12.02.23.

USING THE BEHAVIOR ANTAGONISM AND THE BIMATRIX GAME THEORY IN THE IT PROJECT MANAGEMENT

Chernov S. K. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Project management, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Chernova Lb. S. – PhD, Associate Professor, the Associate Professor of the Department of Information systems and technologies, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Chernova Ld. S. – Dr. Sc., Associate Professor, the Associate Professor of the Department of Information systems and technologies, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Kunanets N. E. – Dr. Sc., Professor, Deputy Head of the Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Titov S. D. – Associate Professor, the Associate Professor of the Department of Higher mathematics, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

Trushliakov E. I. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Air Conditioning and Refrigeration, The Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The article proposes a method of analyzing the proposals of team members in order to avoid conflict situations at the stage of team formation.

Objective. The object of the study is the method of analyzing the proposals of team members while solving project tasks.

The purpose of the work is to analyze the developed method of analysis of proposals of team members to avoid or resolve conflict situations at the stage of team activation

Method. The developed method is based on the theory of matrix games. Conflicts between individual team members mainly arise at the stage of team formation. For the project manager, it is important to identify the conflict situation in time and find a way out of it to satisfy both team members and without harming the teamwork as a whole. A team created to implement an IT project is often faced with a situation where two of its members have different visions of approaches to creating the final product. At the same time, each of them has experience in the development of similar software products or services by different teams. To effectively solve this situation, we suggest using approaches typical of bimatrix games, when each of these team members is considered as a player. This takes into account the fact that the bimatrix theory of games is based on a conflict between two players whose interests are opposite – an antagonistic zero-sum game is precisely the basis of the developed approach.

Results. The proposed method of analysis of proposals of team members contributes to the avoidance or resolution of conflict situations at the stage of their closer interaction. For efficient solution of the said situation, we propose to use approaches being typical for bimatrix games when each of these team members is treated as a player. At the same time, account is taken of the fact that the bimatrix game theory is based on a conflict of two players whose interests are opposite – an antagonistic game with a zero sum being that very element to constitute the basis of the approach developed.

Conclusions. The given calculation of the model example shows that the use of the proposed method allows the project manager to give a reasonable preference to another team member, since the expected average profit of this player is greater than that of the first player. In this case, the manager has an opportunity to simulate situations for the players (for the team) and promptly respond to probable deviations of their behavioral strategies from the optimal ones, establish healthy relationships between team members and choose the best proposals for solving project tasks.

KEYWORDS: bimatrix game theory, project manager, IT project, bimatrix games, project team.

ABBREVIATIONS

IT – Information Technology;

LO – linear optimization.

NOMENCLATURE

A, B – players of the bimatrix game;

A_m – pure player strategies A ;

B_n – pure player strategies B ;

C_A – the payoff matrix of the first player A ;

C_B – the payoff matrix of the second player B ;

i, j – the Nash equilibrium point;

X_a – first player mixed strategy A ;

X_b – mixed strategy of the second player B ;

v_x^A – the price of the game for the player A ;

v_x^B – the price of the game for the player B ;

α_A – the bottom price of the game for the player A ;

β_A – the upper price of the game for the player A ;

α_B – the bottom price of the game for the player B ;

β_B – the upper price of the game for the player B ;

$M_A(X_A, X_B)$ – the player's mathematical expectation A ;

$M_B(X_A, X_B)$ – the player's mathematical expectation B .

INTRODUCTION

Development of each software product or service is implemented as a unique project requiring creation of a team of realizers. Creation of an efficient team requires time and work input for its development. Special software and project

management methods contribute to quick team formation. Implementation of these tools makes the team's interaction, communication and fulfilment of the task preset more efficient. Many researchers focus their attention on development of team formation algorithms and methods.

The purpose of the article is to develop a mathematical model for choosing optimal strategies for the behavior of IT project members and, on the basis of this model, to optimize the set of starting proposals of project participants in order to increase the effectiveness of its implementation.

The objectives of the research are to study the behavior of the participants in a conflict situation using the apparatus of bimatrix game theory and to provide a compromise solution for choosing the proposals of IT project members. Existing approaches in research in this direction are normative and declarative. In view of this, the paper sets the goal of obtaining a specific content-algebraic model of equilibrium according to Nash, and at the second stage, to use the obtained results in project management.

1 PROBLEM STATEMENT

Let the task be set: from the point of view of the bimatrix game, it is necessary to analyze the behavior of participants A and B in a conflict situation and provide a compromise solution based on the recommendations for choosing the strategies of the players' behavior A_m and B_n . Let's study a conflict between two players A and B. The player A may adhere to own pure strategies $\{A_1, A_2, \dots, A_m\}$. The player B may choose one arbitrary strategy of the following ones $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$, and on the basis of this, make a choice of the situation in the game as a whole. To solve this problem, we use the concept of the optimal situation in the game for each player X_a and X_b , which is called Nash equilibrium.

For solving the situation described, let us use the bimatrix game theory in which the equilibrium situation is called Nash equilibrium and consists in the following: status $(i^* j^*)$ of bimatrix game

$$C_A = [a_{ij}]_{n \times n}, C_B = [b_{ij}]_{n \times n}$$

is a Nash equilibrium point subject to meeting the condition for values of the of the first player A proposal matrix

$$a_{ij^*} \leq a_{i^*j}, i = 1, \dots, n,$$

as well as meeting the condition for values of the second player B proposal matrix

$$b_{i^*j} \leq b_{i^*j^*}, j = 1, \dots, n.$$

Existing approaches in research in this direction are normative and declarative in nature. In this case, the goal of the work is to obtain a specific content-algebraic model of equilibrium according to Nash and, at the second stage, to use the obtained results in project management as a mathematical expectation of the players $M_A(X_A, X_B)$ та $M_B(X_A, X_B)$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The authors of article "A model for project team formation in complex engineering projects under uncertainty: A knowledge-sharing approach" [1] Mahdi Hosseini, Peyman Akhavan proposed a model based on knowledge sharing among separate team members for the aim of optimizing distribution of the load between them. Their approaches to project team formation are formulated as a fuzzy multipurpose model of integer programming 0–1, they adopt the approach of fuzzy multipurpose programming with limited odds improving the efficiency of decision taking as to abilities of the candidates under conditions of uncertainty. The authors propose to solve the problems by combining the genetic non-dominated sorting algorithm II with algorithms of fuzzy modeling. The calculation results have been proved and the efficiency of such a combination clearly shown in provision of Pareto-optimal solutions while creating the project team.

Margarita André Ampuero in her paper "Developing a Model and a Tool for the Formation of Project Team" [2] proposed an algorithm of a high-quality team formation for successful implementation of a project. The author carried out a deep analysis of models and tools for formation of project teams starting from detection of various factors having impact on these processes. She described the basic characteristics of the model and versions of a configured tool supporting the model and helping using it in various contexts enabling experiments with different solution algorithms and methods for determining those proposing the best results.

D.Strnad, N.Guid in the paper "A fuzzy-genetic decision support system for project team formation" [3] considered the problem of forming the optimum team because they believe that formation of the optimum team including several dozens of members requires suitable tools. In the researchers' opinion, the selection process is normally clearly defined, with formation of criteria for each team that concern necessary abilities of the team members. These abilities can be arbitrarily combined in the personnel and the target function becomes self-conflicting. This makes a team formation more difficult and requires a special software support. The research presents a fuzzy genetic analytical model for a project team formation based on quantity approaches but including the possibility of determining personnel's attributes from dynamic quantity data, modeling complicated attributes and processing the required excessive competence. This approach provides a specification of requirements using fuzzy descriptors and determining the formulated target function contributing to maximization. For optimizing the

selection of several project teams with probably conflicting requirements, the authors proposed special adaptation of an island genetic algorithm with a mixed crossover where the suitability of a joint solution is used for governing the selection within the islands.

Nataliia Dotsenko, Dmytro Chumachenko and Igor Chumachenko [4] in their paper “Project-oriented management of adaptive teams’ formation resources in multiproject environment” took the processes of project-oriented management of resources for creation of adapting teams in a multiproject environment. The researchers proposed models and methods of project-oriented management of resources for creation of adapting teams in a multiproject environment.

They proposed a set of methods for determining human resources strategies in a multiproject environment providing for usage of stratified representation of resources management processes in a multiproject environment that will enable analyzing the human resources management processes. The paper has analyzed the specifics of the developed method based on the interested parties in management of human resources for projects in a multiproject environment.

The paper [5] “Formation of IT Project Implementation Team” provides an analysis of a project team formation criteria and the team effect on the project success. It is indicated that a team is selected for each project at the first stage of its implementation. The authors understand a project team as a group of like-minders motivated to implement the project. The paper an original order of forming a project group providing for selection of realizers under defined criteria based on weight factors assigned by experts. The assessment is based on competences acquired by graduates of IT faculties and represented in vocational training programs [6].

For solving such a problem, the authors proposed to create a mathematical support to construction of models for assessment and control of technical and manufacturing process values with use of artificial neural networks [7]. Their solution provides for proposing models enabling automatic selection of a subset of minimum-size specimens from the initial sample [8]. The approach proposed by the researchers is applicable to various forms of exclusion procedures used in games, particularly the iterative removal of strictly dominated strategies and removal of weakly dominated strategies.

However, for describing competitive situations with participation of two players, it makes more sense, in the researchers’ opinion, to use matrix games as zero sum games for two players with finite sets of strategies with presumption of matrix games being interesting in terms of the analysis simplicity and structure specifics. Von Neumann and Morgenstern deemed it reasonable to use linear programming for solving these games. The described researches are based on analyzing matrix games in the context of pure strategies through such key notions and they show the pure strategic Nash equilibriums to be saddle points [9, 10]. The authors proposed the optimum strate-

gies and the game value through solving a linear programming problem [11].

The researchers proposed new interpretations to the known method as to the competition of individuals in pairwise interaction, they presented a class of models for situations including more than two persons [12].

The author [13] consider using the matrix game theory in case of the randomness matrix being winning. They present several model solutions for this type of game based on the win function characteristics and on the theory of optimization with probability boundaries.

3 MATERIALS AND METHODS

At the modern stage of the IT branch existence, with development of modern software products and services, special attention is paid to creation of the team with account taken of the project specifics. Creation of a professional team for each project is one of important commitments of the project manager who supervises the project in general, controls its basic parameters and coordinates activities of the team members. The project manager defines their number and professional competences. A professional team is created with the idea that it is not just a set of employees but a complicated social system with fixed interaction mechanisms the activities of which have effect on the project lifecycle processes.

Correctly selected team members guarantee the project to be successfully implemented in compliance with its period and budget. The experience of many IT projects showed that the team, as a rule, passes several stages in the project implementation project: formation, getting into closer interaction, functioning and dissolution. In this article, let us focus on the first two stages.

4 EXPERIMENTS

While forming a team, the project manager gathers a group of people uniting them by a common purpose. The team formation process specifics consist in the fact that the team members do not know each other and at this stage, they get to know each other, study the project product specifics, rules and regulations of interaction. This stage also includes setting tasks to each team member and determining the ways and methods of their fulfillment. Getting into closer interaction. Creation of a team for a new project also becomes more difficult due to the fact that operation of the team, as an integral system, is to be efficient and synchronized. Development of the corporate feeling and formation of the general interaction rules inside such a team require some time. For successful project implementation, its team needs to get united before the beginning of an IT product development..

The well-coordinated work of a team fulfilling its joint tasks is to begin at this very stage. It is distinguished by increased probability of conflicts, which is caused by difference of team member characters, approaches and methods of task fulfillment. The team accommodates the growth of leaders, establishment of informal groups, determining functions of separate team members, formation of the group climate, internal culture, etc.

This very stage, of team members getting into closer interaction, is associated with conflicts appearing between separate team members. For the project manager, it's extremely important to reveal a conflict situation in proper time and to find a way out of it to the satisfaction of the both team members and without harm to the teamwork in general. In our opinion, it is important for the project manager to use matrix games in such a situation.

The matrix game theory was formed on a conflict of two players with purely opposite interests – an antagonistic game with a zero sum. In the real life, conflict situations use to appear much more frequently, in which the interests of the players are not opposite any more, although not coinciding.

Lets study a conflict between two players *A* and *B*. The player *A* may adhere to own pure strategies

$$\{A_1, A_2, \dots, A_m\}.$$

The player *B* may choose one arbitrary strategy of the following ones

$$\{B_1, B_2, \dots, B_n\}.$$

As they are participants to a team game where certain rules are introduced, their possible combinatory choice is subjected to a single-value estimation with a reward. Thus, if the player *A* chose strategy A_i and the player *B* chose strategy B_j , the reward *A* will be equal to a_{ij} . The win of another player *B* under these conditions will be equal to b_{sj} . In this case

$$a_{ij} \neq b_{ij}$$

however, each player receives own win (winning situation). Such a serial search of strategies by the players determines two tables of wins (winning situations)

Table 1 – Player A's reward table

C_A	B_1	B_2	...	B_n
A_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
A_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...
A_m	a_{m1}	a_{m2}	...	a_{mn}

Table 2 – Player B's reward table

C_B	B_1	B_2	...	B_n
A_1	b_{11}	b_{12}	...	b_{1n}
A_2	b_{21}	b_{22}	...	b_{2n}
...
A_m	b_{m1}	b_{m2}	...	b_{mn}

A team created for implementation of an IT project often encounters a situation when two of its members have a different vision of approaches to the final product

creation. In this case, each of them has a big experience in developing similar software products or services in different teams. For efficient solution of the said situation, we propose to use approaches being typical for bimatrix games when each of these team members is treated as a player.

