

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



Радіоелектроніка  
Інформатика  
Управління

Radio Electronics  
Computer Science  
Control

Радиоэлектроника  
Информатика  
Управление



2024/3



Національний університет «Запорізька політехніка»

# **Радіоелектроніка, інформатика, управління**

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(70) 2024

Заснований у 1998 році, видається з 1999 року.

Засновник і видавець – Національний університет «Запорізька політехніка».

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

Запоріжжя

НУ «Запорізька політехніка»

2024

National University Zaporizhzhia Polytechnic

# **Radio Electronics, Computer Science, Control**

The scientific journal

Published four times per year

№ 3(70) 2024

Founded in 1998, published since 1999.

Founder and publisher – National University Zaporizhzhia Polytechnic.

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

Zaporizhzhia

NU Zaporizhzhia Polytechnic

2024

**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;

**Бодянский 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 Наір), Католицький університет Льовена, Бельгія;

Рекомендовано до видання Вченою радою НУ «Запорізька політехніка», протокол № 2 від 01.10.2024.

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](mailto: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, професор, 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. Шамоу, 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 Наір), 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;

**Evgeniy 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., Professor, Professor of the 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 № 2 dated 01.10.2024.

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](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

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

© National University Zaporizhzhia Polytechnic, 2024

# ЗМІСТ

<b>РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....</b>	<b>6</b>
<i>Атаманський Д. В., Рябуха В. П., Васишин В. І., Семеняка А. В., Катюшин Є. А., Стовба Р. Л.</i>	
МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД ІМПУЛЬСНОЇ DRFM ЗАВАДИ.....	6
<b>МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....</b>	<b>19</b>
<i>Gorev V. N., Shedlovska Y. I., Laktionov I. S., Diachenko G. G., Kashtan V. Yu., Khabarлак K. S.</i>	
METHOD FOR SIGNAL PROCESSING BASED ON KOLMOGOROV-WIENER PREDICTION OF MFSD PROCESS...	19
<i>Gurskiy A. A. Dubna S. M.</i>	
THE SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR AUTOMATIC GENERATION OF PETRI NETS.....	26
<i>Lysechko V. P., Komar O. M., Bershov V. S., Veklych O. K.</i>	
OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF SYNTHESIZED SIGNALS USING LINEAR APPROXIMATIONS BY THE NELDER-MEAD METHOD.....	35
<i>Perederyi V. I., Borchik E. Y., Zosimov V. V., Bulgakova O. S.</i>	
ADAPTATION OF THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE.....	44
<b>НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....</b>	<b>54</b>
<i>Batiuk T., Dosyn D.</i>	
OPTIMIZING AUTHENTICATION SECURITY IN INTELLIGENT SYSTEMS THROUGH VISUAL BIOMETRICS FOR ENHANCED EFFICIENCY.....	54
<i>Висоцька В. А., Романчук Р. В.</i>	
ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІДЕОПОТОКУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОГНЕМ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	67
<i>Пукач А. І., Теслюк В. М.</i>	
МОДЕЛЬ ЗВОРОТНИХ ЛАНЦЮЖКІВ МАКСИМАЛЬНИХ ВАГ ДЛЯ АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ ПІДТРИМКИ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ.....	80
<i>Smolij V. M., Smolij N. V.</i>	
ON-BOARD LOG AND COORDINATE TRANSFORMATION FOR DETECTED OBJECTS ON THE SURFACE OF WATER.....	93
<i>Швед А. В., Давиденко Є. О., Горбань Г. В.</i>	
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДТРИМКА ПРОЦЕСІВ ПОШУКУ ТА ВИЛУЧЕННЯ ПРЕЦЕДЕНТІВ У СВР-ПІДХОДІ.....	107
<b>ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....</b>	<b>119</b>
<i>Lytvynov O. A., Hruzin D. L.</i>	
CRITICAL CAUSAL EVENTS IN SYSTEMS BASED ON CQRS WITH EVENT SOURCING ARCHITECTURE.....	119
<i>Pastushenko M. S., Pastushenko M. A., Faizulaiev T. A.</i>	
ESTIMATION OF FORMANT INFORMATION USING AUTOCORRELATION FUNCTION OF VOICE SIGNAL.....	144
<i>Pikuliak M., Kuz M., Lazarovych I., Kuzyk Ya., Skliarov V.</i>	
METHOD OF DETERMINING THE PARAMETER OF QUALITATIVE EVALUATION OF A WEB FORUM.....	151
<i>Rolik O. I., Zhevakin S. D.</i>	
COST OPTIMIZATION METHOD FOR INFORMATIONAL INFRASTRUCTURE DEPLOYMENT IN STATIC MULTI-CLOUD ENVIRONMENT.....	160
<i>Tereshchenko O. I., Komleva N. O.</i>	
IDENTIFICATION AND LOCALIZATION OF VULNERABILITIES IN SMART CONTRACTS USING ATTENTION VECTORS ANALYSIS IN A BERT-BASED MODEL.....	173
<b>УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>185</b>
<i>Avdieiev V. V., Alexandrov A. E.</i>	
MARGIN OF STABILITY OF THE TIME-VARYING CONTROL SYSTEM FOR ROTATIONAL MOTION OF THE ROCKET.....	185
<i>Sotnik S. V.</i>	
DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM AND REGISTRATION OF METAL IN CONTINUOUS CASTING.....	197
<i>Vaskiv R. I., Hrybovskiyi O. M., Kumanets N. E., Duda O.M.</i>	
INFORMATION SYSTEM OF STREET LIGHTING CONTROL IN A SMART CITY.....	212
<i>Yanovsky D. V., Graf M. S.</i>	
METHODS FOR ANALYZING THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION SYSTEMS FOR INVENTORY MANAGEMENT.....	224
<i>Zozulya V. A., Osadchy S. I.</i>	
STEWART PLATFORM MULTIDIMENSIONAL TRACKING CONTROL SYSTEM SYNTHESIS.....	233

# CONTENTS

<b>RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....</b>	<b>6</b>
<i>Atamanskyi D. V., Riabukha V. P., Vasylyshyn V. I., Semeniaka A. V., Katyushyn E. A., Stovba R. L.</i>	
THE METHODS OF PROTECTION FROM THE PULSE DRFM JAMMING.....	6
<b>MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....</b>	<b>19</b>
<i>Gorev V. N., Shedlovska Y. I., Laktionov I. S., Diachenko G. G., Kashtan V. Yu., Khabarлак K. S.</i>	
METHOD FOR SIGNAL PROCESSING BASED ON KOLMOGOROV-WIENER PREDICTION OF MFSD PROCESS...19	
<i>Gurskiy A. A. Dubna S. M.</i>	
THE SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR AUTOMATIC GENERATION OF PETRI NETS.....	26
<i>Lysechko V. P., Komar O. M., Bershov V. S., Veklych O. K.</i>	
OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF SYNTHESIZED SIGNALS USING LINEAR APPROXIMATIONS BY THE NELDER-MEAD METHOD.....	35
<i>Perederyi V. I., Borchik E. Y., Zosimov V. V., Bulgakova O. S.</i>	
ADAPTATION OF THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE.....	44
<b>NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....</b>	<b>54</b>
<i>Batiuk T., Dosyn D.</i>	
OPTIMIZING AUTHENTICATION SECURITY IN INTELLIGENT SYSTEMS THROUGH VISUAL BIOMETRICS FOR ENHANCED EFFICIENCY.....	54
<i>Vysotska V., Romanchuk R.</i>	
INTELLIGENT VIDEO ANALYSIS TECHNOLOGY FOR AUTOMATIC FIRE CONTROL TARGET RECOGNITION BASED ON MACHINE LEARNING.....	67
<i>Pukach A. I., Teslyuk V. M.</i>	
MODEL OF MAXIMAL WEIGHTS INVERSE CHAINS FOR THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE FACTORS OF THE SOFTWARE COMPLEXES SUPPORT.....	80
<i>Smolij V. M., Smolij N. V.</i>	
ON-BOARD LOG AND COORDINATE TRANSFORMATION FOR DETECTED OBJECTS ON THE SURFACE OF WATER.....	93
<i>Shved A. V., Davydenko Ye. O., Horban H. V.</i>	
INTELLECTUAL SUPPORT OF THE PROCESSES OF SEARCHING AND EXTRACTION OF PRECEDENTS IN CASE-BASED REASONING APPROACH.....	107
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>119</b>
<i>Lytvynov O. A., Hruzin D. L.</i>	
CRITICAL CAUSAL EVENTS IN SYSTEMS BASED ON CQRS WITH EVENT SOURCING ARCHITECTURE.....	119
<i>Pastushenko M. S., Pastushenko M. A., Faizulaiev T. A.</i>	
ESTIMATION OF FORMANT INFORMATION USING AUTOCORRELATION FUNCTION OF VOICE SIGNAL.....	144
<i>Pikuliak M., Kuz M., Lazarovych I., Kuzyk Ya., Skliarov V.</i>	
METHOD OF DETERMINING THE PARAMETER OF QUALITATIVE EVALUATION OF A WEB FORUM.....	151
<i>Rolik O. I., Zhevakin S. D.</i>	
COST OPTIMIZATION METHOD FOR INFORMATIONAL INFRASTRUCTURE DEPLOYMENT IN STATIC MULTI-CLOUD ENVIRONMENT.....	160
<i>Tereshchenko O. I., Komleva N. O.</i>	
IDENTIFICATION AND LOCALIZATION OF VULNERABILITIES IN SMART CONTRACTS USING ATTENTION VECTORS ANALYSIS IN A BERT-BASED MODEL.....	173
<b>CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....</b>	<b>185</b>
<i>Avdieiev V. V., Alexandrov A. E.</i>	
MARGIN OF STABILITY OF THE TIME-VARYING CONTROL SYSTEM FOR ROTATIONAL MOTION OF THE ROCKET.....	185
<i>Sotnik S. V.</i>	
DEVELOPMENT OF AUTOMATED CONTROL SYSTEM AND REGISTRATION OF METAL IN CONTINUOUS CASTING.....	197
<i>Vaskiv R. I., Hrybovskiy O. M., Kunanets N. E., Duda O.M.</i>	
INFORMATION SYSTEM OF STREET LIGHTING CONTROL IN A SMART CITY.....	212
<i>Yanovsky D. V., Graf M. S.</i>	
METHODS FOR ANALYZING THE EFFECTIVENESS OF INFORMATION SYSTEMS FOR INVENTORY MANAGEMENT.....	224
<i>Zozulya V. A., Osadchy S. I.</i>	
STEWART PLATFORM MULTIDIMENSIONAL TRACKING CONTROL SYSTEM SYNTHESIS.....	233

# РАДИОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.96:551.501.815

### МЕТОДИ ЗАХИСТУ ВІД ІМПУЛЬСНОЇ DRFM ЗАВАДИ

**Атаманський Д. В.** – д-р техн. наук, професор, професор Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

**Рябуха В. П.** – д-р техн. наук, професор, професор Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Василишин В. І.** – д-р техн. наук, професор, начальник кафедри Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

**Семеняка А. В.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Катюшин Є. А.** – старший науковий співробітник Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Стовба Р. Л.** – викладач Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Відповідні імпульсні завади типу DRFM (Digital Radio Frequency Memory – (укр. цифрова радіочастотна пам'ять) для імпульсних РЛС, зокрема, з лінійною частотною модуляцією (ЛЧМ) зондувальних сигналів, дуже ускладнюють радіолокаційну обстановку. На екранах індикаторів радіолокаційних засобів, крім відміток від існуючих (істинних) цілей, з'являється інші, що імітують аналогічні їм хибні цілі. Відомі методи боротьби з багаторазовими імпульсними відповідними завадами для завад типу DRFM малоефективні, що обумовлено специфікою формування завади. Створення методів, алгоритмів і систем боротьби з такими завадами є досі актуальним завданням.