Using the first team member concept for creating a software product can be positively evaluated at r ($r > 0$) units, and the second team member concept is evaluated at t ($t > 0$) some conventional units.

Let us assume that the conditional benefit of using other proposals is equal to zero. The team of developers will gain additional positive benefit s ($s > 0$) subject to using the proposal of the first player enabling adoption of the experience of the previous team of developers who worked at the same company. Let us use the following calculations for taking the optimum decision and gaining the greatest benefit.

We have a typical bimatrix game. The first player *A* – submitted the first proposal. The second player *B* – the second proposal. Each of the players has two strategies – using the first proposal A_1, B_1 or the second one – A_2, B_2 . Therefore

$$A = [A_1, A_2], B = [B_1, B_2].$$

According to the game rules, the matrixes of benefits are equal for the players:

Player *A*

C_A	B_1	B_2
A_1	r	$r + s$
A_2	s	0

Player *B*

C_B	B_1	B_2
A_1	t	s
A_2	$t + s$	0

or in a matrix form:

$$C_A = \begin{bmatrix} r & r + s \\ s & 0 \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} t & s \\ t + s & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

For a bimatrix game, as well as for a matrix one, the created matrixes provide a quantity description of certain statuses in the game in which the interests of the players do not coincide. The main task of the bimatrix game theory is providing recommendations on players behavior with the aim to get the optimum result in a conflict situation of the game.

The optimum game result is reasonable behavior of the players and following the concept of balancing. As the interests of players are different, the project manager has to find a compromise solution that would satisfy as far as possible the both players and the team in general. In fact, this means that the recommended situation in the game is when departure from it would not increase the players'

wins but reduce them the other way round, or be a compromise in the best case. This status in the game is called equilibrium.

In the antagonistic matrix game theory, the equilibrium situation is associated with the saddle point. For solving the situation described, let us use the bimatrix game theory in which the equilibrium situation is called Nash equilibrium and consists in the following: status $(i^* j^*)$ of bimatrix game

$$C_A = [a_{ij}]_{n \times n}, C_B = [b_{ij}]_{n \times n},$$

is a Nash equilibrium point subject to meeting the condition for values of the of the first player A proposal matrix

$$a_{ij^*} \leq a_{i^*j}, i = 1, \dots, n,$$

as well as meeting the condition for values of the second player B proposal matrix

$$b_{i^*j} \leq b_{i^*j^*}, j = 1, \dots, n.$$

In other words, the locations of the matrixes accomodating at the same time the biggest values in columns for matrix C_A of the first player A and in rows for matrix C_B of the second player B – are the Nash equilibrium points.

The team assigns certain weight factors from 0 to 9 to the arguments in favor of the proposal of each player. If the bimatrix game is set by matrixes:

$$C_A = \begin{bmatrix} 2 & 5 & \textcircled{6} \\ \textcircled{6} & \textcircled{7} & 1 \\ \textcircled{6} & 3 & \textcircled{6} \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} 3 & 7 & \textcircled{8} \\ 7 & \textcircled{8} & 1 \\ \textcircled{8} & 4 & 4 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

For finding possible equilibrium points in pure strategies for the first player A, we need to choose the biggest values in columns of matrix C_A . For visual clarity, we mark these elements with circles. We need to choose the biggest values in rows to determine the candidates for the second player's equilibrium point. Let us encircle them as well for visual clarity.

The locations encircled in the both matrixes determine the Nash equilibrium points. In the first example, we have three such points – (A_1, B_3) ; (A_2, B_2) ; (A_3, B_1) . Each of these points sets the optimum dyad of the players' pure strategies:

$$(A_1, B_3) \rightarrow \begin{cases} X_{A_1} = [1, 0, 0] \\ X_{B_3} = [0, 0, 1] \end{cases}, (A_2, B_2) \rightarrow \begin{cases} X_{A_2} = [0, 1, 0] \\ X_{B_2} = [0, 1, 0] \end{cases}, \\ (A_3, B_1) \Rightarrow \begin{cases} X_{A_3} = [0, 0, 1] \\ X_{B_1} = [1, 0, 0] \end{cases}$$

If the bimatrix game is set by matrixes

$$C_A = \begin{bmatrix} 6 & \textcircled{9} & 2 \\ 3 & 2 & \textcircled{7} \\ \textcircled{9} & 8 & \textcircled{7} \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} \textcircled{8} & 4 & 2 \\ 1 & \textcircled{7} & \textcircled{9} \\ 6 & 1 & 8 \end{bmatrix}.$$

In this example, we have one equilibrium point

$$(A_2, B_3) \Rightarrow \begin{cases} X_{A_2} = [0, 1, 0] \\ X_{B_3} = [0, 0, 1] \end{cases}.$$

If the bimatrix game is set by matrixes

$$C_A = \begin{bmatrix} \textcircled{9} & 7 & 1 \\ 1 & \textcircled{9} & \textcircled{9} \\ \textcircled{9} & 6 & 7 \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} 1 & \textcircled{8} & 4 \\ \textcircled{5} & 1 & 2 \\ 4 & 1 & \textcircled{8} \end{bmatrix}.$$

For this matrix game, there is no equilibrium in pure strategies. If the bimatrix game is set by matrixes

$$C_A = \begin{bmatrix} -a & \textcircled{a} \\ \textcircled{0} & 0 \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} \textcircled{0} & -a \\ 0 & \textcircled{a} \end{bmatrix}.$$

For this couple of matrixes, a Nash equilibrium does not exist.

For bimatrix games, like in the matrix game theory, equilibrium points do not always exist like in variant 3, which just confirms such a case. Therefore, it makes sense to move from pure strategies to mixed ones. In this case, the players repeat many times their pure strategies to search the equilibrium, however, with certain frequencies (probabilities).

Should the game be repeated many times with constant conditions, player A applies own strategies $\{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ with respective frequencies $\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$,

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, X_A = [p_1, p_2, \dots, p_n]. \quad (3)$$

A move is carried out to mixed strategies by defining frequencies of using pure strategies for the first player.

Player B applies frequencies

$$X_B = [q_1, q_2, \dots, q_n], \sum_{i=1}^n q_i = 1. \quad (4)$$

of own strategies $\{B_1, B_2, \dots, B_n\}$.

The mixed strategies allowed broadening the tasks of bimatrix games and finding possibilities of more reasonable distribution of wins in the game as average values –

Let us have a bimatrix game given by matrixes C_A, C_B of two players A and B .

$$C_A = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 6 \\ 6 & 7 & 1 \\ 6 & 3 & 6 \end{bmatrix}, C_B = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 8 \\ 7 & 8 & 1 \\ 8 & 4 & 4 \end{bmatrix}.$$

The frequency vectors of mixed solutions of the first and second players are respectively equal to:

$$X_A = [p_1, p_2, p_3] = [p_1, p_2, 1 - p_1 - p_2], \quad (18)$$

$$X_B = [q_1, q_2, q_3] = [q_1, q_2, 1 - q_1 - q_2]. \quad (19)$$

In this case, the game value for player A

$$v_x^A = M_A(X_A, X_B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} p_i q_j = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{ij} p_i q_j = (-4q_1 + 2q_2)p_1 + (5q_1 + 9q_2 - 5)p_2 - 3q_2 + 6. \quad (20)$$

and for player B

$$v_x^B = M_B(X_A, X_B) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{ij} p_i q_j = (-9p_1 + 2p_2 + 4)q_1 + (-p_1 + 7p_2)q_2 + 4p_1 - 3p_2 + 4. \quad (21)$$

For calculation of the problem solution, we compose system of conditions (13)

$$\begin{cases} (-4q_1 + 2q_2)p_1 + (5q_1 + 9q_2 - 5)p_2 \geq 0, \\ (4q_1 - 2q_2)(1 - p_1) + (5q_1 + 9q_2 - 5)p_2 \geq 0, \\ (-4q_1 + 2q_2)p_1 + (5q_1 + 9q_2 - 5)(p_2 - 1) \geq 0, \\ (-9p_1 + 2p_2 + 4)q_1 + (-p_1 + 7p_2)q_2 \geq 0, \\ (9p_1 - 2p_2 - 4)(1 - q_1) + (-p_1 + 7p_2)q_2 \geq 0, \\ (-9p_1 + 2p_2 + 4)q_1 + (p_1 - 7p_2)(1 - q_2) \geq 0. \end{cases} \quad (22)$$

Solution of system (12) looks as follows:

$$X_A = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right] \approx [0.46, 0.07, 0.47] \Rightarrow [46\%, 7\%, 47\%],$$

$$v_A^x = \frac{108}{23} \approx 4,70,$$

$$X_B = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right] \approx [0.22, 0.43, 0.35] \Rightarrow [22\%, 43\%, 35\%],$$

$$v_B^x = \frac{344}{61} \approx 5.64.$$

We form the first matrix game

$$\begin{cases} M_A(X_A^*, X_B^*) - M_A(X_{A_1}, X_B^*) \geq 0, \\ M_A(X_A^*, X_B^*) - M_A(X_{A_2}, X_B^*) \geq 0, \\ \vdots \\ M_A(X_A^*, X_B^*) - M_A(X_{A_n}, X_B^*) \geq 0, \\ M_B(X_A^*, X_B^*) - M_B(X_A^*, X_{B_1}) \geq 0, \\ M_B(X_A^*, X_B^*) - M_B(X_A^*, X_{B_2}) \geq 0, \\ \vdots \\ M_B(X_A^*, X_B^*) - M_B(X_A^*, X_{B_n}) \geq 0. \end{cases} \quad (23)$$

$$W_1^{*A} = x_1^{*A} + x_2^{*A} + x_3^{*A} \rightarrow \min,$$

$$\Omega_1^{*A} : \begin{cases} 2x_1^{*A} + 6x_2^{*A} + 6x_3^{*A} \geq 1, \\ 5x_1^{*A} + 7x_2^{*A} + 3x_3^{*A} \geq 1, \\ 6x_1^{*A} + x_2^{*A} + 6x_3^{*A} \geq 1, \end{cases} \quad (24)$$

$$x_i^{*A} = \frac{x_i^A}{v_A^x}, x_i^A \in [0, 1], i = 1, 2, 3.$$

Solution of the problem by simplex method is given in Table 1.

From the last simplex table, we obtain:

$$x_1^{*A} = \frac{5}{72}, x_2^{*A} = \frac{1}{18}, x_3^{*A} = \frac{19}{216}. \text{ As}$$

$$x_1^{*A} + x_2^{*A} + x_3^{*A} = \frac{1}{v_A^x} \text{ and } x_i^{*A} = \frac{x_i^A}{v_A^x},$$

$i = 1, 2, 3$ we get:

$$X_A^m = \left[\frac{15}{46}, \frac{6}{23}, \frac{19}{46} \right] \approx [0.33, 0.26, 0.41] \Rightarrow [33\%, 26\%, 41\%],$$

$$v_A^x = \frac{108}{23} \approx 4.70.$$

Let's compose the next matrix game.

Table 3 – Solving the problem by the simplex method

Basis	C	B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	1	1	0	0	0
a_4	0	-1	-2	-6	-6	1	0	0
a_5	0	-1	-5	-7	-3	0	1	0
a_6	0	-1	-6	-1	-6	0	0	1
Δ_j	$W_I(X_0) = 0$		-1	-1	-1	0	0	0
a_1	1	1/2	1	3	3	-1/2	0	0
a_5	0	3/2	0	8	12	-5/2	1	0
a_6	0	2	0	17	12	-3	0	1
Δ_j	$W_I(X_1) = 1/2$		0	2	2	-1/2	0	0
a_1	1	-1/16	1	0	-3/2	7/16	-3/8	0
a_2	1	3/16	0	1	3/2	-5/16	1/8	0
a_6	0	-19/16	0	0	-27/2	37/16	-17/8	1
Δ_j	$W_I(X_2) = 1/8$		0	0	-1	1/8	-1/4	0
a_1	1	5/72	1	0	0	13/72	-5/36	-1/9
a_2	1	1/18	0	1	0	-1/18	-1/9	1/9
a_3	1	19/216	0	0	1	-37/216	17/108	-2/27
Δ_j	$W_I(X_{opt}) = 23/108$		0	0	0	-5/108	-5/54	-2/27

We solve the optimization problem by simplex method as per Table 4 below.

$$W_{II}^{*A} = y_1^{*A} + y_2^{*A} + y_3^{*A} \rightarrow \max,$$

$$\Omega_{II}^{*A} : \begin{cases} 2y_1^{*A} + 5y_2^{*A} + 6y_3^{*A} \leq 1, \\ 6y_1^{*A} + 7y_2^{*A} + y_3^{*A} \leq 1, \\ 6y_1^{*A} + 3y_2^{*A} + 6y_3^{*A} \leq 1, \end{cases} \quad (25)$$

$$y_i^{*A} = \frac{y_i^A}{U_A^y}, y_i^A \in [0,1], i = 1,2,3.$$

From the last simplex table, we obtain:

$$y_1^{*A} = \frac{2}{27}, y_2^{*A} = \frac{5}{54}, y_3^{*A} = \frac{5}{108}. \text{ As}$$

$$y_1^{*A} + y_2^{*A} + y_3^{*A} = \frac{1}{U_A^y} \text{ and } y_i^{*A} = \frac{y_i^A}{U_A^y},$$

$i=1, 2, 3$ we get:

$$Y_A^m = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right] \approx [0.22, 0.43, 0.35] \Rightarrow [22\%, 43\%, 35\%]. \quad (26)$$

$$U_A^y = \frac{108}{23} \approx 4,70.$$

We evaluate the lower and the upper boundaries of the game result for matrix C_B of the other player, being equal to $\alpha_B = \max \min C_B = 4$ and

$$W_I^{*B} = x_1^{*B} + x_2^{*B} + x_3^{*B} \rightarrow \min,$$

$$\Omega_I^{*B} : \begin{cases} 3x_1^{*B} + 7x_2^{*B} + 8x_3^{*B} \geq 1, \\ 7x_1^{*B} + 8x_2^{*B} + 4x_3^{*B} \geq 1, \\ 8x_1^{*B} + x_2^{*B} + 4x_3^{*B} \geq 1, \end{cases} \quad (27)$$

$$x_i^{*B} = \frac{x_i^B}{U_B^x}, x_i^B \in [0,1], i = 1,2,3.$$

$$\beta_B = \min \max C_B = 8$$

The first one looks as follows.

Table 4 – Optimization problem by simplex method

Basis	C	B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	1	1	0	0	0

a_4	0	1	2	5	6	1	0	0
a_5	0	1	6	7	1	0	1	0
a_6	0	1	6	3	6	0	0	1
Δ_j	$W_{II}(Y_0) = 0$		-1	-1	-1	0	0	0

a_4	0	2/3	0	8/3	17/3	1	-1/3	0
a_1	1	1/6	1	7/6	1/6	0	1/6	0
a_6	0	0	0	-4	5	0	-1/1	1
Δ_j	$W_{II}(Y_1) = 1/6$		0	1/6	-5/6	0	1/6	0

a_4	0	2/7	-16/7	0	37/7	1	-5/7	0
a_2	1	1/7	6/7	1	1/7	0	1/7	0
a_6	0	4/7	24/7	0	39/7	0	-3/7	1
Δ_j	$W_{II}(Y_2) = 1/7$		-1/7	0	-6/7	0	1/7	0

a_1	1	2/37	-16/37	0	1	7/37	-5/37	0
a_2	1	5/37	34/37	1	0	-1/37	6/37	0
a_6	0	10/37	216/37	0	0	-39/37	12/37	1
Δ_j	$W_{II}(Y_3) = 7/37$		-19/37	0	0	6/37	1/37	0

a_3	1	2/27	0	0	1	1/9	-1/9	2/27
a_2	1	5/54	0	1	0	5/36	1/9	-17/108
a_1	1	5/108	1	0	0	-13/72	1/18	37/216
Δ_j	$W_{II}(Y_{opt}) = 23/108$		0	0	0	5/72	1/18	19/216

We solve optimization problem (15) by simplex method as per Table 5.

From the last simplex table, we obtain:

$$x_1^{*B} = \frac{7}{86}, \quad x_2^{*B} = \frac{1}{86}, \quad x_3^{*B} = \frac{29}{344}. \quad \text{As}$$

$$x_1^{*B} + x_2^{*B} + x_3^{*B} = \frac{1}{v_B^x} \quad \text{and} \quad x_i^{*B} = \frac{x_i^B}{v_B^x},$$

$i = 1, 2, 3$ we finally obtain:

$$X_B^m = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right] \approx [0.46, 0.07, 0.47] \Rightarrow [46\%, 7\%, 47\%],$$

$$v_B^x = \frac{344}{61} \approx 5.64.$$

$$W_{II}^{*B} = y_1^{*B} + y_2^{*B} + y_3^{*B} \rightarrow \max,$$

$$\Omega_{II}^{*B} : \begin{cases} 3y_1^{*B} + 7y_2^{*B} + 8y_3^{*B} \leq 1, \\ 7y_1^{*B} + 8y_2^{*B} + y_3^{*B} \leq 1, \\ 8y_1^{*B} + 4y_2^{*B} + 4y_3^{*B} \leq 1, \end{cases} \quad (28)$$

$$y_i^{*B} = \frac{y_i^B}{v_B^y}, \quad y_i^B \in [0, 1], \quad i = 1, 2, 3.$$

We record a problem being dual to (15).

We solve optimization problem (16) by simplex method as per Table 6.

Table 5 – Solution of the optimization problem (15) by the simplex method

Basis	C	B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	1	1	0	0	0
a_4	0	-1	-3	-7	-8	1	0	0
a_5	0	-1	-7	-8	-4	0	1	0
a_6	0	-1	-8	-1	-4	0	0	1
Δ_j	$W_I(X_0) = 0$		-1	-1	-1	0	0	0
a_1	1	1/3	1	7/3	8/3	-1/3	0	0
a_5	0	4/3	0	25/3	44/3	-7/3	1	0
a_6	0	5/3	0	53/3	52/3	-8/3	0	1
Δ_j	$W_I(X_1) = 1/3$		0	4/3	5/3	-1/3	0	0
a_1	1	1/11	1	9/11	0	1/11	-2/11	0
a_3	1	1/11	0	25/44	1	-7/44	3/44	0
a_6	0	1/11	0	86/11	0	1/11	-13/11	1
Δ_j	$W_I(X_2) = 2/11$		0	17/44	0	-3/44	-5/44	0
a_1	1	7/86	1	0	0	7/86	-5/86	-9/86
a_3	1	29/344	0	0	1	-57/344	53/344	-25/344
a_2	1	1/86	0	1	0	1/86	-13/86	11/86
Δ_j	$W_I(X_{opt}) = 61/344$		0	0	0	-25/344	-19/344	-17/344

Table 6 – Solution of the optimization problem (16) by the simplex method

Basis	C	B	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
			1	1	1	0	0	0
a_4	0	1	3	7	8	1	0	0
a_5	0	1	7	8	1	0	1	0
a_6	0	1	8	4	4	0	0	1
Δ_j	$W_{II}(Y_0) = 0$		-1	-1	-1	0	0	0
a_4	0	4/7	0	25/7	53/7	1	-3/7	0
a_1	1	1/7	1	8/7	1/7	0	1/7	0
a_6	0	-1/7	0	-36/7	20/7	0	-8/7	1
Δ_j	$W_{II}(Y_1) = 1/7$		0	1/7	-6/7	0	1/7	0

Table 6 continuation

a_4	0	1/8	- 25/8	0	57/8	1	- 7/8	0
a_2	1	1/8	7/8	1	1/8	0	1/8	0
a_6	0	1/2	9/2	0	7/2	0	- 1/2	1
Δ_j	$W_{II}(Y_2) = 1/8$		- 1/8	0	- 7/8	0	1/8	0

a_3	1	1/57	- 25/57	0	1	8/57	- 7/57	0
a_2	1	7/57	53/57	1	0	- 1/57	8/57	0
a_6	0	25/57	344/57	0	0	- 28/57	- 4/57	1
Δ_j	$W_{II}(Y_3) = 8/57$		- 29/57	0	0	7/57	1/57	0

a_3	1	17/344	0	0	1	9/86	- 11/86	25/344
a_2	1	19/344	0	1	0	5/86	13/86	- 53/344
a_1	1	25/344	1	0	0	- 7/86	- 1/86	57/344
Δ_j	$W_{II}(Y_{opt}) = 61/344$		0	0	0	7/86	1/86	29/344

Table 7 – Summary table of bimatrix game solutions

Bimatrix game	
$C_A = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 6 \\ 6 & 7 & 1 \\ 6 & 3 & 6 \end{bmatrix} \quad C_B = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 8 \\ 7 & 8 & 1 \\ 8 & 4 & 4 \end{bmatrix}$	
Solution for the first player <i>A</i>	
$X_A = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right] \approx [0.46, 0.07, 0.47] \Rightarrow [46\%, 7\%, 47\%]$	$v_A^x = \frac{108}{23} \approx 4,70$
Solution for the second player <i>B</i>	
$X_B = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right] \approx [0.22, 0.43, 0.35] \Rightarrow [22\%, 43\%, 35\%]$	$v_B^x = \frac{344}{61} \approx 5,64$

Matrix game $C_A = \begin{bmatrix} 2 & 5 & 6 \\ 6 & 7 & 1 \\ 6 & 3 & 6 \end{bmatrix}$ (matrix of the first player)	
Solution of primal and dual problems	
$X_A^m = \left[\frac{15}{46}, \frac{6}{23}, \frac{19}{46} \right] \approx [0.33, 0.26, 0.41] \Rightarrow [33\%, 26\%, 41\%]$	$v_A^x = \frac{108}{23} \approx 4,70$
$Y_A^m = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right] \approx [0.22, 0.43, 0.35] \Rightarrow [22\%, 43\%, 35\%]$	$v_A^y = \frac{108}{23} \approx 4,70$

Matrix game $C_B = \begin{bmatrix} 3 & 7 & 8 \\ 7 & 8 & 1 \\ 8 & 4 & 4 \end{bmatrix}$ (matrix of the second player)	
Solution of primal and dual problems	
$X_B^m = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right] \approx [0.46, 0.07, 0.47] \Rightarrow [46\%, 7\%, 47\%]$	$v_B^x = \frac{344}{61} \approx 5,64$
$Y_B^m = \left[\frac{25}{61}, \frac{19}{61}, \frac{17}{61} \right] \approx [0.41, 0.31, 0.28] \Rightarrow [41\%, 31\%, 28\%]$	$v_B^y = \frac{344}{61} \approx 5,64$

From the last simplex table, we obtain:

$$y_1^{*B} = \frac{25}{344}, y_2^{*A} = \frac{19}{344}, y_3^{*A} = \frac{17}{344}. \text{ As}$$

$$y_1^{*B} + y_2^{*B} + y_3^{*B} = \frac{1}{U_B^y} \text{ and } y_i^{*B} = \frac{y_i^B}{U_B^y},$$

$i = 1, 2, 3$ the game solution looks as follows:

$$Y_B^m = \left[\frac{25}{61}, \frac{19}{61}, \frac{17}{61} \right] \approx [0.41, 0.31, 0.28] \Rightarrow [41\%, 31\%, 28\%]'$$

$$U_B^y = \frac{344}{61} \approx 5.64.$$

5 DISCUSSION

The summary table of solutions to the bimatrix game and its respective matrix games is given in Table 7.

Having analyzed the calculation results, we formulate several important statements:

– The optimum mixed solution of the first player

$$X_A = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right] \text{ in the bimatrix game coincides}$$

with mixed solution $X_B^m = \left[\frac{28}{61}, \frac{4}{61}, \frac{29}{61} \right]$ in the matrix

game given by payoff matrix C_B of the other player B .

In other words, the optimum behavior of the first player is a result of solving the primal optimization problem for the second player, i.e. the first player will not take account of own matrix – all the attention is paid to the matrix of the other player; but at the same time, the value of win

$$U_A^x = \frac{108}{23} \approx 4.70$$

is a result of solving dual optimization problem

$$U_A^y = \frac{108}{23} \approx 4.70$$

for the matrix game given by own matrix C_A .

– The optimum mixed strategy of the other player

$$X_B = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right]$$

coincides with the calculation of dual optimization problem

$$Y_A^m = \left[\frac{5}{23}, \frac{10}{23}, \frac{8}{23} \right]$$

for the first player. Therefore, the optimum behavior of the second player is fully derived from matrix C_A of the first player – the values of own wins do not matter.

– The value of win

$$U_B^x = \frac{344}{61} \approx 5.64$$

is equal to the value of benefits of matrix game

$$U_B^y = \frac{344}{61} \approx 5.64$$

of the dual problem for the second player.

– Solutions of the dual LO problem for the first player's matrix game and of the primal LO problem for the second player's matrix game give the full result of the bimatrix game solution. Thus, we can skip the calculation of the bimatrix game in general, but solve two separate matrix games.

– The players' behavior in the bimatrix game is sometimes subjected to strange transformations – the players' behavior strategies begin not to depend on the value of their own benefit. The players start to be only concerned about what the other player's benefit would be. We encounter the effect of behavior confrontation or antagonism. This fact can be related to the modern direction in the game theory – the behavior game theory and requires further research.

The approach proposed is taken as the basis of the recommendation system.