**Мета.** Оцінити можливості відомих методів завадозахисту щодо зниження негативного впливу імпульсних завад типу DRFM на ефективність обробки корисних сигналів та запропонувати новий метод обробки ЛЧМ сигналу на фоні DRFM завади.

**Метод.** Ефективність методів визначається експериментально за результатами імітаційного моделювання та їхнього порівняння з відомими результатами, викладеними у відкритій літературі.

**Результати.** Обґрунтовано неефективність відомих способів захисту від відповідної імпульсної завади для зниження негативного впливу DRFM завади на обробку сигналу, відбитого від цілі. Визначено характер негативного впливу DRFM завад на обробку відбитого від цілі сигналу. Завадою може створюватись як імітація відміток від неіснуючих (хибних) цілей, так і маскувальний ефект. Показано, що пристрій з двостороннім обмежником амплітуди на вході фільтру стиску, що зазвичай використовується для заглушення імпульсної завади, неефективний для заглушення DRFM завади.

Продемонстровано, що для малобазових ЛЧМ сигналів як фільтр стиску може використовуватись фільтр, узгоджений з ЛЧМ сигналом з великою базою, хоча такі узгоджені фільтри не призначені для обробки ЛЧМ сигналів з малими базами. Визначені умови узгодженої фільтрації малобазових імпульсних ЛЧМ в фільтрах, узгоджених з сигналами з великими базами. Достатньою умовою узгодженої фільтрації малобазових сигналів є збіг їхнього фазочастотного спектру з відповідною ділянкою фазочастотного спектру великобазового сигналу. Дана обставина пояснює ефект формування максимумів на виході фільтра стиску по імпульсах DRFM завади і формування хибних відміток від цілей.

Показано, що обмеження рівня сигналів перед їхньою обробкою в фільтрі стиску усуває енергетичну перевагу завади над корисним сигналом, але не впливає на форму фазочастотного спектра завади. Ця особливість амплітудних обмежувачів є причиною неефективної обробки корисного сигналу на фоні DRFM завади в пристроях типу амплітудний обмежувач – узгоджений фільтр.

Запропоновано метод заглушення відповідної імпульсної завади, в основі якого лежить природне припущення про належність до відліків завади потужних відліків вхідної суміші. В ході цифрової обробки реалізується обнуління відліків, що перевищують заданий рівень обмеження. Показано, що пристрої обробки, які використовують таке обмеження, забезпечують ефективну обробку корисного сигналу на фоні DRFM завади.

**Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що набула подальшого розвитку практика завадозахисту РЛС з імпульсними ЛЧМ зондувальними сигналами, а саме запропоновано пристрій, що виявляє відбитий сигнал на фоні імпульсної завади у відповідь такому сигналу. Набула подальшого розвитку практика узгодженої фільтрації складних сигналів, а саме визначені умови узгодженої фільтрації малобазових імпульсних ЛЧМ сигналів у фільтрах,



узгоджених з сигналами з великими базами. Достатньою умовою є збіг фазочастотного спектру малобазового сигналу з відповідною ділянкою фазочастотного спектру великобазового сигналу. Практична цінність досліджень полягає в тому, що запропонований пристрій обробки, в переважній більшості практичних випадків забезпечує приблизно в двічі більше значення ймовірності правильного виявлення сигналу, відбитого від цілі, у порівнянні з відомими пристроями обробки.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** метод, DRFM завада, ЛЧМ радіоімпульс, РЛС, математичне моделювання, відповідна імпульсна завада.

### АБРЕВІАТУРИ

АК – автокомпенсатор;  
АШЗ – активна шумова завада;  
АЧС – амплітудно-частотний спектр;  
ВІЗ – відповідна імпульсна завада;  
DRFM (Digital Radio Frequency Memory) – цифрова радіочастотна пам'ять;  
ДСА – діаграма спрямованості антени;  
ЗРІ – зондувальний радіоімпульс;  
ІКО – індикатор кругового огляду;  
ІХ – імпульсна характеристика;  
ЛЧМ – лінійна частотна модуляція;  
МАРП – миттєве автоматичне регулювання підсилення;  
Моб – модифікований обмежувач;  
НІЗ – несинхронна імпульсна завада;  
SMSP (smeared spectrum) – розмазування спектра сигналу;  
С&І (chopping and interleaving) – вирізка і перемішування фрагментів сигналу;  
СРЦ – селекція рухомих цілей;  
Соб – стандартний обмежувач;  
УФ – узгоджений фільтр;  
ПРІБВМ –прямокутний радіоімпульс без внутрішньої модуляції;  
ПБВ – придушення бокових відповідей;  
ППЧ – підсилювач проміжної частоти;  
РЛС – радіолокаційна станція;  
РТС – радіотехнічна система;  
РТС – радіотехнічна система;  
РЛП – радіолокаційне поле;  
РЕБ – радіоелектронна боротьба;  
ФЧС – фазочастотний спектр;  
ШАРП – швидкодіюче автоматичне регулювання підсилення;  
ШОВ – ширококутний підсилювач – двосторонній амплітудний обмежник – вузькосмуговий підсилювач;  
ЦФ – цифровий фільтр.

### НОМЕНКЛАТУРА

$P_{\text{пр}}$  – смуга пропускання приймального пристрою;  
 $T_{\text{п}}$  – період повторення імпульсів РЛС;  
 $\beta_c$  – крутизна частотної модуляції ЛЧМ радіоімпульсу РЛС;  
 $\tau_0$  – тривалість ЛЧМ радіоімпульсу;  
 $\tau_i$  – тривалість імпульсу корисного сигналу;  
 $\tau_3$  – тривалість імпульсу завади;  
 $\Delta f_0$  – девіація частоти радіоімпульсу;

$\beta_0$  – крутизна частотної модуляції сигналу, яка характеризує швидкість зміни частоти ЛЧМ коливання за часом;

$f_0$  – несуча (середня) частота зондувального сигналу;

$m$  – коефіцієнт стиску ЛЧМ радіоімпульсу;

$U_{\text{пор.об.}}$  – поріг (рівень) обмеження;

$C(u_1)$ ,  $S(u_1)$  – інтеграли Френеля;

$z$  – кількість відрізків функції  $f(t)$  прийнятого ЛЧМ сигналу, використаних для формування імпульсу DRFM завади типу С&І;

$N_{\text{пр}}$  – кількість правильних рішень про наявність корисного сигналу в суміші корисного сигнал+завада;

$N_0$  – загальна кількість ітерацій в експериментах ( $N_0 = 10^5$ );

$C(u_1)$ ,  $S(u_1)$  – інтеграли Френеля.

### ВСТУП

Назва DRFM як різновиду відповідної імпульсної завади обумовлена тим, що зондувальний сигнал РЛС, прийнятий постановником завади, повністю або частково запам'ятовується в цифровій формі [1, 2, 3]. Пристрої цифрової радіочастотної пам'яті є найважливішими елементами сучасних РЕБ, в яких застосовуються ПЛІС та цифрові процесори обробки сигналів.

Технологія DRFM дозволяє створювати компактні пристрої, які можуть бути встановлені на транспортних засобах багатьох типів, зокрема, на невеликих літальних апаратах, як пілотованих, так і безпілотних. Застосування технології DRFM дозволяє отримати ряд суттєвих переваг для систем РЕБ. Зокрема, в системі з DRFM немає необхідності з нуля формувати відповідний сигнал для дії на РЛС противника. Для цієї мети використовується приймальний сигнал РЛС, який відповідним чином обробляється.

Системи DRFM багатофункціональні, здатні формувати відповідні імітувальні імпульсні завади і маскувальні шумові завади, працювати у різних режимах заглушення РЛС з різними типами зондувальних радіоімпульсів, як без внутрішньої імпульсної модуляції, так і з внутрішньо імпульсною модуляцією (частотною, фазовою). Наприклад, для РЛС виявлення вони формують численні хибні цілі (рис. 1).



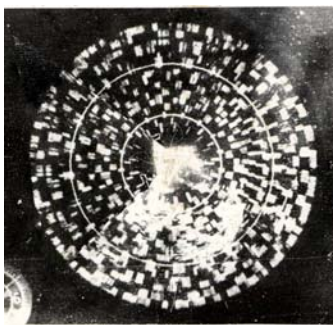


Рисунок 1 – Вигляд ІКО з відмітками від хибних цілей

Під час програмного керування випромінюванням завод, імітується не тільки рух хибних цілей з будь-яким курсом, але й різні види маневру. Усе це приводить до того, що радіолокаційна обстановка виявляється досить складною, доводиться обробляти великий масив даних, розпорошувати сили й засоби, призначені для боротьби з істинними цілями. Вказані особливості завод змушують вживати спеціальні заходи для боротьби з ними [4, 5].

**Мета статті** – оцінити можливості відомих методів заводозахисту щодо зниження негативного впливу ВІЗ типу DRFM на обробку корисних сигналів та запропонувати альтернативний метод обробки ЛЧМ сигналу на фоні DRFM завади.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай в РЛС як зондувальний сигнал використовується ЛЧМ радіоімпульс [6]

$$U(t) = U_0 \cdot \cos(2\pi f_0 t + \pi \beta t^2), \quad 0 \leq t \leq \tau_0. \quad (1)$$

На РЛС діють DRFM завади типу SMSP і C&I. Радіоімпульси DRFM завади типу SMSP тривалістю  $\tau_{SMSP}$  складаються з однакових коротких фрагментів (дискрет, елементарних імпульсів) тривалістю  $\tau_0/n$  (рис. 2, в) у  $n$  раз меншої тривалості зондувальних радіоімпульсів (ЗРІ) РЛС  $\tau_0$  (рис. 2, а), але з такою же девіацією частоти  $\Delta f_0$  (рис. 2, г), як і в ЗРІ РЛС.