CONCLUSIONS

For a project team, it's extremely important to begin implementing a project in compliance with the calendar schedule. The proposed method of analyzing the team members' proposals contributes to avoiding or solving conflict situations at the stage when they get into closer interaction. The provided calculation of the model example shows that using the proposed method enable the project manager giving a well-grounded advantage to the other team member as the expected average win of this player is bigger than of the first player. In this case, the manager has the possibility to model situations for the players (for the team) and to promptly respond to probable departures of their behavior strategies from the optimum, to establish sound relations between the team members and to select the best proposals for solving the project tasks. Further research provides for designing an information system as a project manager's tool that is based on the method elaborated.

REFERENCES

1. Mahdi Hosseini S., Akhavan Peyman A model for project team formation in complex engineering projects under uncertainty: A knowledge-sharing approach. Hosseini, 2017, Vol. 46, Issue 7, pp. 1131–1157.
2. Ampuero M. A. Developing a Model and a Tool for the Formation of Project Team. Latin American Women and Research Contributions to the IT Field, 2021, 23 p.
3. Strnad D., Guid N. A fuzzy-genetic decision support system for project team formation, *Applied Soft Computing*, 2010, Vol. 10, Issue 4, pp. 1178–1187.

4. Dotsenko N., Chumachenko D., Chumachenko I. Project-oriented management of adaptive teams' formation resources in multi-project environment, *Applied Soft Computing*, 2010, Vol. 10, Issue 4, pp. 1178–1187.
5. Nebesnyi R., Pasichnyk V., Kunanets N., Veretennikova N., Kunanets O. Formation of IT Project Implementation Team, *IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. Zbarazh, Ukraine, 2020. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9322005>
6. Harold William Kuhn and Albert William Tucker Linear Inequalities and Related Systems. (AM-38), Volume 38 in the series *Annals of Mathematics Studies*, 346 p
7. Leoshchenko S., Oliinyk A., Zaiko T., Nazarenko O., Subbotin S., Donenko V. Using Neuromodels for Evaluating and Determining Productivity Technical, *Processes 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) 06–09 October 2020* DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468053
8. Subbotin S. A. Methods of sampling based on exhaustive and evolutionary search, *Aut. Control Comp. Sci.*, 2013, Vol. 47, pp. 113–121. doi.org/10.3103/S0146411613030073
9. Joel Orverem, Azuaba, Emmanuel Application of Matrices to the Theory of Games, *Journal of Nigerian Association of Mathematical Physics*, 2016, Vol.36(2), pp. 25–28.
10. Game Theory and Mechanism Design. Berlin, 2014, pp. 131–148. doi.org/10.1142/9789814525053_0009
11. Peters H. · 2008 Matrix Games Game Theory springer
12. Broom M., Cannings C. and Vickers G. T. Multi-player matrix games, *Bulletin of Mathematical Biology*, 1997, Vol. 59, No. 5, pp. 931–952.
13. Racko Lukas Matrix games with random payoff. Prague 2021, 35 p.

Received 26.02.2023.
Accepted 22.05.2023.

УДК 004.94+519.7

ВИКОРИСТАННЯ ПОВЕДІНКОВОГО АНТАГОНІЗМУ ТА БІМАТРИЧНОЇ ТЕОРІЇ ІГР В УПРАВЛІННІ ІТ-ПРОЕКТАМИ

Чернов С. К. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри управління проектами Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна.

Чернова Лб. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна.

Чернова Лд. С. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем та технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

Кунанець Н. Е. – д-р наук, професор, заступник завідувача кафедри інформаційних систем і мереж Національного університету «Львівська політехніка», м. Львів, Україна.

Тітов С. Д. – доцент кафедри вищої математики Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

Трушляков Е. І. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри кондиціонування та рефрежерації Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв, Україна

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У статті запропоновано методику аналізу пропозицій членів команди з метою уникнення конфліктних ситуацій на етапі формування команди.

Об'єктом дослідження є методику аналізу пропозицій учасників команди при вирішенні завдань проекту.

Мета роботи – Проаналізувати розроблену методику аналізу пропозицій учасників команди щодо уникнення або вирішення конфліктних ситуацій на етапі спрацьовування команди

Метод. Розроблений метод базується на теорії матричних ігор. Конфлікти між окремими членами команди в основному виникають на етапі формування команди. Для керівника проекту важливо вчасно виявити конфліктну ситуацію і знайти з неї вихід, щоб задовольнити обох членів команди і без шкоди для командної роботи в цілому. Команда, створена для реалізації ІТ-проекту, часто стикається з ситуацією, коли двоє її учасників мають різне бачення підходів до створення кінцевого продукту. При цьому кожен з них має великий досвід розробки подібних програмних продуктів або сервісів різними командами. Для ефективного вирішення зазначеної ситуації ми пропонуємо використовувати підходи, характерні для біматричних ігор, коли кожен із цих учасників команди розглядається як гравець. При цьому враховується той факт, що в основі біматричної теорії ігор лежить конфлікт двох гравців, інтереси яких протилежні – антагоністична гра з нульовою сумою якраз і є основою розробленого підходу.

Результати. Запропонована методику аналізу пропозицій учасників команди сприяє уникненню або вирішенню конфліктних ситуацій на етапі їх більш тісної взаємодії. Для ефективного вирішення зазначеної ситуації ми пропонуємо використовувати підходи, характерні для біматричних ігор, коли кожен із цих учасників команди розглядається як гравець. При цьому враховується той факт, що в основі біматричної теорії ігор лежить конфлікт двох гравців, інтереси яких протилежні – антагоністична гра з нульовою сумою є саме таким елементом, який і є основою розробленого підходу.

Висновки. Наведений розрахунок модельного прикладу показує, що використання запропонованого методу дозволяє керівнику проекту надавати обґрунтовану перевагу іншому члену команди, оскільки очікуваний середній виграш цього гравця є більшим, ніж першого гравця. У цьому випадку менеджер має можливість моделювати ситуації для гравців (для команди) і оперативно реагувати на ймовірні відхилення стратегій їх поведінки від оптимальних, налагоджувати здорові стосунки між членами команди і вибирати найкращі пропозиції щодо вирішення завдань проекту.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: біматричні ігри, теорії матричних ігор, управління ІТ проектами, формування команди.

ЛІТЕРАТУРА

1. Mahdi Hosseini S. A model for project team formation in complex engineering projects under uncertainty / S. Mahdi Hosseini, Peyman Akhavan // A knowledge-sharing approach – 2017. – Vol. 46, Issue 7. – P. 1131–1157.
2. Ampuero M. A. Developing a Model and a Tool for the Formation of Project Team/ Margarita André Ampuero // Latin American Women and Research Contributions to the IT Field. – 2021, 23 p.
3. Strnad D. A fuzzy-genetic decision support system for project team formation / D. Strnad, N. Guid // Applied Soft Computing. – 2010. – Vol. 10, Issue 4. – P. 1178–1187.
4. Dotsenko N. Project-oriented management of adaptive teams' formation resources in multi-project environment / Nataliia Dotsenko, Dmytro Chumachenko and Igor Chumachenko // Applied Soft Computing. – 2010. – Vol. 10, Issue 4. – P. 1178–1187.
5. Formation of IT Project Implementation Team / Ruslan Nebesnyi, Volodymyr Pasichnyk, Nataliia Kunanets, Nataliia Veretennikova, Oksana Kunanets // IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT). – Zbarazh, Ukraine. – 2020. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9322005>
6. Harold William Kuhn and Albert William Tucker Linear Inequalities and Related Systems. (AM-38), Volume 38 in the series Annals of Mathematics Studies, 346 p.
7. Using Neuromodels for Evaluating and Determining Productivity Technical / S. Leoshchenko, A. Oliinyk, T. Zaiko et al] // Processes 2020 IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T) 06–09 October 2020 DOI: 10.1109/PICST51311.2020.9468053
8. Subbotin S. A. Methods of sampling based on exhaustive and evolutionary search / S. A. Subbotin // Aut. Control Comp. Sci. – 2013. – Volume 47, pp 113–121. [hdoi.org/10.3103/S0146411613030073](https://doi.org/10.3103/S0146411613030073)
9. Joel Orverem Application of Matrices to the Theory of Games / Joel Orverem, Azuaba Emmanuel // Journal of Nigerian Association of Matematical Physics. – 2016. – Vol. 36(2). – P. 25–28
10. Game Theory and Mechanism Design. – Berlin, 2014. – P. 131–148. doi.org/10.1142/9789814525053_0009
11. Peters H. · 2008 Matrix Games Game Theory springer
12. Broom M. Multi-player matrix games / M. Broom, C. Canning and G. T. Vickers // Bulletin of Mathematical Biology. – 1997. – Vol. 59, No. 5. – P. 931–952.
13. Racko Lukas Matrix games with random payoff / Lukas Racko. – Prague 2021. – 35 p.

APPLICATION OF SPLINE FUNCTIONS AND WALSH FUNCTIONS IN PROBLEMS OF PARAMETRIC IDENTIFICATION OF LINEAR NONSTATIONARY SYSTEMS

Stenin A. A. – Dr. Sc., Professor of Department of Technical cybernetics National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine.

Drozdovych I. G. – PhD, Senior Researcher of the Department of Natural Resources, Institute for Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine.

Soldatova M. O. – PhD, Assistant Professor of Department of Automated Information Processing and Management Systems National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine.

ABSTRACT

Context. In this article, a generalized parametric identification procedure for linear nonstationary systems is proposed, which uses spline functions and orthogonal expansion in a series according to the Walsh function system, which makes it possible to find estimates of the desired parameters by minimizing the integral quadratic criterion of discrepancy based on solving a system of linear algebraic equations for a wide class of linear dynamical systems. The accuracy of parameter estimation is ensured by constructing a spline with a given accuracy and choosing the number of terms of the Walsh series expansion when solving systems of linear algebraic equations by the A. N. Tikhonov regularization method. To improve the accuracy of the assessment, an algorithm for adaptive partitioning of the observation interval is proposed. The partitioning criterion is the weighted square of the discrepancy between the state variables of the control object and the state variables of the model. The choice of the number of terms of the expansion into the Walsh series is carried out on the basis of adaptive approximation of non-stationary parameters in the observation interval, based on the specified accuracy of their estimates. The quality of the management of objects with variable parameters is largely determined by the accuracy of the evaluation of their parameters. Hence, obtaining reliable information about the actual nature of parameter changes is undoubtedly an urgent task.

Objective. Improving the accuracy of parameter estimation of a wide class of linear dynamical systems through the joint use of spline functions and Walsh functions.

Method. A generalized parametric identification procedure for a wide class of linear dynamical systems is proposed. The choice of the number of terms of the expansion into the Walsh series is made on the basis of the proposed algorithm for adaptive partitioning of the observation interval.

Results. The results of modeling of specific linear non-stationary systems confirm the effectiveness of using the proposed approaches to estimating non-stationary parameters.

Conclusions. The joint use of spline functions and Walsh functions makes it possible, based on the proposed generalized parametric identification procedure, to obtain analytically estimated parameters, which is very convenient for subsequent use in the synthesis of optimal controls of real technical objects. This procedure is applicable to a wide class of linear dynamical systems with concentrated and distributed parameters.

KEYWORDS: linear non-stationary systems, spline functions, Walsh functions, operating matrix, Tikhonov regularization method, piecewise constant approximation.

NOMENCLATURE

$\bar{x}(t)$ – state vector;

$\dot{\bar{x}}(t)$ – derivative of state vector;

$\bar{u}(t)$ – control vector;

$A(t)$ – matrix parameters $a_{ij}(t)$;

$B(t)$ – matrix parameters $b_{ik}(t)$;

$\hat{a}_{ij}(t)$ – estimates of unknown parameters $a_{ij}(t)$;

$\hat{b}_{ik}(t)$ – estimates of unknown parameters $b_{ik}(t)$;

$\bar{S}_x(\tau)$ – vector of spline functions of the state vector;

$\bar{S}_u(\tau)$ – vector of spline functions of the vector of

controls;

$\langle \tau_i \rangle$ – discrete grid with increments Δ_N ;

$\bar{\varphi}_R(t)$ – vector of Walsh functions $\varphi_i(t)$;

$P_{(N \times N)}$ – operational integration matrix;

$\bar{g}_l^{(i)}$ – vector of estimates of all unknown parameters;

$Q(\bar{g}_l^{(i)})$ – an integral quadratic discrepancy criterion;

$d \oplus c$ – bitwise addition modulo 2.

INTRODUCTION

It is known that all real control objects are nonlinear and non-stationary to one degree or another. The analysis and synthesis of control systems for such objects is a complex mathematical problem, the solution of which has so far been obtained for some special cases [1–4]. However, most control objects make it possible to accept a non-stationary and linearized system of equations as a mathematical model and apply the developed mathematical apparatus for solving linear non-stationary differential equation systems for such objects remains a difficult task due to the non-stationarity of the parameters. Often this problem is complicated by the

fact that the parameters of dynamic models of control objects are unknown in advance and their preliminary assessment is required. In this regard, the subject area of research in this article is limited to the class of continuous linear non-stationary systems with monotonic and sign-constant parameters that describe a significant number of control objects.

The object of research is the identification of parameters of a wide class of linear dynamical systems and its implementation for systems with non-stationary parameters.

The subject of the research is a generalized algorithm for parametric identification of the parameters of linear dynamic systems, in this case, systems with non-stationary parameters.

The aim of the research is to develop an efficient algorithm for the parametric identification of linear dynamic systems based on the combined use of spline functions and Walsh functions.

1 PROBLEM STATEMENT

The task of parametric identification in this case is as follows. For a model of a linear dynamical system described by a system of differential equations of the form

$$\dot{\bar{x}}(t) = A(t)\bar{x}(t) + B(t)\bar{u}(t), t \in [t_0, T_f], \bar{x}(t_0) = \bar{x}^{(0)}, \quad (1)$$

where $A(t) = \{a_{ij}(t)\}$, $B(t) = \{b_{ik}(t)\}$, – matrices of size $m \times n$ and $n \times m$, respectively, whose elements are sign-constant

$$\text{sign}[a_{ij}(t)] = \text{const}, \text{sign}[b_{ik}(t)] = \text{const}, \quad (2)$$

monotonous

$$\text{sign}[da_{ij}(t)/dt] = \text{const}, \text{sign}[db_{ik}(t)/dt] = \text{const} \quad (3)$$

functions that have continuous first derivatives and bounded domains of definition on a time interval $[t_0, T_f]$, it is necessary to evaluate unknown parameters $a_{ij}(T_f)$, $b_{ik}(T_f)$.

The parameters will be evaluated based on minimizing the square of the discrepancy

$$I = \min \left\{ \int_{t_0}^{t_0+T_f} [\dot{\bar{x}}(t) - A(t)\bar{x}(t) - B(t)\bar{u}(t)]^2 dt \right\}. \quad (4)$$

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Currently, there are many methods for evaluating the parameters of control objects, which can be divided into two large classes: adaptive and non-adaptive [10–12]. When considering linear objects, the mathematical description of which is given in the state space, and the coefficients of differential equations provide complete information about the dynamic properties, estimates of un-

known parameters can be obtained by both adaptive and non-adaptive methods. At the design stage, non-adaptive identification methods are usually used, which, although they require a large amount of calculations, also allow obtaining more accurate values of the estimated parameters over the entire observation interval. To obtain estimates of the variable coefficients of differential equations, various direct methods are used, among which the following methods have become most popular: least squares and its various variants, differential approximation, stochastic approximation, sequential integration, etc. [13–16]. Each of them has its advantages and disadvantages, but all of them are applicable if the assumption of quasi-stationarity of changing the parameters of the control object is accepted. In the case of non-stationarity of the parameters of the control object, orthogonal functions have found great practical application. Traditionally, approximation by finite sums of orthogonal functions has been used to evaluate such dynamic characteristics of objects as a transient function or an impulse transient function [17, 18]. In recent years, many papers have appeared on the use of orthogonal systems of functions for estimating the parameters of a mathematical model given by differential equations, both for stationary linear objects with distributed parameters and for linear non-stationary objects with concentrated parameters, and differing from each other mainly by the choice of one or another system of orthonormal functions. Here the basic approach is as follows: the initial model, represented by ordinary differential equations for concentrated systems or partial differential equations for distributed systems, is transformed into integral equations: all known and unknown functions are decomposed into finite series according to the selected orthogonal functions and then substituted into the transformed model; the so-called operational matrix [19, 20] is introduced to integrate the selected system of functions, which allows further obtaining an identification algorithm in the form of algebraic equations. A great interest in the theory of estimation has also arisen due to a significant change in the possibilities of applying the theory of estimation associated with the enormous capabilities of modern computers. Taking into account the last remark, the use of the apparatus of orthogonal Walsh basis functions is of undoubted interest for identification [20–22]. Firstly, this is due to the fact that Walsh functions take values only ± 1 and represent an apparatus closely related to binary decomposition. And, since the decomposition of variables according to the Walsh function system requires their analytical representation, the paper uses the mathematical apparatus of polynomial approximation in the form of spline functions, in particular, cubic splines [23].

It is obvious that the use of functional (4) in parametric identification problems presupposes the presence of a well-known analytical expression for both the vector of state variables $\bar{x}(t)$ and its derivative $\dot{\bar{x}}(t)$. The known difficulties associated with the definition of these expressions are proposed in this article to overcome using the mathematical apparatus of spline functions [23]. The

question of the possibility of decomposing functions into a series according to the Walsh function system boils down to finding out the possibility of approximating this function by a piecewise constant function.

3 MATERIALS AND METHODS

Since the observation intervals differ in duration, it is advisable to bring them to a normalized interval [0,1]. To do this, it is necessary to introduce a dimensionless time

$$\tau = \frac{t-t_0}{T_f-t_0}, \text{ equal to and leading the control interval to the}$$

normalized interval [0,1].

In addition, to obtain analytical expressions of state variables taken at discrete time points, provided that the state vector is fully measurable and meets conditions (2) and (3), as mentioned earlier, it is advisable to use cubic splines. Considering the above, the following parametric identification procedure based on spline functions and Walsh functions is proposed:

Step 1. On the normalized interval, set a grid with a step $\tau_i > (i=0, N; \tau_N=1)$. Determine the values of the state $\bar{x}(\tau_i)$ and control $\bar{u}(\tau_i)$ vectors.

Step 2. On the selected grid perform interpolation, obtain an analytical expression for evaluating the vector function of the state and control, respectively, in the form of cubic splines $\bar{S}_x(\tau)$ and $\bar{S}_u(\tau)$.

Step 3. For the found functions $\bar{S}_x(\tau)$ and $\bar{S}_u(\tau)$ for n unknown, time-normalized parameters of the system (1), we apply the orthogonal expansion into the Walsh series.

Step 4. Normalize the initial system (1) in time and bring it to an integral form.

Stage 5. Using the properties of Walsh functions, we replace the Walsh functions in the transformed form with a square integration matrix of the form $P_{(NxN)}$ of dimension $N = 2^n$ [20]. The essence of this property is that the integral of the Walsh function remains in the class of the Walsh function system, i.e.

$$\int_0^x \bar{\varphi}_N(x) dx \approx P_{(NxN)} \bar{\varphi}_N(x),$$

where $\bar{\varphi}_N(x) = \{\varphi_0(x), \dots, \varphi_N(x)\}$ – a vector whose components are Walsh functions.

By reducing the left and right sides of the resulting equation by the vector of the selected system of Walsh functions, we obtain a system of algebraic equations.

Step 6. We solve the resulting algebraic system of equations with respect to unknown parameters represented by a set of coefficients of the interval [0,1], recalculating the model parameters found accordingly.

The procedure proposed above for parametric identification of a linear non-stationary system of the form (1) uses spline interpolation and orthogonal decomposition of functions into a Walsh series and allows us to obtain estimates of non-stationary parameters in the form of ap-

proximations by Walsh series. Let us show a practical implementation of this parametric identification procedure for system (1).

The state vector $\bar{x}(t)$ is defined on the interval [0,1] by its values $x^{-i} = \bar{x}(t_i)$ in a finite number of points $t_i \in [t_0, T_f] (i=0, N)$. As before, to obtain an analytical expression for $\bar{x}(t)$ and $\dot{\bar{x}}(t)$, we use cubic spline functions $\bar{S}(t)$, making the transition from $\bar{x}(t_i) (i=0, N)$ to $\bar{S}(t), t \in [t_0, T_f]$.

Functions $u_k(t), S_i(t), \dot{S}_i(t)$ and estimate $\hat{a}_{ij}(t), \hat{b}_{ik}(t) (i, j=1, n), (k=1, m)$ of unknown parameters $a_{ij}(t), b_{ik}(t)$ of matrices $A(t), B(t)$, assuming their integrability on a segment $[t_0, T_f]$, can be approximated by decomposition into a Walsh series of the following form:

$$\begin{aligned} u_k(t) &\approx \sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(k)} \varphi_r(t) = \bar{u}^{(k)T} \bar{\varphi}_R(t), \\ S_i(t) &\approx \sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(i)} \varphi_r(t) = \bar{S}^{(i)T} \bar{\varphi}_R(t), \\ \dot{S}_i(t) &\approx \sum_{r=0}^{R-1} \dot{s}_r^{(i)} \varphi_r(t) = \dot{\bar{S}}^{(i)T} \bar{\varphi}_R(t), \\ \hat{a}_{ij}(t) &\approx \sum_{r=0}^{R-1} a_r^{(ij)} \varphi_r(t) = \bar{a}^{-(ij)T} \bar{\varphi}_R(t), \\ \hat{b}_{ik}(t) &\approx \sum_{r=0}^{R-1} b_r^{(ik)} \varphi_r(t) = \bar{b}^{-(ik)T} \bar{\varphi}_R(t), \end{aligned} \quad (5)$$

where $\bar{\varphi}_R(t) = \{\varphi_0(t), \dots, \varphi_r(t), \dots, \varphi_{R-1}(t)\}$ – R-dimensional vector of Walsh functions.

Here:

$$\begin{aligned} \bar{u}^{-(k)T} &= \{u_0^{(k)}, \dots, u_r^{(k)}, \dots, u_{R-1}^{(k)}\} \\ \bar{S}^{(i)T} &= \{s_0^{(i)}, \dots, s_r^{(i)}, \dots, s_{R-1}^{(i)}\} \\ \dot{\bar{S}}^{(i)T} &= \{\dot{s}_0^{(i)}, \dots, \dot{s}_r^{(i)}, \dots, \dot{s}_{R-1}^{(i)}\} \end{aligned}$$

R-dimensional vectors of constant Fourier coefficients of the Walsh series of functions $u_k(t), S_i(t), \dot{S}_i(t)$, respectively, whose elements are defined as

$$\begin{aligned} u_r^{(k)} &= 1/(T_f - t_0) \int_{t_0}^{T_f} u_k(t) \varphi_r(t) dt, \quad s_r^{(i)} = 1/(T_f - t_0) \int_{t_0}^{T_f} S_i(t) \varphi_r(t) dt, \\ \dot{s}_r^{(i)} &= 1/(T_f - t_0) \int_{t_0}^{T_f} \dot{S}_i(t) \varphi_r(t) dt \quad (r=0, R-1); \end{aligned}$$

$a^{-(ij)T} = \{a_0^{(ij)}, \dots, a_r^{(ij)}, \dots, a_{R-1}^{(ij)}\}$, $b^{-(ik)T} = \{b_0^{(ik)}, \dots, b_r^{(ik)}, \dots, b_{R-1}^{(ik)}\}$ – R-dimensional vectors of unknown constant coefficients of the Walsh series of estimated parameter functions $a_{ij}(t), b_{ik}(t)$.

Then, given the ratio (5), the model of the system (1) will have the form

$$\dot{s}^{(i)T} \bar{\varphi}_R = \sum_{j=1}^n \left[\hat{a}^{-(ij)T} \bar{\varphi}_R \right] \left(\hat{s}^{-(j)T} \bar{\varphi}_R \right) + \sum_{k=1}^m \left[\hat{b}^{-(ik)T} \bar{\varphi}_R \right] \left(\hat{u}^{-(k)T} \bar{\varphi}_R \right) \quad (i = \overline{1, n}). \quad (6)$$

The vector of the desired parameters $\bar{g}^{-(i)} (i = \overline{1, n})$ equations (6) can be written as a vector of estimates of the constant coefficients of the Walsh series

$$\bar{g}^{-(i)T} = \left\{ \hat{a}_0^{(i1)}, \dots, \hat{a}_{R-1}^{(i1)}, \dots, \hat{a}_0^{(ij)}, \dots, \hat{a}_{R-1}^{(ij)}, \dots, \hat{a}_0^{(in)}, \dots, \hat{a}_{R-1}^{(in)}, \hat{b}_0^{(i1)}, \dots, \hat{b}_{R-1}^{(i1)}, \dots, \hat{b}_0^{(ik)}, \dots, \hat{b}_{R-1}^{(ik)}, \dots, \hat{b}_0^{(im)}, \dots, \hat{b}_{R-1}^{(im)} \right\} \quad (7)$$

and the integral quadratic discrepancy criterion of the form (4) of the model (6), taking into account (7), is represented as

$$Q_d(\bar{g}^{-(i)}) = \int_{t_0}^{T_f} \left[\hat{s}^{(i)T} \bar{\varphi}_R - \sum_{j=1}^n \left(\hat{a}^{-(ij)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{s}^{-(j)T} \bar{\varphi}_R \right) - \sum_{k=1}^m \left(\hat{b}^{-(ik)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{u}^{-(k)T} \bar{\varphi}_R \right) \right]^2 dt \quad (i = \overline{1, n}). \quad (8)$$

The number of identifiable model parameters (6) is equal to $n \times (n + m) \times R$.