Відповідно, крутість частотної модуляції

$$\beta_{SMSP} = \Delta f_0 / (\tau_0/n) = n \cdot \Delta f_0 / \tau_0 = n \cdot \beta_0 \quad (2)$$

цих фрагментів DRFM завади типу SMSP у  $n$  раз більше крутості  $\beta_0 = \Delta f_0 / \tau_0$  ЛЧМ імпульсу сигналу. Тривалість імпульсу  $\tau_{SMSP}$  DRFM завади типу SMSP може дорівнювати тривалості  $\tau_0$  ЛЧМ імпульсу РЛС (рис. 2, б) або перевищувати її в 2 або 3 (рис. 2, е) рази. У цьому разі кількість фрагментів в імпульсі DRFM завади становить  $(1 \div 3) \cdot n$  (рис. 2, г, е). Метод SMSP ефективний в ході формування відміток хибних цілей в оглядових РЛС із ЛЧМ зондувальними радіоімпульсами, що мають базу меншу ніж 500 [7].

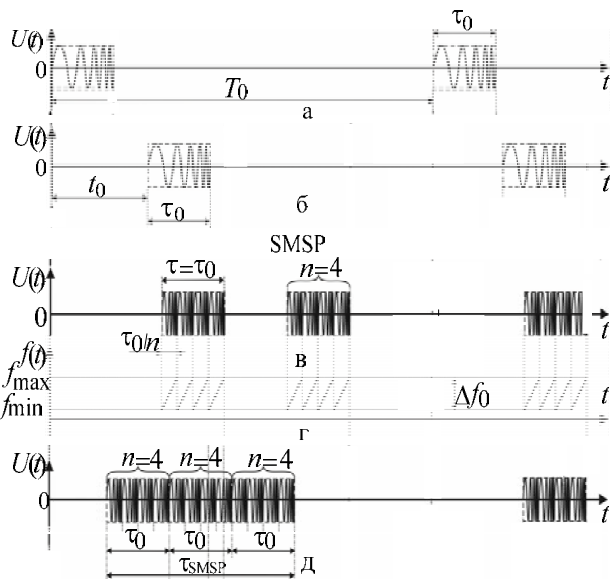


Рисунок 2 – Зондувальні імпульси РЛС (а), відбиті імпульси РЛС (б), DRFM завада типу SMSP тривалістю  $\tau_0$  (в) і її закон зміни частоти (г), DRFM завада тривалістю  $3\tau_0$  (д)

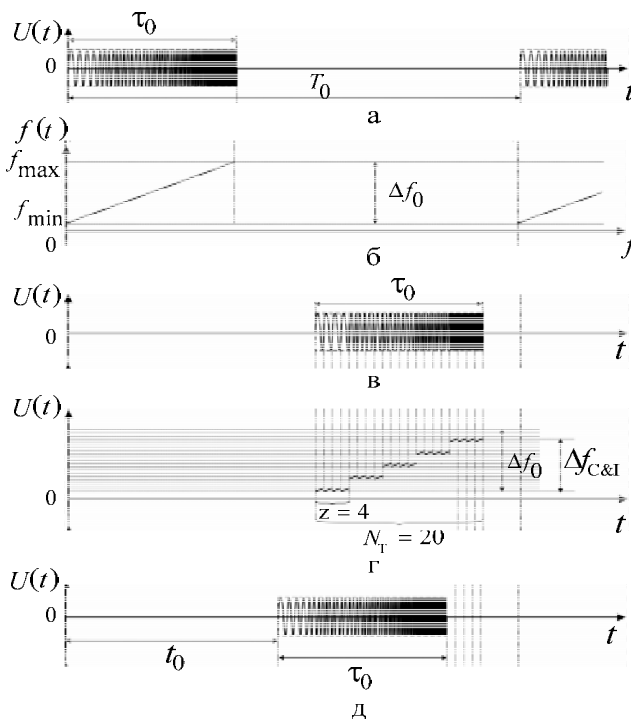


Рисунок 3 – Зондувальні імпульси РЛС (а) і закони зміни їх частоти (б), імпульси DRFM завади типу C&I (в) і закони зміни їх частоти (г), імпульси відбитого від цілі сигналу (д)

DRFM завада типу C&I (рис. 3) являє собою рівномірно розташовані в часі вирізки фрагментів сигналу, прийнятого від РЛС, що заглушується, у межах тривалості зондувального імпульсу РЛС [1, 5, 7]. Принцип формування такої завади полягає у вирізанні потрібних фрагментів із сигналу,

пропускаючи інші, складанні з них переміжних сегментів завади таким чином, щоб кожен сегмент переносив інформацію свого діапазону частот, і тим самим генерування імпульсу DRFM завади типу C&I в цілому.

Сформовані фрагменти DRFM завади – це короткі ЛЧМ радіоімпульси з однаковою девіацією частоти  $\Delta f_{fr} \ll \Delta f_0$  ( $\Delta f_{fr} < \Delta f_0$ ), але з різною середньою частотою. Девіація частоти  $\Delta f_{C\&I}$  завади типу C&I, на відміну від DRFM завади типу SMSP, менше девіації частоти зондувального імпульсу  $\Delta f_0$ :

$$\Delta f_{C\&I} = \Delta f_0 - (z-1) \cdot \Delta f_{fr} = \Delta f_0 - (z-1) \cdot \Delta f_0 / N_T. \quad (3)$$

Відомі методи захисту від відповідних завад, що розроблені ще до застосування технології DRFM. Необхідно визначити доцільні методи завадозахисту від DRFM завади.

Як критерій ефективності (відбору) методу використовується значення умовної імовірності правильного виявлення

$$D = N_{пр} / N_0 \quad (4)$$

корисного сигналу, отриманої експериментально для кожного із методів по суміші корисного сигналу + завада + внутрішній шум приймача.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Для придушення імітаційної завади типу DRFM широко використовується підхід, що містить операцію розпізнавання завади [8–14]. Для розпізнавання завади використовують різні відмінності сигналу і завади методи. Зокрема, енергетичні відмінності сигналу і завади [15], різну крутизну частотної модуляції сигналу і завади [16], відмінності частотно-часових портретів сигналу і завади [17], [18]. Дані відмінності пропонується використовувати в різних моделях машинного навчання [19], [20], [21]. Однак, вказані підходи розпізнавання завад не враховують фактор оперативності [3] обробки прийнятої суміші сигналу і завади.

В той же час відомі методи захисту від імітованих завад поєднують у собі одночасне придушення завад з виділення корисного сигналу. У таблиці №1 наведені основні способи захисту від ВІЗ [22–27]. Нижче обговорюється сутність методів захисту, зазначених у табл. 1, і їх застосовність для захисту від ВІЗ типу DRFM.

Методи 1–3 забезпечують заглушення (ослаблення) завад до входу в приймальний тракт РЛС, а інші – заглушують заваду в трактах обробки.

Перестроювання несучої частоти як метод захисту РЛС від завад використовує відмінність несучих частот корисного сигналу й завади. Спосіб застосовується безпосередньо в ході бойової роботи й

захищає від усіх видів завад, що діють як по головному, так і по бічних пелюстках (ДСА РЛС). Однак для захисту від DRFM завади він є неефективний через однаковість несучих частот корисного сигналу й завади.

Автоматичне регулювання підсилення призначено для виділення корисного сигналу, прийнятого на фоні завади великої потужності. Принцип роботи полягає в тому, щоб за час дії імпульсу завади не відбулося перевантаження приймальної системи.

Поляризаційні відмінності корисного сигналу і завади можуть використовуватись для її заглушення. Для цього РЛС потрібні спеціальні антени для роздільного приймання горизонтальної й вертикальної складової вектора поляризації завади і поляризаційний селектор для заглушення завади. Додаткове обладнання збільшує вартість РЛС.

Таблиця 1– Основні методи захисту РЛС від ВІЗ

№	Назва методу
1.	Перелаштування по несучій частоті
2.	Просторова селекція
3.	Поляризаційна селекція
4.	Перестройка частоти повторення (вобуляція) зондувальних імпульсів
5.	Компенсаційний метод
6.	Селекція за амплітудою
7.	Автоматичне регулювання підсилення
8.	Селекція за тривалістю сигналу
9.	Селекція за частотою повторення сигналу
10.	Оптимальна фільтрація
11.	Селекція за законом модуляції радіоімпульсів

Просторова селекція завади досягається звуженням головної пелюстки й зменшенням рівня бічних пелюсток ДНА і використанні відмінностей у кутових напрямках дії на РЛС корисного сигналу й завади. Для захисту РЛС від синхронних (відповідних) імпульсних завад використовується метод некогерентної компенсації – схема ПБВ. Вона забезпечує ослаблення приймання антеною несинхронних імпульсних завад, завад у відповідь, що діють із напрямків бічних пелюсток. Однак метод неефективний під час дії завади по основній пелюстці ДСА РЛС. Крім цього для реалізації метода потрібно застосовувати додаткове обладнання, що збільшує вартість РЛС.

Селекція за тривалістю сигналу забезпечує захист РЛС від синхронних імпульсних завад, тривалість яких не збігається із тривалістю сигналу РЛС. У цьому разі припускається, що корисний сигнал і завада не мають внутрішньої імпульсної модуляції та завади задовольняють умові  $\tau_3 > \tau_i$ .

Метод захисту базуються на відмінності ширини спектра одиночних імпульсів завади й корисного сигналу. Як пристрої захисту від вузькосмугових імпульсних завад використовують диференціючі ланцюги у відеотракті приймача й схеми швидкодіючого (миттєвого) автоматичного регулювання підсилення (ШАРП, МАРП) у тракті

ППЧ. Вони забезпечують заглушення завад, тривалість імпульсів яких суттєво перевищує тривалість імпульсів корисного сигналу.

Однак наведені пристрої захисту будуть неефективні в ході заглушення DRFM завад, що розглядаються, через однакову ширину спектрів завади й відбитого сигналу.

Селекція за амплітудою використовується для заглушення завад різних видів, амплітуда яких перевищує граничне значення. Схеми селекції сигналів за амплітудою забезпечують самобланкування НІЗ, амплітуда яких перевищує встановлений поріг у каналі формування бланка. Недоліком схеми вважається самобланкування сигналів великої амплітуди й проходження завад малої амплітуди.