It is obvious that the task of parametric identification is to find estimates $\bar{g}^{-(i)} (i = \overline{1, n})$ that provide a minimum of the functional (8). Using the necessary conditions for the minimum of criterion (8) for the desired parameters

$$\begin{aligned} \frac{\partial Q_d(\bar{g}^{-(i)})}{\partial \hat{a}_p^{(iz)}} &= 0, \\ \frac{\partial Q_d(\bar{g}^{-(i)})}{\partial \hat{b}_p^{(it)}} &= 0, \end{aligned} \quad (z = \overline{1, n}, t = \overline{1, m}, p = \overline{0, R-1}, i = \overline{1, n})$$

we obtain a system of equations

$$\begin{aligned} \int_{t_0}^{T_f} \left[\hat{s}^{(i)T} \bar{\varphi}_R - \sum_{j=1}^n \left(\hat{a}^{-(ij)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{s}^{-(j)T} \bar{\varphi}_R \right) - \sum_{k=1}^m \left(\hat{b}^{-(ik)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{u}^{-(k)T} \bar{\varphi}_R \right) \right] \times \left[-\varphi_p \left(\hat{s}^{-(z)T} \bar{\varphi}_R \right) \right] dt &= 0; \\ \int_{t_0}^{T_f} \left[\hat{s}^{(i)T} \bar{\varphi}_R - \sum_{j=1}^n \left(\hat{a}^{-(ij)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{s}^{-(j)T} \bar{\varphi}_R \right) - \sum_{k=1}^m \left(\hat{b}^{-(ik)T} \bar{\varphi}_R \right) \left(\hat{u}^{-(k)T} \bar{\varphi}_R \right) \right] \times \left[-\varphi_p \left(\hat{s}^{-(i)T} \bar{\varphi}_R \right) \right] dt &= 0, \end{aligned}$$

which we will write in a form convenient for the following transformations, namely:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{a}_r^{(ij)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(i)} \varphi_r \right) \right] dt + \\ & + \sum_{k=1}^m \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{b}_r^{(ik)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(k)} \varphi_r \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(z)} \varphi_r \right) \right] dt = \\ & = \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{s}_r^{(i)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(z)} \varphi_r \right) \right] dt \quad (z = \overline{1, n}, p = \overline{0, R-1}); \\ & \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{a}_r^{(ij)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(z)} \varphi_r \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(i)} \varphi_r \right) \right] dt + \\ & + \sum_{k=1}^m \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{b}_r^{(ik)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(k)} \varphi_r \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(i)} \varphi_r \right) \right] dt = \\ & = \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{s}_r^{(i)} \varphi_r \right) \left(\varphi_p \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(i)} \varphi_r \right) \right] dt \quad (t = \overline{1, m}, p = \overline{0, R-1}, i = \overline{1, n}). \end{aligned} \quad (9)$$

Taking into account the multiplicativity property of the Walsh function system, after a series of transformations, we obtain at a given interval, equations (9) in the form

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{a}_r^{(ij)} \varphi_{r \oplus p} \right) \left(\sum_{r_1=0}^{R-1} f_{r_1}^{(jz)} \varphi_{r_1} \right) \right] dt + \sum_{k=1}^m \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{b}_r^{(ik)} \varphi_{r \oplus p} \right) \right] \times \\ & \times \sum_{r_1=0}^{R-1} h_{r_1}^{(kz)} \varphi_{r_1} \left] dt = \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r \varphi_{r \oplus p} \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r^{(z)} \varphi_r \right) \right] dt \quad (z = \overline{1, n}, p = \overline{0, R-1}); \\ & \sum_{j=1}^n \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{a}_r^{(ij)} \varphi_{r \oplus p} \right) \left(\sum_{r_1=0}^{R-1} w_{r_1}^{(jt)} \varphi_{r_1} \right) \right] dt + \sum_{k=1}^m \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} \hat{b}_r^{(ik)} \varphi_{r \oplus p} \right) \right] \times \\ & \times \sum_{r_1=0}^{R-1} v_{r_1}^{(kt)} \varphi_{r_1} \left] dt = \int_{t_0}^{T_f} \left[\left(\sum_{r=0}^{R-1} s_r \varphi_{r \oplus p} \right) \left(\sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(i)} \varphi_r \right) \right] dt \quad (t = \overline{1, m}, p = \overline{0, R-1}, i = \overline{1, n}), \end{aligned}$$

where $d \oplus c$ – bitwise addition modulo 2;

$$\begin{aligned} \bar{f}^{-(jz)T} &= \{f_0^{(jz)}, \dots, f_{r_1}^{(jz)}, \dots, f_{R-1}^{(jz)}\}, \bar{h}^{-(kz)T} = \{h_0^{(kz)}, \dots, h_{r_1}^{(kz)}, \dots, h_{R-1}^{(kz)}\}, \\ \bar{w}^{-(jt)T} &= \{w_0^{(jt)}, \dots, w_{r_1}^{(jt)}, \dots, w_{R-1}^{(jt)}\}, \bar{v}^{-(kt)T} = \{v_0^{(kt)}, \dots, v_{r_1}^{(kt)}, \dots, v_{R-1}^{(kt)}\} - \end{aligned}$$

R-dimensional vectors whose elements are composed of the sum of products of known Fourier coefficients $S_r^{(j)}$ and $S_r^{(z)}$, $u_r^{(k)}$ and $S_r^{(z)}, S_r^{(j)}$ and $u_r^{(t)}, u_r^{(k)}$ and $u_r^{(i)}$ ($r = \overline{0, R-1}$) of the orthogonal expansion into the Walsh series of splines and control functions $S_j(t)$ and $S_z(t)$, $u_k(t)$ and $S_z(t)$, $S_j(t)$ and $u_t(t)$, $u_k(t)$ and $u_t(t)$, respectively, determined from the following relations:

$$f_{r_1}^{(jz)} = \sum_{r=0}^{R-1} S_r^{(j)} S_{r \oplus r_1}^{(z)}, \quad (10)$$

$$h_{r_1}^{(kz)} = \sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(k)} S_{r \oplus r_1}^{(z)}, \quad (11)$$

$$w_{r_1}^{(jt)} = \sum_{r=0}^{R-1} S_r^{(j)} u_{r \oplus r_1}^{(t)}, \quad (12)$$

$$v_{r_1}^{(kt)} = \sum_{r=0}^{R-1} u_r^{(k)} u_{r \oplus r_1}^{(t)}, (r_1 = \overline{0, R-1}). \quad (13)$$

or

$$\begin{aligned} & \sum_j (\sum_r (\sum_{r_1} (\hat{a}_r^{(ij)} f_{r_1}^{(jz)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt))) + \\ & + \sum_k (\sum_r (\sum_{r_1} (\hat{b}_r^{(ik)} h_{r_1}^{(kz)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt))) = \\ & = \sum_r (\sum_{r_1} (s_r \cdot s_{r_1}^{(z)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt)) (z = \overline{1, n}), (p = \overline{0, R-1}); \\ & \sum_j (\sum_r (\sum_{r_1} (\hat{a}_r^{(ij)} w_{r_1}^{(jt)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt))) + \\ & + \sum_k (\sum_r (\sum_{r_1} (\hat{b}_r^{(ik)} v_{r_1}^{(kt)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt))) = \\ & = \sum_r (\sum_{r_1} (s_r \cdot u_{r_1}^{(t)} \int_{t_0}^{T_f} \varphi_{r \oplus p} \varphi_{r_1} dt)) (t = \overline{1, m}), (p = \overline{0, R-1}), (i = \overline{1, n}). \end{aligned}$$

Due to the orthogonality property of the system of Walsh functions on a given interval, the latter system of equations is transformed into $(n+m) \times R$ a system of linear algebraic equations to obtain an estimate of the vector of parameters $\hat{g}^{(i)}$ ($i = \overline{1, n}$) (7) of the form

$$\begin{aligned} & \sum_j (\sum_r (\hat{a}_r^{(ij)} f_{r \oplus p}^{(jz)}) + \sum_k (\sum_r (\hat{b}_r^{(ik)} h_{r \oplus p}^{(kz)})) = \\ & = \sum_r s_r \cdot s_{r \oplus p}^{(z)} (z = \overline{1, n}), (p = \overline{0, R-1}); \\ & \sum_j (\sum_r (\hat{a}_r^{(ij)} w_{r \oplus p}^{(jt)}) + \sum_k (\sum_r (\hat{b}_r^{(ik)} v_{r \oplus p}^{(kt)})) = \\ & = \sum_r s_r \cdot u_{r \oplus p}^{(t)} (t = \overline{1, m}), (p = \overline{0, R-1}). \end{aligned} \quad (14)$$

Equations (14) can be written as

$$C^{(i)} \hat{g}^{(i)} = \bar{d}^{(i)}. \quad (15)$$

Here $C^{(i)}$ is a size $(n+m)R \times (n+m)R$ matrix having a block structure

$$C^{(i)} = \begin{bmatrix} F_{nR \times nR}^{(i)} & \vdots & H_{nR \times mR}^{(i)} \\ \dots & \dots & \dots \\ W_{mR \times nR}^{(i)} & \vdots & V_{mR \times mR}^{(i)} \end{bmatrix},$$

the elements of which are defined as follows:

$$F^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{f}_0^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{f}_{R-1}^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{f}_0^{(z)} \\ \vdots \\ \bar{f}_{R-1}^{(z)} \\ \vdots \\ \bar{f}_0^{(n)} \\ \vdots \\ \bar{f}_{R-1}^{(n)} \end{bmatrix}, H^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{h}_0^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{h}_{R-1}^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{h}_0^{(z)} \\ \vdots \\ \bar{h}_{R-1}^{(z)} \\ \vdots \\ \bar{h}_0^{(n)} \\ \vdots \\ \bar{h}_{R-1}^{(n)} \end{bmatrix}, W^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{w}_0^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{w}_{R-1}^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{w}_0^{(t)} \\ \vdots \\ \bar{w}_{R-1}^{(t)} \\ \vdots \\ \bar{w}_0^{(m)} \\ \vdots \\ \bar{w}_{R-1}^{(m)} \end{bmatrix}, V^{(i)} = \begin{bmatrix} \bar{v}_0^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{v}_{R-1}^{(1)} \\ \vdots \\ \bar{v}_0^{(t)} \\ \vdots \\ \bar{v}_{R-1}^{(t)} \\ \vdots \\ \bar{v}_0^{(m)} \\ \vdots \\ \bar{v}_{R-1}^{(m)} \end{bmatrix}$$

where

– $\bar{f}_p^{(z)} = \{f_{r \oplus p}^{(iz)}\} (j = \overline{1, n}), (r = \overline{0, R-1}) - 1 \times nR$ – dimensional vector whose elements are determined from the relations (10);

– $\bar{h}_p^{(z)} = \{h_{r \oplus p}^{(kz)}\} (k = \overline{1, n}), (r = \overline{0, R-1}) - 1 \times nR$ – dimensional vector whose elements are determined from the relations (11);

– $\bar{w}_p^{(z)} = \{w_{r \oplus p}^{(it)}\} (j = \overline{1, n}), (r = \overline{0, R-1}) - 1 \times nR$ – dimensional vector whose elements are determined from the relations (12);

– $\bar{v}_p^{(t)} = \{v_{r \oplus p}^{(kt)}\} (k = \overline{1, m}), (r = \overline{0, R-1}) - 1 \times mR$ – dimensional vector whose elements are determined from the relations (13);

$$\bar{d}^{(i)T} = \{q_0^{(i1)}, \dots, q_{R-1}^{(i1)}, \dots, q_0^{(iz)}, \dots, q_p^{(iz)}, \dots, q_{R-1}^{(iz)}, \dots, q_0^{(in)}, \dots, q_{R-1}^{(in)}\}$$

$$e_0^{(i1)}, \dots, e_{R-1}^{(i1)}, \dots, e_0^{(it)}, \dots, e_p^{(it)}, \dots, e_{R-1}^{(it)}, \dots, e_{R-1}^{(im)}\} -$$

– $\bar{d}^{(i)T} = \{d_1^{(i)}, \dots, d_n^{(i)}, d_{n+1}^{(i)}, \dots, d_{n+m}^{(i)}\} - (n+m)R$ – dimensional vector of free terms of equation (15), whose elements are determined from the relations

$$q_p^{(iz)} = \sum_{r=0}^{R-1} s_r \cdot s_{r \oplus p}^{(z)} (p = \overline{0, R-1}), (z = \overline{1, n}), \quad (16)$$

$$q_p^{(it)} = \sum_{r=0}^{R-1} s_r \cdot u_{r \oplus p}^{(t)} (p = \overline{0, R-1}), (t = \overline{1, m}) \quad (17)$$

To ensure the required accuracy of parameter estimation, it is necessary to solve the problem of optimal choice of the number of terms of the Walsh series expansion. To solve this problem, an algorithm for adaptive partitioning of the observation interval based on piecewise constant approximation is proposed below.

Thus, the desired unknown coefficients of equation (15) are determined from relations (10)–(14), (16), (17).

The algorithm is constructed as follows:

Step 1. We accept $l=1$. An estimate $\bar{g}_l^{(-i)}$ is obtained in the interval $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)H}]$, where $t_{l+1}^{(i)H} = t_l^{(i)} + \delta_l, \delta_l > 0$ according to the generalized parametric identification algorithm given above.

Step 2. In the interval $[t_{l+1}^{(i)H}, t_{l+1}^{(i)'}]$, where $t_{l+1}^{(i)'} = t_{l+1}^{(i)H} + \eta_0 \delta_l$, according to the equations of state of the model (1) with estimates $\bar{g}_l^{(-i)}$, the state of the model $x_i^M(t)$ is calculated, while we assume $x_i^M(t_{l+1}^{(i)H}) = x_i(t_{l+1}^{(i)H})$.

Step 3. In the neighborhood $[t_{l+1}^{(i)'} - \delta', t_{l+1}^{(i)'}]$ ($\delta' < t_{l+1}^{(i)'} - t_{l+1}^{(i)H}$) of the interval $[t_{l+1}^{(i)H}, t_{l+1}^{(i)'}]$, the functional $I = 1/P \sum_{p=1}^P (x_i(t_p) - x_i^M(t_p))^2$ is considered.

If $I > \varepsilon$ then the parameter η_0 is reduced, the parameter $\eta_1 = \mu \eta_0$ ($0 < \mu < 1, \mu = const$) is entered and the transition to step 2 occurs. If after m steps $\eta_m = \mu^m \eta_0 \approx 0$, then the transition to step 4.

Otherwise, when $I \leq \varepsilon$, the interval $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)'}]$ is formed, where the estimate $\bar{g}_l^{(-i)} [t_{l+1}^{(i)H}, t_{l+1}^{(i)'}]$ is taken and the transition to step 2. Otherwise, go to step 4.

Step 4. In the interval $[t_l^{(i)}, t_{l+1}^{(i)}]$ the estimate $\bar{g}_l^{(-i)} (i = \overline{1, n})$ is taken.

Step 5. We assume $l = l + 1$ and make the transition to step 1. The algorithm provides for viewing the entire observation interval.

The algorithm continues until the entire observation interval has been viewed. The smallest segment of the piecewise constant approximation determines the number of terms in the expansion in the Walsh series for a given accuracy ε . The block diagram of the adaptive algorithm for sampling the observation interval is shown in Fig. 1.

The smallest segment of the piecewise constant approximation determines the number of terms in the expansion in the Walsh series for a given accuracy ε .

As noted earlier, the system of equations (15) is a system with approximately given initial data, the error of which depends on the error of approximation of the state of the system (1) by splines, the choice of the number of terms of the expansion of functions into a Walsh series, computational errors. To solve the system (15), the regularization method of A. N. Tikhonov is used [24–26]. Thus, the algorithm for estimating the parameters of a linear non-stationary system (1) is reduced to solving n systems of linear algebraic equations of the form (15).

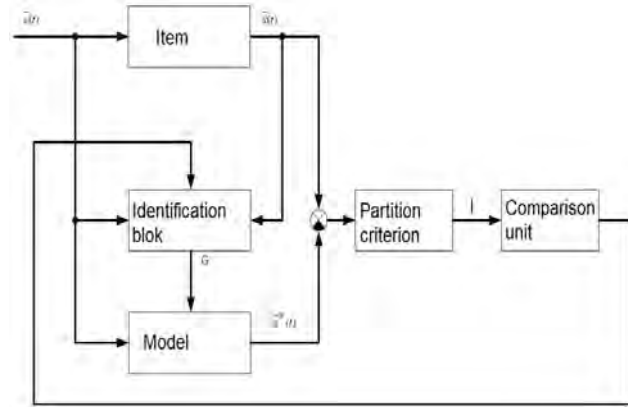


Figure 1 – Block-diagram of the algorithm for adaptive partitioning of the observation interval

4 EXPERIMENTS

As an example of the practical implementation of a generalized parametric identification algorithm, consider the problem of parametric identification of a non-stationary object of the second order

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= a_{12}(t)x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= b_2(t)u(t), t \in [0, 1], \\ x_1(0) &= 5, x_2(0) = 3, u(t) = -1. \end{aligned}$$

The exact values of the estimated parameters are described by the following functions:

$$a_{12}(t) = \exp(-0,5t), b_2(t) = 1,5 \exp(-0,3t).$$

As an example of the practical implementation of the algorithm for adaptive partitioning of the observation interval, consider the problem of identifying a non-stationary object of the second order

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= a_{12}(t)x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= b_2(t)u(t), t \in [0, 100]. \end{aligned}$$

We accept the following values of variable $x_1(0) = 30, x_2(0) = 50, b_2(t) = 1, u(t) = -1$.

The exact value of the estimated parameter $a_{12}(t) = 0,000012t^3 - 0,0014t^2 + 0,033t + 2$.

The parameters of the time interval partitioning algorithms were set as follows:

$$L = 10; P = 5; \delta' = 1; \delta_l = 1 \text{ for all } l; \eta_0 = 10; \varepsilon = 0,2; \mu = 0,5.$$

5 RESULTS

The results of parameter estimation $a_{12}(t), b_2(t)$ are shown in Fig. 2 and Fig. 3, respectively, where the following designations are accepted: solid curve – exact value $a_{12}(t), b_2(t)$, respectively; black dots indicate the values of the estimates $\hat{a}_{12}(t), \hat{b}_2(t)$, respectively, using 8 Walsh functions; white – 4 Walsh functions.

The estimation results for fixed and adaptive partitioning of the observation interval are shown in Fig. 4, where curve 1 is the exact value of $a_{12}(t)$; curve 2 is the estimate $\hat{a}_{12}(t)$ for a fixed partition; curve 3 is the estimate $\hat{a}_{12}(t)$ for adaptive partitioning. The parameter estimation accuracy is characterized by the value

$$\delta^2 = \frac{\sum_{m=0}^M [\delta \hat{a}_{12}(t_m)]^2}{\sum_{m=0}^M [a_{12}(t_m)]^2}.$$

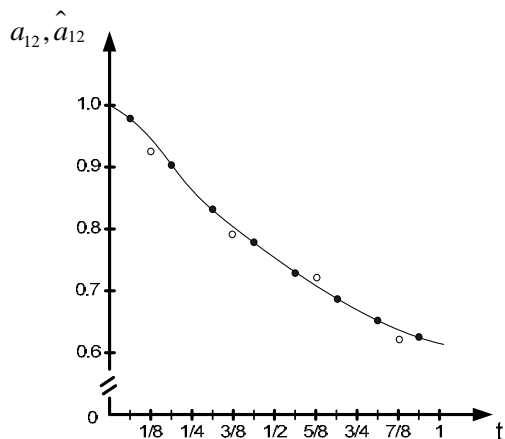


Figure 2 – Parameter Estimation $a_{12}(t)$

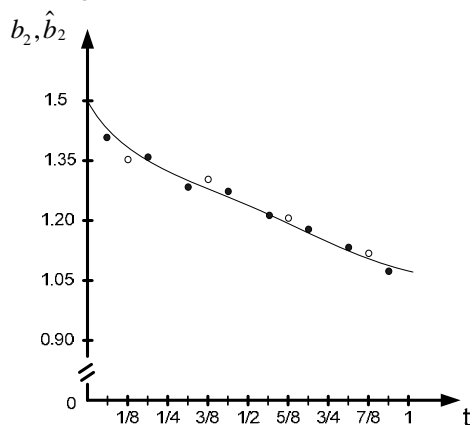


Figure 3 – Parameter Estimation $b_2(t)$

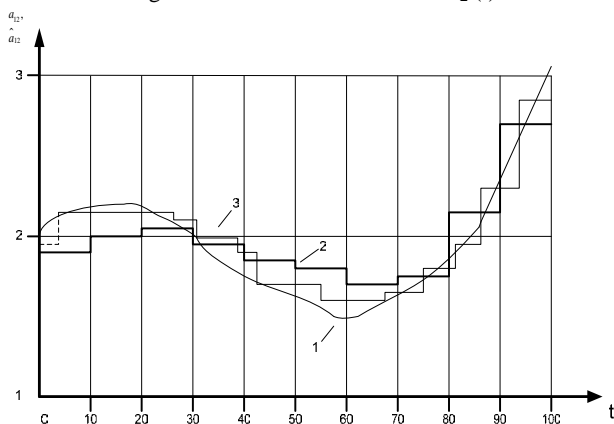


Figure 4 – Plots of piecewise constant approximation

6 DISCUSSION

From the above graphs Fig. 2 and Fig. 3, it follows that with an increase in the number of Walsh functions, the accuracy of parameter estimation increases, to ensure which the required number of expansions in a Walsh series which is determined based on the algorithm for adaptive partitioning of the observation interval.

Comparison of the estimates obtained with a fixed and adaptive partitioning (Fig.4) of the time interval for the considered example allows us to conclude that the accuracy of the parameter estimate can be significantly improved when using an algorithm with an adaptive choice of the interval by choosing the number of expansion terms in the Walsh series, based on the smallest segment of the piecewise constant approximation of a non-stationary parameter. Determination of non-stationary parameters of linear dynamic systems in analytical form in the form of Walsh series allows solving problems of analysis and synthesis of optimal control systems [27]. When optimizing systems with a priori unknown non-stationary parameters, it is advisable to use this adaptive algorithm for partitioning the observation interval in combination with the well-known method MPC (model predictive control).

7 CONCLUSION

A generalized procedure for determining a wide class of linear systems is proposed. Exact estimation of the parameters controlled by the collection of a spline with a given frequency and the choice of the number of expansion terms in the Walsh series, when referring to the system linear algebraic regularity rules A. N. Tikhonov. In connection with the need for a regularity in the division of the observation interval. The splitting criterion is the weighted square of the residual between object control state variables and model state variables. The choice of the number of expansion terms in the Walsh series was carried out on the basis of a responsible approximation of non-stationary parameters in the observation interval, based on the given value of their estimates. The results of modeling models of linear non-stationary systems for the efficiency of using the proposed approaches to estimating non-stationary parameters are presented. The joint use of spline functions and Walsh functions allows, on the basis of the proposed generalized procedure, to obtain the parameter of determining the estimated parameters in an analytical form, which is very convenient for use in the synthesis of optimal controls for real technical objects. This procedure is applicable to the distributed class of linear distributions of systems with lumped and distributed parameters. For systems with distributed parameters, spline interpolation is carried out by a two-dimensional spline and, accordingly, a double Walsh series is used for orthogonal decomposition of the population and unknown functions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out at the Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine within the frame-

work of the state budget research project “Intelligent information systems and technologies for innovative development of the city” (state registration number: 0121U112237). The authors express their deep gratitude to the Director of the Institute, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Ukraine Oleksandr Trofymchuk for valuable and constructive advice and comments while working on this work.