Селекція за частотою повторення сигналу забезпечує заглушення несинхронних імпульсних завад, період повторення яких відмінний від періоду повторення імпульсів РЛС. До схем, що забезпечують заглушення імпульсних завад на основі відмінностей у структурі їх послідовностей (пачок), відносяться: схеми селекції за частотою повторення; аналогові некогерентні накопичувачі (рециркулятори); накопичувачі й програмні виявлювачі двійково-квантованих сигналів; когерентні накопичувачі. Однак наведені пристрої захисту будуть також неефективні в ході заглушення DRFM завади в силу однаковості періодів повторення завади й відбитого сигналу.

Застосування схем заглушення НІЗ на базі кореляційних АК для заглушення ними НІЗ вважається проблематичним через інерційність інтегруючої ланки корелятора [22], що досягає за розімкнутого ланцюга зворотного зв'язку сотень мікросекунд – одиниць мілісекунд. Імпульси завади, період проходження яких приблизно рівний або перевищує постійну часу інтегратора (на відміну від випадку з безперервною АШЗ), не встигають збудити відповідні коливання в інтеграторі. У цьому разі на виході корелятора регулююча напруга відсутня, що виключає компенсацію завади в суматорі АК. Проте в ряді випадків є можливість застосування АК для заглушення протяжної НІЗ, а також короткоімпульсної завади, період повторення якої приблизно рівний постійній часу інтегратора [22].

Ефективне заглушення імпульсних завад, тривалість яких значно менше тривалості корисного сигналу без внутрішньої імпульсної модуляції, забезпечують схеми ШОВ у складі широкопasmового підсилювача, двостороннього амплітудного обмежника, вузькосmового підсилювача.

Помітний вииграш у відношенні сигнал/завада має місце за умови  $\tau_n < \tau_c$ . Недоліки схеми [22]: в ході включенні схеми в приймальний тракт РЛС знижується ефективність заглушення завад системою СРЦ, оскільки обмеження сигналів приводить до розширення спектра флуктуацій пасивної завади; під

час дії АШЗ погіршується відношення сигнал/завада в  $4\pi$  раз; виникнення перехресних спотворень в ході одночасної дії на обмежник корисного сигналу й завади; наявність додаткових втрат в ході обмеження на рівні ефективного значення власних шумів приймача, якщо  $P_{шп} / P_{вп} < 10$ .

Для усунення цих недоліків замість амплітудного обмежника застосовується керований ключ [22]. Прийнятий сигнал аналізується за допомогою схеми виділення завади. Якщо вхідна напруга має характеристики завади, то зазначена схема виробляє керуючу напругу, яка, впливаючи на ключ, закриває приймальний тракт на час дії імпульсної завади. Схема ефективно працює за середніх частот повторення імпульсів завади порядку декількох кілогерців.

Схема ШОВ захищає РЛС із вузькосmовим зондувальним сигналом від коротких імпульсних завад, але не забезпечує захист від завад, тривалість яких приблизно дорівнює або більше тривалості корисного сигналу. Через однаковість тривалості і ширини спектру сигналу і завади схема також неефективна для заглушення DRFM завад. Проте, вона лягла в основу запропонованого методу заглушення DRFM завад.

У РЛС, які використовують зондувальні сигнали із внутрішньо імпульсною модуляцією (частотною, фазовою) застосовуються схеми на основі оптимального (узгодженого) фільтра із обмежником на його вході. Імпульсна завада з відмінним від сигналу законом внутрішньої імпульсної модуляції послабляється оптимальним фільтром і за відсутності обмежника на вході. Інтенсивна ж завада, навіть будучи ослаблена фільтром, може на його вході перевищувати шум і, отже, зберігати свою заважаючу дію. Включення обмежника, як і в схемі ШОВ, дозволяє позбавити заваду енергетичної переваги над шумом на вході фільтра й тим самим забезпечити заглушення завади будь-якої інтенсивності.

Схема теоретично забезпечує заглушення завад будь-якої тривалості, аби тільки закон їхньої внутрішньої імпульсної модуляції відрізнявся від закону модуляції корисного сигналу.

Захист від ВІЗ, до яких відносяться DRFM завади, розділяють на дві частини: захист від випереджальних ВІЗ і захист від ВІЗ по бічних пелюстках ДНА.

Захист від випереджальних ВІЗ може здійснюватись двома способами. Перший спосіб заснований на використанні швидкої по-імпульсної перебудови робочої частоти РЛС. Якщо швидкість перебудови  $V_{спс}$  задовольняє умові  $V_{спс} \geq P_{пр} / T_{п}$ , то випереджальні імпульси ВІЗ не потраплять у тракт через те, що їх несуча частота буде відповідати частоті РЛС у попередньому циклі випромінювання.

У другому способі використовується зміна запуску й апаратури захисту від НІЗ. Під час зміні  $T_{п}$  від періоду до періоду випереджальні імпульси ВІЗ

здобувають властивості НІЗ і заглушуються в апаратурі захисту від НІЗ.

Реалізація розглянутих способів складна. У розділі 4 пропонується простіший на думку авторів метод заглушення DRFM завад, що базується на основі оптимального (узгодженого) фільтра із обмежником на його вході.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Основні результати отримані методом імітаційного моделювання процедури фільтрації вхідних сигналів в УФ ЛЧМ сигналу, ІХ якого описується відомим виразом [6]:

$$h(t) = U_1 \cos(\omega_0 \cdot (\tau_0 - t) + \pi\beta_0 \cdot (\tau_0 - t)^2), \quad 0 \leq t \leq \tau_0.$$

Амплітуда  $C$  його центральної (головної) пелюстки вихідного сигналу УФ пов'язана з амплітудою вхідного імпульсу  $U_0$  залежністю

$$C = U_0 \cdot \sqrt{m} \quad [6].$$

Вихідний ефект є згорткою вхідного сигналу і ІХ фільтра стиску

$$U_{\text{out}}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau.$$

Тому в подальшому нормування напруги на виході УФ за умови  $U_0 = U_1$  здійснюється величиною

$$k_n = U_0 U_1 m = U_0^2 m.$$

Ефективність методів захисту від завад перевіряється на модельній ситуації формування ВІЗ для відбитого ЛЧМ сигналу з девіацією частоти  $\Delta f_0 = 1$  МГц, тривалістю  $\tau_{i,c} = 1$  мс та часовим запізненням  $t_0 = 2$  мс. В ході моделювання змінюються наступні параметри ВІЗ: часове запізнення першого імпульсу завади  $\tau_{i,\text{ВІЗ}}$ , кількість імпульсів ВІЗ  $n_{i,\text{ВІЗ}}$ .

Амплітуди ВІЗ, прийнятого ЛЧМ сигналу та рівні обмеження  $U_{\text{пор.об.}}$  задаються у відносних до середньоквадратичного рівню шуму приймача одиницях.

Для ілюстрації ефективності запропонованого методу захисту як вхідний сигнал УФ використовувалась суміш ВІЗ і ЛЧМ сигналу на виході двох обмежувачів, умовно названих стандартним (Соб) і модифікованим (Моб). Дискретні вихідні сигналів обмежувачів описуються виразами:

$$u_{\text{Соб}}(i) = \begin{cases} U_{\text{пор.об.}}, & \text{при } |u_{\text{вх}}(i)| \geq U_{\text{пор.об.}} \\ u_{\text{вх}}(i), & \text{при } |u_{\text{вх}}(i)| < U_{\text{пор.об.}} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_{\text{Моб}}(i) = \begin{cases} 0, & \text{при } |u_{\text{вх}}(i)| \geq U_{\text{пор.об.}} \\ u_{\text{вх}}(i), & \text{при } |u_{\text{вх}}(i)| < U_{\text{пор.об.}} \end{cases} \quad (6)$$

Амплітудно-частотні спектри і фазочастотні спектри на вході і виході УФ отримані стандартними процедурами пакету прикладних програм MATLAB.

Адекватність створеної математичної моделі перевірено порівнянням відомих аналітичних результатів з отриманими моделлю і підтверджується збігом АЧС і ФЧС ЛЧМ сигналу, отриманих моделлю і відомими аналітичними формулами [6, формули (3.50), (3.51)].

Спектральна густина ЛЧМ сигналу

$$S(f) = \frac{A_0 \tau_0}{2\sqrt{m}} \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{|C(u_1) + C(u_2)|^2 + |S(u_1) + S(u_2)|^2}$$

$$u_1 = \sqrt{m} \left[ 1 + \frac{f - f_0}{\Delta f_0} \right], \quad u_2 = \sqrt{m} \left[ 1 - \frac{f - f_0}{\Delta f_0} \right],$$

$$m = \Delta f_0 \tau_0$$

а його ФЧС

$$\theta_x(f) = -\frac{\tau_0 \Delta f_0}{4} \frac{(f - f_0)^2}{\Delta f_0^2} + \arctg \frac{S(u_1) - S(u_2)}{C(u_1) - C(u_2)}.$$

### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для обґрунтування відмінного від відомих методу заглушення DRFM завади (п. 2) проаналізуємо вихідні сигнали пристроїв (рис. 4), що містять ЦФ, узгоджений із ЛЧМ радіоімпульсом та обмежником Соб (2) на його вході (пристрій 1) і ЦФ з обмежником Моб (3) на його вході (пристрій 2).

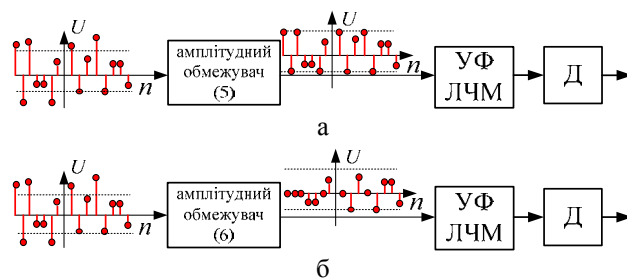


Рисунок 4 – Структура пристрою1 (а) і пристрою 2(б)

Вважається, що суміш потужної DRFM завади й слабого відбитого ЛЧМ сигналу діє по головному променю ДН антени. У цьому випадку апаратура захисту від НІЗ неефективна (п. 2). Також покладається, що у РЛС неможливо реалізувати по-імпульсну перебудову робочої частоти, а ІХ УФ фіксована і узгоджена з ЛЧМ сигналом з девіацією частоти  $\Delta f = 1$  МГц та тривалістю  $\tau_{i,c} = 1$  мс.

В загальному випадку сигнал, що поступає на пристрої 1, 2, може містити: сигнал, відбитий від цілі+внутрішній шум; заваду+внутрішній шум; суміш заваду+внутрішній шум+ сигнал, відбитий від цілі. Для розуміння сутності запропонованого методу нижче описуються результати обробки двох останніх вхідних впливів.



Нехай на вхід пристрою 1, 2 впливає суміш завади + внутрішній шум. На рис. 5, 6 показані епюри та ФЧС сигналів на вході та виході фільтра стиску УФ пристрою 1 та пристрою 2 під час дії на його вхід DRFM завади типу SMSR (рис. 5) та типу C&I (рис. 6) тривалістю  $\tau_{\text{SMSR}} = 1$  мс, кількість згенерованих імпульсів за час тривалості завади  $n = 1$  (рис. 5 а, б, в) та  $n = 2$  (рис. 5 г, д, е), девіація частоти в імпульсі  $\Delta f_{\text{ім}} = 1$  МГц. Відношення  $h_3$  амплітуди завади до прийнятої за одиницю амплітуди  $U_0$  корисного сигналу становить 30 дБ.

На рис. 5 показані обмежені знизу до нульового рівня епюри напруг на виході УФ пристрою 1 (рис. 5 а, б) та пристрою 2 (рис. 5 г, д) під час дії завади, що містить один ( $n = 1$ ) імпульс тривалістю  $\tau_{zi} = \tau_i$  (рис. 5 а, г) та ( $n = 2$ ) імпульси тривалістю  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$  (рис. 5 б, д). На рис. 5 в, е показані ФЧС сигналів на вході і виході пристроїв (рис. 4).

Рівень обмеження встановлено рівним середньоквадратичному відхиленню амплітуди внутрішнього шуму приймача. При цьому значно обмежується енергетична перевага завади над сигналом від цілі.

З теорії фільтрації сигналів відомо, АЧХ УФ повинна збігатися з АЧС сигналу, який оброблятиметься у фільтрі. Його ФЧХ з точністю до множника запізнення протилежна ФЧС сигналу.

АЧС завади типу SMSP завжди збігається з АЧС сигналу від цілі, що імітується. Його ФЧС може відрізнитись. У випадку  $\tau_{zi} = \tau_i$  ФЧС завади на вході фільтра стиску (на виході Соб) співпадає з ФЧС на вході пристрою 1, і не відрізняється від ФЧС відбитого від цілі сигналу.

Для даного випадку стандартний обмежувач не змінює ФЧС завади. Фільтр стиску узгоджений як з сигналом, так і з імпульсом завади. На виході УФ після закінчення впливу завади (1 мс) формується стиснутий імпульс, пропорційний імпульсу, що сформувався би в ході обробки УФ відбитого від цілі сигналу.

Епюри на рис. 5 б, д описують ситуацію двох імпульсів завади, кожен з яких дорівнює  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$ . ФЧС завади на виході Соб (5) збігається з ФЧС на вході, але відрізняється від ФЧС відбитого від цілі сигналу. В цьому й інших випадках за  $n > 2$  фільтр стиску розузгоджений з імпульсом завади. Вихідний сигнал фільтра стиску по кожному із імпульсів завади не має чіткого максимуму. Результуючий сигнал по всім імпульсам завади як сума їхньої обробки в УФ являє собою шумоподібний сигнал подвоєної тривалості завади.

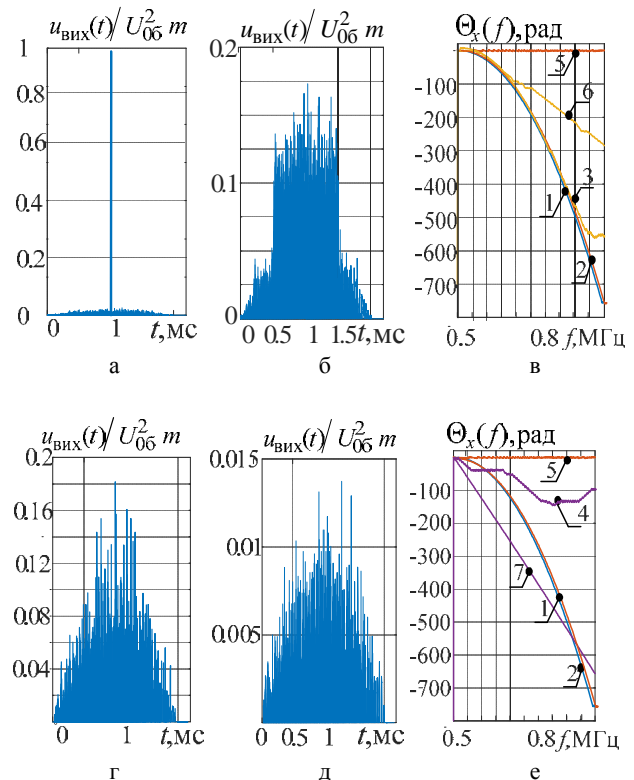


Рисунок 5 – Епюри сигналів на виході УФ пристрою 1 (а, б) та пристрою 2 (г, д) в ході подачі на вхід завади типу SMSP з  $\tau_{zi} = \tau_i$  (а, г) і  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$  (б, д) та ФЧС сигналів в окремих точках пристроїв 1, 2; 1 – ФЧС ЛЧМ сигналу; 2 – ФЧС завади на вході УФ пристроїв 1, 2 під час дії завади з  $\tau_{zi} = \tau_i$ ; 3 – ФЧС завади на виході обмежувача пристрою 1 під час дії завади з  $\tau_{zi} = \tau_i$ ; 5 – ФЧС завади на вході пристроїв 1, 2 під час дії завади з  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$ ; 6 – ФЧС завади на виході пристрою 1 під час дії завади з  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$ ; 4 – ФЧС завади на вході УФ пристрою 2 під час дії завади з  $\tau_{zi} = \tau_i$ ; 7 – ФЧС завади на вході УФ пристрою 2 під час дії завади з  $\tau_{zi} = 0,5\tau_i$

На відміну від обмежувача (5) обмежувач пристрою 2 в силу (6) спотворює часову структуру завади і, відповідно, змінює її ФЧС (рис. 5, е, крива 4), що унеможливило узгоджену фільтрацію завади. Замість максимуму формується розмазаний в часі сигнал, потужність якого зменшується пропорційно зменшенню значенню рівня обмеження.

Модифікований обмежувач спотворює ФЧС завади і не впливає на ФЧС відбитого сигналу.

На рис. 6 показані уявлення процесу обробки прийнятих сигналів в часовій області DRFM завади типу C&I, яка має наступні параметри: тривалість  $\tau_{S\&I} = 1$  мс, кількість згенерованих пакетів за час тривалості завади з різною девіацією частоти  $n_{\text{пак}} = 3$ , кількість згенерованих імпульсів у пакеті  $n = 4$ .

АЧС (рис. 6, в) і ФЧС завади типу C&I завжди не збігається з АЧС сигналу від цілі, що імітується. Однак імпульси такої завади можуть добре

обробляться в пристрої 1. Пояснення цьому, на перший погляд нелогічному результату, надаються в розділі 5.

Аналіз результатів моделювання показує принципово різні ефекти від обробки завади в УФ пристроїв 1, 2. Вихідний ефект фільтра стиску під час дії на його вхід імпульсу DRFM завади типу SMSP являє собою суцільний шумоподібний сигнал і маскуватиме стиснутий сигнал від цілі.

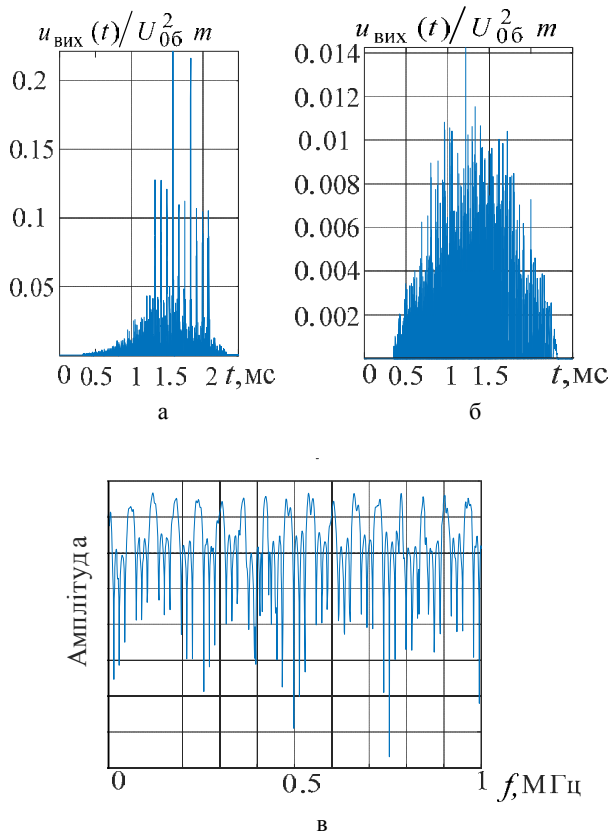


Рисунок 6 – Епюри сигналів на виході УФ пристрою 1 (а) та пристрою 2 (б) в ході подачі на вхід завади типу С&І та АЧС сигналу на вході УФ пристроїв 1, 2 (в)

Вихідний ефект фільтра стиску в ході дії на його вхід імпульсу DRFM завади типу С&І має багатопелюсткову (багатопікову) структуру, створюючи ефект хибних цілей (рис. 6, а). Положення згрупованих хибних цілей є керованим, що забезпечує появу хибних сигналів до або після стиснутого корисного сигналу.

Однак сформовані хибні цілі мають різну інтенсивність через різну кількість фрагментів DRFM завади, які використовуються для їхнього формування.

Тепер нехай на вхід пристроїв 1, 2 діє суміш завади+внутрішній шум+ сигнал, відбитий від цілі. Сигнал від цілі слабкий ( $U_0 = 1$ ) і обмежувач не змінює амплітуду сигналу.

На рис.7,а, б показані епюри напруг на виході УФ пристроїв 1, 2 для модельної ситуації сигнал + завада типу SMPS. Завада випереджає прийнятий від цілі

ЛЧМ сигнал. Вона не перекриває корисний сигнал. Справжній максимум від цілі знаходиться на часовій осі у точці 2 мс.