REFERENCES

1. Luo Y., Gupta V., Kolar M. Dynamic Regret Minimization for Control of Non-stationary Linear Dynamical Systems, *Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems*, 2022, Vol. 6, Issue 1, pp. 1–72. [Online] Available: <https://doi.org/10.1145/3508029>.
2. Dymkou S., Dymkov M., Rogers E. Optimal Control of Non-stationary Differential Linear Repetitive Processes, *Integral Equations and Operator Theory*, 2008, Vol. 60, pp. 201–216.
3. Molinari B. P. The time-invariant linear-quadratic optimal control problem, *Automatica*, 1977, Vol. 13, Issue 4, pp. 347–357. [Online] Available: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(77\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0005-1098(77)90017-6)
4. Athans M., Falb P. L. Optimal control: an introduction to the theory and its applications. Courier Corporation, 2013, 696 p.
5. Kvitko A., Firulina O., Eremin A. Solving Boundary Value Problem for a Nonlinear Stationary Controllable System with Synthesizing Control [Electronic resource], *Mathematical Problems in Engineering*. [Online]. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2017/8529760>.
6. Groetsch Ch., Scherzer O. Non-stationary iterated Tikhonov – Morozov method and third-order differential equations for the evaluation of unbounded operators, *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, 2000, Vol. 23(15), pp. 1287–1300. DOI: 10.1002/1099-1476(200010)23:15<1287: AID-MMA165>3.0.CO;2-N.
7. Nagahara M. Dynamical Systems and Optimal Control [Electronic resource]. Japan, 2020. Access mode: <https://doi.org/10.1561/9781680837254.ch7>.
8. Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters, *IEEE Trans. Automatic Control*, 2003, Vol. 48, No. 11, pp. 1908–1925.
9. Sun Zhendong, Ge S. S. Analysis and synthesis of switched linear control systems, *Automatica*, 2005, Vol. 41, pp. 181–195. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.09.015>.
10. Ke H., Li W. Adaptive control using multiple models without switching, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, Vol. 53(2), pp. 229–235.
11. Cai T. T., Zhang L., Zhou H. H. Adaptive Functional Linear Regression Via Functional Principal Component Analysis And Block Thresholding, *Statistica Sinica*, 2018, Vol. 28, pp. 2455–2468. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202017.0099>.
12. Efromovich S. Optimal nonparametric estimation of the density of regression errors with finite support, *AISM*, 2007, Vol. 59, pp. 617–654. DOI: 10.1007/s10463-006-0067-3.
13. Zhang Y., Fidan B., Ioannou P. A. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters, *IEEE Trans. Automatic Control*, 2003, Vol. 48, No. 11, pp. 1908–1925. DOI: 10.1109/TAC.2003.819074.
14. Janczak D., Grishin Y. State estimation of linear dynamic system with unknown input and uncertain observation using dynamic programming, *Control and Cybernetics*, 2006, Vol. 35(4), pp. 851–862.
15. Ramsay J. O., Hooker G., Campbell D., Cao J. Functional Data Analysis with R and MATLAB, *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*, 2007, Vol. 69, No. 5, pp. 741–796.
16. Nieman R., Fisher D., Seborg T. A review of process identification and parameter estimation techniques, *International Journal of Control*, 1971, Vol. 13, Issue 2, pp. 209–264. DOI: 10.1080/00207177108931940.
17. Xu K. Two updated methods for impulse response function estimation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1993, Vol. 7, Issue 5, pp. 451–460. DOI: 10.1006/mssp.1993.102.
18. Blazhievska I., Zaiats V. Estimation of impulse response functions in two-output systems, *Communication in Statistics – Theory and Methods*, 2018, Vol. 49, No. 2, pp. 257–280. DOI: 10.1080/03610926.2018.1536210.
19. Sparis P. D., Mouroutsos S. G. The operational matrix of differentiation for orthogonal polynomial series, *International Journal of Control*, 1986, Vol. 44, No. 1, pp. 1–15. DOI: 10.1080/00207178608933579.
20. Sparis P. D., Mouroutsos S. G. A comparative study of the operational matrices of integration and differentiation for orthogonal polynomial series, *International Journal of Control*, 1985, Vol. 42, No. 3, pp. 621–638. DOI: 10.1080/002071785
21. Stoffer D. S. Walsh-Fourier Analysis and Its Statistical Applications, *Journal of the American Statistical Association*, 1991, Vol. 86, No. 4, pp. 461–479. DOI: <https://doi.org/10.2307/2290595>.
22. Deb A., Sen S., Datta A. K. Walsh Functions and their Applications: A Review, *IETE Technical Review*, 2015, Vol. 9, No. 3, pp. 238–252. DOI: 10.1080/02564602.1992.11438882.
23. Al-Said E. A. The use of cubic splines in the numerical solution of a system of second-order boundary value problems, *Computers & Mathematics with Applications*, 2001, Vol. 42, No. 6–7, pp. 861–869. DOI: 10.1016/S0898-1221(01)00204-8.
24. Fuhry M., Reichel L. A new Tikhonov regularization method, *Numerical Algorithms*, 2012, Vol. 59, No. 3, pp. 433–445. DOI: 10.1007/s11075-011-9498-x.
25. Yang X.-J., Wang L. A modified Tikhonov regularization method, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2015, Vol. 288, pp. 180–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.011>.
26. Postnov V. A. Use of Tikhonov’s regularization method for solving identification problem for elastic systems, *Mechanics of Solids*, 2010, Vol. 45, Issue 1, pp. 51–56. DOI: 10.3103/S0025654410010085Received 00.00.2000.

Received 12.04.2023.

Accepted 25.05.2023.

ЗАСТОСУВАННЯ СПЛАЙН-ФУНКЦІЙ ТА ФУНКЦІЙ УОЛША В ЗАДАЧАХ ПАРАМЕТРИЧНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЛІНІЙНИХ НЕСТАЦІОНАРНИХ СИСТЕМ

Стенін О. А. – професор кафедри технічної кібернетики НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Дроздович І. Г. – старший науковий співробітник відділу природних ресурсів Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна.

Солдатова М. О. – доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації та управління НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У статті запропоновано узагальнену процедуру параметричної ідентифікації лінійних нестационарних систем, яка використовує сплайн-функції та ортогональне розкладання в ряд за системою функцій Уолша, що дозволяє знаходити оцінки шуканих параметрів шляхом мінімізації інтегрального квадратичного критерію незбіжності на основі розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь для широкого класу лінійних динамічних систем. Точність оцінювання параметрів забезпечується побудовою сплайна із заданою точністю та вибором кількості членів розкладу в ряд Уолша при розв'язанні систем лінійних алгебраїчних рівнянь методом регуляризації А. Н. Тихонова. Для підвищення точності оцінки запропоновано алгоритм адаптивного розбиття інтервалу спостереження. Критерієм розбиття є зважений квадрат розбіжності між змінними стану об'єкта керування та змінними стану моделі. Вибір кількості членів розкладу в ряд Уолша здійснюється на основі адаптивної апроксимації нестационарних параметрів на інтервалі спостереження, виходячи із заданої точності їх оцінок. Якість управління об'єктами зі змінними параметрами значною мірою визначається точністю оцінювання їх параметрів. Тому отримання достовірної інформації про дійсний характер зміни параметрів є, безперечно, актуальною задачею.

Мета. Підвищення точності оцінювання параметрів широкого класу лінійних динамічних систем шляхом спільного використання сплайн-функцій та функцій Уолша.

Метод. Запропоновано узагальнену процедуру параметричної ідентифікації широкого класу лінійних динамічних систем. Вибір кількості членів розкладу в ряд Уолша здійснюється на основі запропонованого алгоритму адаптивного розбиття інтервалу спостереження.

Результати. Результати моделювання конкретних лінійних нестационарних систем підтверджують ефективність використання запропонованих підходів до оцінювання нестационарних параметрів.

Висновки. Спільне використання сплайн-функцій та функцій Уолша дозволяє на основі запропонованої узагальненої процедури параметричної ідентифікації отримати оцінку параметрів в аналітичному вигляді, що є дуже зручним для подальшого використання при синтезі оптимальних систем управління реальними об'єктами. Дана процедура застосовна до широкого класу лінійних динамічних систем з зосередженими та розподіленими параметрами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: лінійні нестационарні системи, сплайн-функції, функції Уолша, операційна матриця, метод регуляризації Тихонова, кусково-стала апроксимація.

ЛІТЕРАТУРА

1. Luo Y. Dynamic Regret Minimization for Control of Non-stationary Linear Dynamical Systems / Y. Luo, V. Gupta, M. Kolar // Proceedings of the ACM on Measurement and Analysis of Computing Systems. – 2022. – Vol. 6, Issue 1. – P. 1–72. [Online] Available: <https://doi.org/10.1145/3508029>.
2. Dymkou S. Optimal Control of Non-stationary Differential Linear Repetitive Processes / S. Dymkou, M. Dymkov, E. Rogers // Integral Equations and Operator Theory. – 2008. – Vol. 60. – P. 201–216.
3. Molinari B. P. The time-invariant linear-quadratic optimal control problem / B. P. Molinari // Automatica. – 1977. – Vol. 13, Issue 4. – P. 347–357. [Online] Available: [https://doi.org/10.1016/0005-1098\(77\)90017-6](https://doi.org/10.1016/0005-1098(77)90017-6)
4. Athans M. Optimal control: an introduction to the theory and its applications / M. Athans, P. L. Falb. – Courier Corporation, 2013. – 696 p.
5. Kvitko A. Solving Boundary Value Problem for a Nonlinear Stationary Controllable System with Synthesizing Control [Electronic resource] / A. Kvitko, O. Firulina, A. Eremin // Mathematical Problems in Engineering. – [Online]. Access mode: <https://doi.org/10.1155/2017/8529760>.
6. Groetsc Ch. Non-stationary iterated Tikhonov – Morozov method and third-order differential equations for the evaluation of unbounded operators / Ch. Groetsc, O. Scherzer // Mathematical Methods in the Applied Sciences. – 2000. – Vol. 23(15) – P. 1287–1300. DOI: 10.1002/1099-1476(200010)23:15<1287::AID-MMA165>3.0.CO;2-N.
7. Nagahara M. Dynamical Systems and Optimal Control [Electronic resource] / M. Nagahara. – Japan, 2020. – Access mode: <https://doi.org/10.1561/9781680837254.ch7>.
8. Zhang Y. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters / Y. Zhang, B. Fidan, P. Ioannou // IEEE Trans. Automatic Control. – 2003. – Vol. 48, No. 11. – P. 1908–1925.
9. Sun Zhendong. Analysis and synthesis of switched linear control systems / Zhendong Sun, S. S. Ge // Automatica. – 2005. – Vol. 41. – P. 181–195. [Online] Available: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2004.09.015>.
10. Ke H. Adaptive control using multiple models without switching / H. Ke, W. Li // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 53(2). – P. 229–235.
11. Cai T. T. Adaptive Functional Linear Regression Via Functional Principal Component Analysis And Block Thresholding / T. T. Cai, L. Zhang, H. H. Zhou // Statistica Sinica. – 2018. – Vol. 28. – P. 2455–2468. DOI: <https://doi.org/10.5705/ss.202017.0099>.
12. Efromovich S. Optimal nonparametric estimation of the density of regression errors with finite support / S. Efro-

- movich // AISM. – 2007. – Vol. 59. – P. 617–654. DOI: 10.1007/s10463-006-0067-3.
13. Zhang Y. Backstepping control of linear time-varying systems with known and unknown parameters / Y. Zhang, B. Fidan, P. A. Ioannou // *IEEE Trans. Automatic Control*. – 2003. – Vol. 48, No. 11. – P. 1908–1925. DOI: 10.1109/TAC.2003.819074.
14. Janczak D. State estimation of linear dynamic system with unknown input and uncertain observation using dynamic programming / D. Janczak, Y. Grishin // *Control and Cybernetics*. – 2006. – Vol. 35(4). – P. 851–862.
15. Functional Data Analysis with R and MATLAB / [J. O. Ramsay, G. Hooker, D. Campbell, J. Cao] // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Statistical Methodology)*. – 2007. – Vol. 69, No. 5. – P. 741–796.
16. Nieman R. A review of process identification and parameter estimation techniques / R. Nieman, D. Fisher, T. Seborg // *International Journal of Control*. – 1971. – Vol. 13, Issue 2. – P. 209–264. DOI: 10.1080/00207177108931940.
17. Xu K. Two updated methods for impulse response function estimation / K. Xu // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 1993. – Vol. 7, Issue 5. – P. 451–460. DOI: 10.1006/mssp.1993.102.
18. Blazhievskaya I. Estimation of impulse response functions in two-output systems / I. Blazhievskaya, V. Zaiats // *Communication in Statistics – Theory and Methods*. – 2018. – Vol. 49, No. 2. – P. 257–280. DOI: 10.1080/03610926.2018.1536210.
19. Sparis P. D. The operational matrix of differentiation for orthogonal polynomial series / P. D. Sparis, S. G. Mouroutsos // *International Journal of Control*. – 1986. – Vol. 44, No. 1. – P. 1–15. DOI: 10.1080/00207178608933579.
20. Sparis P. D. A comparative study of the operational matrices of integration and differentiation for orthogonal polynomial series / P. D. Sparis, S. G. Mouroutsos // *International Journal of Control*. – 1985. – Vol. 42, No. 3. – P. 621–638. DOI: 10.1080/002071785
21. Stoffer, D. S. Walsh-Fourier Analysis and Its Statistical Applications // *Journal of the American Statistical Association*. – 1991. – Vol. 86, No. 4. – P. 461–479. DOI: <https://doi.org/10.2307/2290595>.
22. Deb A. Walsh Functions and their Applications: A Review / A. Deb, S. Sen, A. K. Datta // *IETE Technical Review*. – 2015. – Vol. 9, No. 3. – P. 238–252. DOI: 10.1080/02564602.1992.11438882.
23. Al-Said E. A. The use of cubic splines in the numerical solution of a system of second-order boundary value problems / E. A. Al-Said // *Computers & Mathematics with Applications*. – 2001. – Vol. 42, No. 6–7. – P. 861–869. DOI: 10.1016/S0898-1221(01)00204-8.
24. Fuhry M. A new Tikhonov regularization method / M. Fuhry, L. Reichel // *Numerical Algorithms*. – 2012. – Vol. 59, No. 3. – P. 433–445. – DOI: 10.1007/s11075-011-9498-x.
25. Yang X.-J. A modified Tikhonov regularization method / X.-J. Yang, L. Wang // *Journal of Computational and Applied Mathematics*. – 2015. – Vol. 288. – P. 180–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cam.2015.04.011>.
26. Postnov V. A. Use of Tikhonov's regularization method for solving identification problem for elastic systems / V. A. Postnov // *Mechanics of Solids*. – 2010. – Vol. 45, Issue 1. – P. 51–56. DOI: 10.3103/S0025654410010085.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 2/2023

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук С. О. Субботін

Заст. головного редактора – д-р техн. наук Д. М. Піза

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі НУ «Запорізька політехніка»

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 24220-14060 ПР від 19.11.2019.

*Підписано до друку 08.06.2023. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 20,46.
Тираж 300 прим. Зам. № 356.*

69063, м. Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 6952 від 22.10.2019.