Змодельована ситуація двох імпульсів завади, кожен з яких дорівнює 0,5 тривалості імпульсу корисного сигналу. Вважається, що сигнал від цілі слабкий, а рівень обмеження вибирається таким, що не обмежує амплітуду сигналу. В даному випадку він дорівнює рівню сигналу від цілі. На рис. 7 видно стиснуті імпульси в точці (2 мс) справжнього знаходження стиснутого від цілі сигналу. Їх амплітуда дорівнює  $U_{0\text{вих}} = 1$ , що, як впливає із теорії, й повинно бути після нормування (див. п. 3). Це є ще одним способом тестування моделі, що використовується.

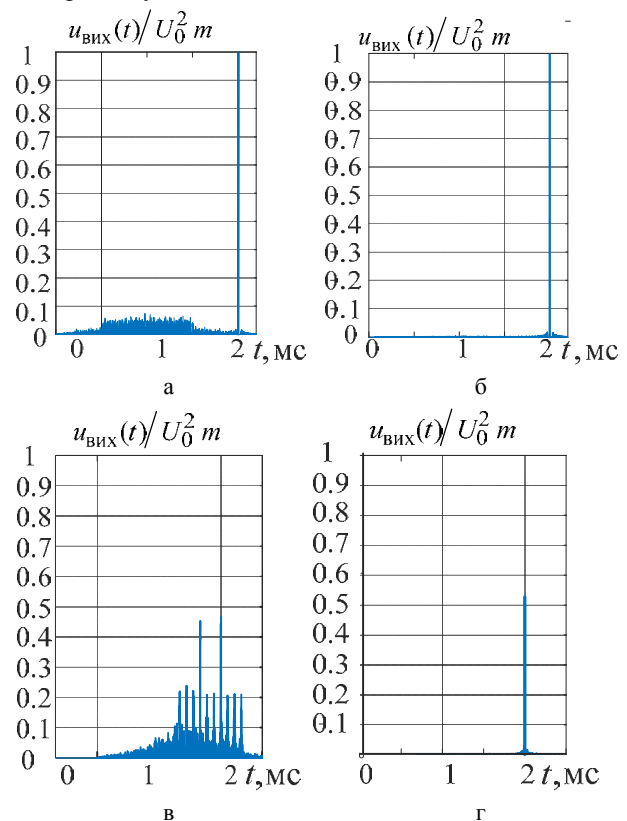


Рисунок 7 – Епюри сигналів на виході УФ пристрою 1 (а, в), пристрою 2 (б, г) під час дії суміші відбитого від цілі сигналу і завади типу SMSP (а, б) і С&І (в, г)

Із рис. 7 випливає, що пристрій 1 з обмежувачем (5) можна використовувати для виявлення сигналів від цілі фоні завади типу SMSP (див. рис. 7, а). Однак вказаний пристрій може бути неефективним під час обробки суміші корисного сигналу і завади типу С&І (див. рис. 7, в). Причина цьому максимуми, сформовані УФ по імпульсам завади.

В той же час пристрій 2 з обмежувачем (6) впевнено виділяє сигнал від цілі. Максимум сформовано в момент закінчення дії ЛЧМ сигналу ( $\tau_0 = 1$  мс) з врахуванням запізнення ( $t_0 = 1$  мс) сигналу.



На рис. 8 приведені графіки ймовірності правильного виявлення сигналу від цілі за кількістю правильних рішень по суміші внутрішній шум приймача + завада + (сигнал від цілі). Завада типу C&I з параметрами, що відповідають умовам моделювання рис. 6.

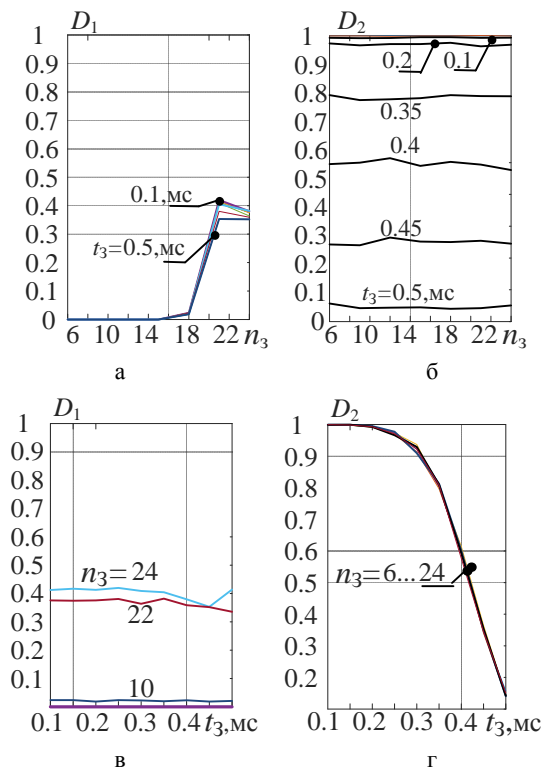


Рисунок 8 – Ймовірність правильного виявлення сигналу від цілі пристроєм 1 (а, в) та пристроєм 2 (б, г)

Завада випереджає прийнятий від цілі ЛЧМ сигнал. Запізнення завади відносно початку відліку змінюється в діапазоні  $t_3 = 0,1 \dots 0,5$  мс, що, відповідно, змінює величину перекриття завади і корисного сигналу на вході УФ. Кількість імпульсів в пакеті теж змінюється в межах  $n_3 = 6 \dots 24$ . Справжній максимум від цілі після УФ знаходиться на часовій осі у точці 2 мс.

Видно, що ймовірність правильного виявлення сигналу від цілі  $D_1$  пристроєм 1 не залежить від величини перекриття сигналів завади і цілі (рис. 8, в) на відміну від відповідної ймовірності  $D_2$  пристрою 2 (рис. 8 г). В свою чергу, ймовірність  $D_2$  пристрою 2 не залежить від кількості імпульсів в заваді (рис. 8, б) на відміну від ймовірності  $D_1$  (рис. 8, а). Загалом, в переважній більшості випадків ймовірність правильного виявлення сигналу від цілі  $D_1$  пристроєм 1 нижча за відповідну ймовірність  $D_2$  пристроєм 2.

Криві рис. 8 якісно ілюструють відмінності в ефективності пристроїв 1, 2. Виграш у значенні  $D$ , що забезпечує пристрій 2, залежить тільки від

величини перекриття корисного сигналу і завади. Конкретні кількісні значення  $D$  можуть відрізнитись (наприклад, під час збільшення порогу виявлення). Але співвідношення між ефективностями пристроїв 1, 2 не зміняться.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результатом проведених досліджень є наступне:

1. Визначено характер негативного впливу DRFM завад на обробку відбитого від цілі сигналу. Завада типу SMSR має імітувально – маскувальний ефект (див. рис.5), а типу C&I – імітувальний та формує відмітки від неіснуючих цілей (див. рис.6).

2. Відомі способи захисту від ВІЗ не придатні для зниження негативного впливу DRFM завади на обробку сигналу, відбитого від цілі.

3. Пристрій з двостороннім обмежником амплітуди на вході фільтра стиску, що зазвичай використовується для заглушення ВІЗ, неефективний для заглушення DRFM завади.

4. Пристрій з двостороннім обмежником амплітуди на вході УФ знижує відношення сигнал/шум, якщо амплітуда сигналу, відбитого від цілі, більше рівня порогу обмеження.

5. Як фільтр стиску для малобазових ЛЧМ сигналів може використовуватись фільтр, узгоджений з ЛЧМ сигналом з великою базою, хоча такі УФ не призначені для обробки ЛЧМ сигналів з малими базами. Дана обставина пояснює ефект формування хибних відміток від DRFM завади типу C&I.

6. Визначені умови узгодженої фільтрації малобазових імпульсних ЛЧМ в фільтрах, узгоджених з сигналами з великими базами. Достатньою умовою є збіг ФЧС малобазового сигналу з відповідною ділянкою ФЧС великобазового сигналу.

7. Обмеження рівня сигналів перед їх обробкою в фільтрі стиску усуває енергетичну перевагу завади над корисним сигналом, але не впливає на форму ФЧС завади. Ця особливість амплітудних обмежувачів є причиною неефективної обробки корисного сигналу на фоні DRFM завади типу C&I в пристроях амплітудний обмежувач – УФ.

8. Заглушити потужні відповідні імпульсні завади можливо вилученням спектральних складових завади із спектра вхідної суміші. В основі запропонованого методу заглушення ВІЗ лежить природне припущення про належність до відліків завади потужних відліків вхідної суміші. В ході цифрової обробки реалізується обнулінням відліків, що перевищують заданий рівень обмеження.

В наступному розділі надаються пояснення отриманим результатам.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Спочатку обґрунтуємо різні результати фільтрації у фільтрі стиску завад типу SMSR (рис. 5), (рис. 7, а,б) і типу S&I (рис. 6), (рис. 7. в,г). Зазначимо, що завади у фільтрі обробляються по-імпульсно, а стиснення

імпульсу відбувається у випадку збігу ФЧС завади і ФЧС ЛЧМ сигналу.

Неважко показати, що ФЧС імпульсу завади типу SMSR і типу S&I описуються, відповідно, наступними виразами:

$$\theta_{x.3}(f) = -\frac{\tau_{3,i}(f-f_0)^2}{\Delta f_0} \quad (7)$$

$$\theta_{x.3}(f) = -\frac{\tau_0 f^2}{\Delta f_0},$$

$$(f_{03}(i) - \frac{\Delta f_{03}}{2}) < f \leq (f_{03}(i) + \frac{\Delta f_{03}}{2}), \quad (8)$$

$$f_{03}(i) = f_{03}(i-1) + \frac{\Delta f_0}{n}.$$

На рис. 9 показані нормовані до бази  $m$  сигналу ФЧС імпульсів завади типу SMSR (а) і типу S&I (б). Криві 1 на графіках відповідають ФЧС сигналу з девіацією частоти  $\Delta f_0 = 1$  МГц, тривалістю  $\tau_0 = 1$  мс.

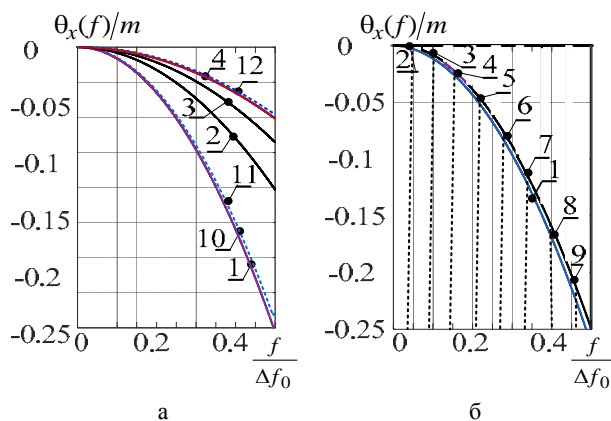


Рисунок 9 – ФЧС імпульсу завади типу SMSR (а) і типу S&I (б)

Криві 2–8 відображають ФЧС імпульсів завади відповідного типу, розрахованих за формулами (7), (8). Криві 11, 12 одержані експериментально. Тривалість імпульсів завади типу SMSR складала  $\tau_{i.3} = \tau_0$  (крива 10),  $\tau_{i.3} = (1/2)\tau_0$  (крива 2),  $\tau_{i.3} = (1/3)\tau_0$  (крива 3),  $\tau_{i.3} = (1/4)\tau_0$  (крива 4). Кількість імпульсів типу S&I  $n_3 = 8$ , тривалість кожного  $\tau_{i.3} = (1/8)\tau_0$ , а девіація частоти  $(1/8) \cdot \Delta f_0$ .

Видно, що ФЧС імпульсу завади типу SMSR (рис. 9, а) за  $n > 1$  відрізняється від ФЧС ЛЧМ сигналу. Оскільки фільтр стиску узгоджений з імпульсом сигналу й не є узгодженим для фрагмента імпульсу DRFM завади, яка має іншу крутість частотної модуляції (див. рис. 2), то вихідні ефекти сигналу і фрагмента завади (див. рис. 3) суттєво відрізняються.

ВІЗ типу SMSP – це ЛЧМ імпульси завади з девіацією частоти корисного сигналу, але в загальному випадку іншою тривалістю імпульсів тобто з величиною бази, що відрізняється від бази ЛЧМ сигналу.

Якщо завада містить один імпульс тривалістю  $\tau_{i.3} = \tau_{i.c}$ , то на виході УФ формується максимум з амплітудою, пропорційною енергії завади (див. рис. 5, а). Ситуація відповідає узгодженій фільтрації корисного сигналу.

Якщо завада складається з одного імпульсу тривалістю  $\tau_{i.3} = 0,5 \tau_{i.c}$ , то на виході УФ максимум розмивається (розширюється і зменшується за амплітудою). Максимум на виході УФ розширюється в ході зміни  $\tau_{i.c}$  в різні сторони від  $\tau_{i.c} = 1$  мс.

Якщо завада сформована як два з'єднані імпульси тривалістю  $\tau_{i.3} = 0,5 \tau_{i.c}$ , то на виході УФ максимум є суміш результатом обробки кожного. Результат – в два рази ширший розмитий імпульс, амплітуда якого може перевищувати амплітуду відгуку УФ на ЛЧМ сигнал (див. рис. 5). Завада маскує відбиття від цілі.

Формування піків і провалів у сумарному відгуку фільтра на DRFM завади типу SMSP залежить від співвідношення амплітуд і фаз у відгуках фільтра на кожний фрагмент завади. Причому кількість вихідних піків може перевищувати кількість вхідних фрагментів завади.

На відміну від ФЧС рис. 9, а результуючий ФЧС завади типу S&I (рис. 9, б, криві 2–9) являє собою суму спектрів кожного імпульсу завади. Середні частоти спектрів послідовно, починаючи зі спектра першого імпульсу, зсуваються на фіксовану величину  $f_{зсув} = \Delta f_0 / (n_3)$ . ФЧС окремого імпульсу завади повторює відповідну ділянку ФЧС ЛЧМ сигналу. Таким чином виконуються умови узгодженої фільтрації як ЛЧМ сигналу, так і ЛЧМ завади. Завдяки цій обставині формуються стиснуті імпульси для кожного імпульсу завади (див. рис. 7, в).

Амплітуди максимумів на виході УФ пропорційні енергії вхідних сигналів. Тобто за традиційно значно більшої енергії завади порівняно з прийнятим відбитим сигналом формуються максимуми, які є імітацією сигналу від цілі.

Фізичне пояснення ефективного процесу обробки суміші ВІЗ і прийнятого ЛЧМ сигналу в УФ пристрою 2 полягає у природному припущенні, що потужна завада проявлятиметься у великих амплітудах дискрет в ході дискретизації за часом прийнятої суміші. Обнуління цих дискрет приводить до спотворення часової структури завади, але не чіпає дискрет слабкого сигналу від цілі. Амплітуда стиснутого сигналу зменшується пропорційно величині перекриття сигналу завади (див. рис. 8).

Відмінність в «поведінці» кривих на рис. 8, що відповідають пристроям 1, 2, полягає у різних підходах до усунення негативного впливу завади на результат обробки вхідної суміші. Зменшення

значення  $D_2$  (рис. 8, г) пропорційно збільшенню величини перекриття сигналу і завади ( $n_3$ ) пояснюється збільшенням кількості дискрет вхідного сигналу, що містять суміш завади + сигнал, і будуть обнулятися в обмежувачі (2). Дана обставина пояснює незалежність  $D_2$  від  $n_3$  (рис. 8, б).

Зростання значень  $D_1$  відповідно збільшенню  $n_3$  (рис. 8, а) обумовлено «попаданням» стиснутого імпульсу, сформованого УФ по одному імпульсу із набору імпульсів завади, в місце справжнього положення відгуку УФ на сигнал від цілі.

### ВИСНОВКИ

У статті розв'язано задачу виділення ЛЧМ сигналу, відбитого від цілі, на фоні відповідних імітувальних завад.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що набула подальшого розвитку практика завадозахисту РЛС з імпульсними ЛЧМ зондувальними сигналами від ВІЗ, а саме запропоновано пристрій, що виявляє відбитий сигнал на фоні ВІЗ такому сигналу.

Набула подальшого розвитку практика узгодженої фільтрації складних сигналів, а саме визначені умови узгодженої фільтрації малобазових імпульсних ЛЧМ сигналів у фільтрах, узгоджених із сигналами з великими базами. Достатньою умовою є збіг ФЧС малобазового сигналу з відповідною ділянкою ФЧС великобазового сигналу.

Практична цінність досліджень полягає в тому, що запропонований пристрій обробки, який в переважній більшості практичних випадків забезпечує приблизно вдвічі більше значення ймовірності правильного виявлення сигналу, відбитого від цілі, порівняно з відомими пристроями обробки.

### ПОДЯКИ

Робота проведена за підтримки держбюджетної науково-дослідної роботи Харківського національного університету радіоелектроніки «Методи і засоби виявлення безпілотних літальних апаратів системи захисту військових і критично важливих об'єктів інфраструктури» (№ держ. реєстрації – 0121U109998).

### ЛІТЕРАТУРА

1. Cancellation of complicated DRFM range false targets via temporal pulse diversity / Gang Lu [et al.] // *Progress In Electromagnetics Research C.* – 2010. – Vol. 16. – P. 69–84. <https://doi.org/10.2528/PIERC10061401>
2. Chen X. Y. DRFM-Based Jamming Signal Recognition Method Guided by Target Detection / Xiao Ying Chen, Ying Liu, Cheng Wang // *Procedia Computer Science.* – 2023. – Vol. 221. – P. 1013–1020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.08.082>
3. Compound Radar Jamming Recognition Based on Signal Source Separation / Hongping Zhou [et al.] // *Signal*

- Processing. – 2023. – P. 109246. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109246>
4. Smolyakov A. Design of DRFM-based Several Radar Targets Simulator Using FPGA / A. Smolyakov, A. Podstrigaev // *In 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 26–29 January 2021 : proceedings.* – Saint Petersburg, 2021. – P. 1694–1699. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396154.
5. ECM techniques to counter pulse compression radar: patent 7.081.846 B1 United States Wilmington DE (US): G01S7/38 / M. J. Sparrow, J. Cikaló. – No. 10/877.192 ; applied on 25.06.2004 ; published on 25.07.2006. – 14 p.
6. Cook C. *Radar Signals: An Introduction to Theory and Application* / Charles Cook. – [S. l.] : Elsevier Science & Technology Books, 2012.
7. Pulse DRFM jamming formation and its mathematical simulation / [V. Riabukha, A. Semeniaka, Ye. Katiushyn, D. Atamanskiy] // *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, Ukrainian, 14–18 November 2022: proceedings.* – Ukrainian, 2022. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037145.
8. Simulation research on classification and identification of typical active jamming against LFM radar / Meng Gao et al. // *Eleventh International Conference on Signal Processing Systems, Chengdu, China, 15–17 November 2019 / ed. by K. Mao.* – [S. l.], 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2559607>
9. JRNet: Jamming Recognition Networks for Radar Compound Suppression Jamming Signal / Qizhe Qu et al. // *IEEE Transactions on Vehicular Technology.* – 2020. – P. 1. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.3032197>
10. Fast Complex-Valued CNN for Radar Jamming Signal Recognition [Electronic resource] / Haoyu Zhang et al. // *Remote Sensing.* – 2021. – Vol. 13, No. 15. – P. 2867. <https://doi.org/10.3390/rs13152867>
11. SAR Image Active Jamming Type Recognition Based on Deep CNN Model[J] / Chen Siwei et al. // *Journal of Radars.* – 2022. – Vol. 11, No. 5. – P. 897–908. doi: 10.12000/JR22143.
12. Jamming recognition algorithm based on variational mode decomposition / Hongping Zhou et al. // *IEEE Sensors Journal.* – 2023. – Vol. 23, No. 15. – P. 17341–17349. doi: 10.1109/JSEN.2023.3283397.
13. One-dimensional Radar Active Jamming Signal Recognition Method Based on Bayesian Deep Learning / Ma B. J. et al. // *Signal Process.* – 2023. – Vol. 39. – P. 235–243. <https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.02.005>.
14. Open world recognition of communication jamming signals [Electronic resource] / Yan Tang et al. // *China Communications.* – 2023. – Vol. 20, No. 6. – P. 199–214. <https://doi.org/10.23919/jcc.2023.00.029>
15. Meng Y. Multi-Label Radar Compound Jamming Signal Recognition Using Complex-Valued CNN with Jamming Class Representation Fusion / Yunyun Meng, Lei Yu, Yinsheng Wei // *Remote Sensing.* – 2023. – Vol. 15, No. 21. – P. 5180. <https://doi.org/10.3390/rs15215180>
16. Method for detecting DRFM deception jamming based on LFM rate matching / Y. Lu et al. // *Journal of Xidian University.* – 2014. – Vol. 41. – P. 67–73. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2014.05.012.
17. Radar signal recognition based on singular value entropy and fractal dimension / Z. Qu et al. // *Systems Engineering and Electronics.* – 2018. – Vol. 40, No. 2. – P. 303–307. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.02.10.

18. Time-frequency domain feature extraction algorithm based on linear discriminant analysis / Liu Lifang et al. // *Systems Engineering and Electronics*. – 2019. – Vol. 41, No. 10. – P. 2184–2190. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.10.05.
19. LPI Radar Waveform Recognition Based on Multi-Resolution Deep Feature Fusion / Xue Ni et al. // *IEEE Access*. – 2021. – Vol. 9. – P. 26138–26146. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3058305>
20. Radar Deception Jamming Recognition Based on Weighted Ensemble CNN With Transfer Learning / Qinzhe Lv et al. // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2022. – Vol. 60. – P. 1–11. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3129645>
21. Zhou H. Recognition of Radar Compound Jamming Based on Convolutional Neural Network / Hongping Zhou, Lei Wang, Zhongyi Guo // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 2023. – Vol. 59, No. 6. – P. 7380–7394. <https://doi.org/10.1109/taes.2023.3288080>
22. Skolnik M. I. *Radar Handbook* / Merrill I. Skolnik. – [S. l.] : McGraw-Hill Education, 2021. – 1408 p.
23. Van Brandt L. B. *Handbook of methods of electronic suppression and jamming systems with radar control* / L. B. Van Brandt. – USA. : EW Engineering, Inc, 1978. – 504 p.
24. Chasovsky V. A. *Digital System of Asynchronous Pulse Noise Cancellation* / V. A. Chasovsky, M. P. Chernoborodov // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2003. – Vol. 59, № 1–2. – P. 151–159. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v59.i12.160>

Received 24.01.2024.  
Accepted 25.07.2024.

UDC 621.396.96:551.501.815

### THE METHODS OF PROTECTION FROM THE PULSE DRFM JAMMING

**Atamanskyi D. V.** – Dr. Sc., Professor, Professor, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

**Riabukha V. P.** – Dr. Sc., Professor, Professor, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

**Vasylyshyn V. I.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

**Semeniaka A. V.** – PhD, Senior Researcher, Kharkiv National University of radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

**Katyushyn E. A.** – Researcher, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

**Stovba R. L.** – Teacher, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The repeater reusable pulse jamming like DRFM (Digital Radio Frequency Memory) significantly complex the radar situation for radar with LFM probing signals. Besides of the marks from the existing targets the other marks are arising on the radar PPI-screen that simulate analogous to them false targets. The known methods of struggle with the repeater reusable pulse jamming like DRFM are inefficient that caused by specificity of the jamming. The synthesis of the methods of the struggle with such jamming is the actual problem

**Objective.** The estimation of possibilities of the known methods of noise immunity for reduction of the negative influence of pulse jamming like DFRM on the processing of the useful signals and suggestion of the alternative method of LFM signal processing on the DFRM jamming background.

**Method.** The efficiency of the methods is defined experimentally on the results of simulation and comparison of them with the known results presented in the literature

**The results.** The inefficiency of the known methods of protection from repeater pulse jamming for reduction of the negative influence of DRFM jamming on the processing of the signal reflected from the target is justified. The character of negative influence of DRFM jamming on the processing of the signal reflected from the target is defined. These jammings can create as masking effect as imitate the marks from the non-existing targets. It is shown, that device with two-side amplitude limitation on the input of compression filter which traditionally used for suppression of repeater pulse jamming is inefficient for suppression of DRFM jamming.

It is shown, that as compression filter for LFM signals with small base the filter matched with big base LFM signal can be used. However, these matched filters are not designed for LFM signal with small bases.

The conditions of matched filtration of small base pulse LFM signals in the filters matched with big base signal are defined. The sufficient condition of the matched filtration of small base signal is coinciding of their phase frequency characteristic with corresponding area of the phase frequency characteristic of the big base signal. This fact explains the effect of forming of the maximums on the output of compression filter for pulsed of DRFM jamming and the effect of forming of false marks from targets

It is shown that limitation of the level of signals before their processing in the compression filter remove the energetic advantage of jamming above useful signal, however, do not influences in the form of phase frequency characteristic of jamming. This detail of the amplitude limiter is the reason of ineffective processing of the useful signal on the background of DRFM jamming in the devices like amplitude limiter-compression filter.

The method of suppression of repeater pulse jamming is proposed. The natural assumption about correspondence of powerful samples of the input mixture to jamming samples is on the base of this method

In the case of digital processing this can be realised by nullifying the samples which are above the defined level of limiter. It is shown that processing devices, which uses such limitation, provides the effective processing of the useful signal on the background of DRFM jamming.

**Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results is in the further development of practice of noise immunity of the radar with LFM probing signal, specifically the device that detects the reflected signal on the background of the repeater pulse jamming is proposed. The practice of matched filtration of complex signals obtains the further development, namely, the conditions of matched filtration of LFM signals with small base in the filters matched with the signals with big bases are determined. The



sufficient condition is the coincidence of phase frequency spectrum of the small base signal with corresponding area of phase frequency spectrum of the big base signal.

The practical importance of investigation is that the processing device is proposed. This device provides the value of correct detection of the signal reflected from the target approximately twice as much to the known processing devices in the most cases.

**KEYWORDS:** method, DRFM jamming, LFM pulse, radar, mathematical simulation, repeater pulse jamming.

#### REFERENCES

1. Gang Lu et al. Cancellation of complicated DRFM range false targets via temporal pulse diversity, *Progress In Electromagnetics Research C*, 2010, Vol. 16, pp. 69–84. <https://doi.org/10.2528/pierc10061401>
2. Chen X. Y., Liu Y., Wang C. DRFM-Based Jamming Signal Recognition Method Guided by Target Detection, *Procedia Computer Science*, 2023, Vol. 221, pp. 1013–1020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.08.082>
3. Zhou Hongping et al. Compound Radar Jamming Recognition Based on Signal Source Separation, *Signal Processing*, 2023, P. 109246. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2023.109246>
4. Smolyakov A., Podstrigaev A. Design of DRFM-based Several Radar Targets Simulator Using FPGA, In *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, Saint Petersburg, Russia, 26–29 January 2021 : proceedings*. Saint Petersburg, 2021, pp. 1694–1699. doi: 10.1109/EIConRus51938.2021.9396154.
5. Sparrow M. J., Cikaló J. ECM techniques to counter pulse compression radar: patent 7.081.846 B1 United States Wilmington DE (US): G01S7/38/, No. 10/877.192; applied on 25.06.2004; published on 25.07.2006, 14 p.
6. Cook C. Radar Signals: An Introduction to Theory and Application, [S. l.]: Elsevier Science & Technology Books, 2012.
7. Riabukha V., Semeniaka A., Katiushyn Ye., Atamanskiy D. Pulse DRFM jamming formation and its mathematical simulation, *2022 IEEE 2nd Ukrainian Microwave Week, Ukrainian, 14–18 November 2022: proceedings*. Ukrainian, 2022. doi: 10.1109/UkrMW58013.2022.10037145.
8. Gao Meng et al. ed. by K. Mao Simulation research on classification and identification of typical active jamming against LFM radar, *Eleventh International Conference on Signal Processing Systems*. Chengdu, China, 15–17 November 2019, [S. l.], 2019. <https://doi.org/10.1117/12.2559607>
9. Qu Qizhe et al. JRNet: Jamming Recognition Networks for Radar Compound Suppression Jamming Signal], *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, P. 1. <https://doi.org/10.1109/tvt.2020.3032197>
10. Zhang Haoyu et al. Fast Complex-Valued CNN for Radar Jamming Signal Recognition [Electronic resource], *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 15, P. 2867. <https://doi.org/10.3390/rs13152867>
11. Chen Siwei et al. SAR Image Active Jamming Type Recognition Based on Deep CNN Model[J], *Journal of Radars*, 2022, Vol. 11, No. 5, pp. 897–908. doi: 10.12000/JR22143.
12. Zhou Hongping et al. Jamming recognition algorithm based on variational mode decomposition, *IEEE Sensors Journal*, 2023, Vol. 23, No. 15, pp. 17341–17349. doi: 10.1109/JSEN.2023.3283397.
13. Ma B. J. et al. One-dimensional Radar Active Jamming Signal Recognition Method Based on Bayesian Deep Learning, *Signal Process*, 2023, Vol. 39, pp. 235–243. <https://doi.org/10.16798/j.issn.1003-0530.2023.02.005>.
14. Tang Yan et al. Open world recognition of communication jamming signals [Electronic resource], *China Communications*, 2023, Vol. 20, No. 6, pp. 199–214. <https://doi.org/10.23919/jcc.2023.00.029>
15. Meng Y., Yu L., Wei Y. Multi-Label Radar Compound Jamming Signal Recognition Using Complex-Valued CNN with Jamming Class Representation Fusion, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 21, P. 5180. <https://doi.org/10.3390/rs15215180>
16. Lu Y. et al. Method for detecting DRFM deception jamming based on LFM rate matching, *Journal of Xidian University*, 2014, Vol. 41, pp. 67–73. doi: 10.3969/j.issn.1001-2400.2014.05.012.
17. Qu Z. et al. Radar signal recognition based on singular value entropy and fractal dimension, *Systems Engineering and Electronics*, 2018, Vol. 40, No. 2, pp. 303–307. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2018.02.10.
18. Lifang L. et al. Time-frequency domain feature extraction algorithm based on linear discriminant analysis, *Systems Engineering and Electronics*, 2019, Vol. 41, No. 10, pp. 2184 – 2190. doi: 10.3969/j.issn.1001-506X.2019.10.05.
19. Ni Xue et al. LPI Radar Waveform Recognition Based on Multi-Resolution Deep Feature Fusion, *IEEE Access*, 2021, Vol. 9, pp. 26138–26146. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3058305>
20. Lv Qinzhe et al. Radar Deception Jamming Recognition Based on Weighted Ensemble CNN With Transfer Learning *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, Vol. 60, P. 1–11. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2021.3129645>
21. Zhou H., Wang L., Guo Z. Recognition of Radar Compound Jamming Based on Convolutional Neural Network, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2023, Vol. 59, No. 6, pp. 7380–7394. <https://doi.org/10.1109/taes.2023.3288080>
22. Skolnik M. I. Radar Handbook. [S. l.], McGraw-Hill Education, 2021, 1408 p.
23. Van Brandt L. B. Handbook of methods of electronic suppression and jamming systems with radar control. USA., EW Engineering, Inc, 1978, 504 p.
24. Chasovsky V. A., Chernoborodov M. P. Digital System of Asynchronous Pulse Noise Cancellation, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2003, Vol. 59, № 1–2, pp. 151–159. <https://doi.org/10.1615/telecomradeng.v59.i12.160>

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 004.94, 51–74, 517.968.21

### METHOD FOR SIGNAL PROCESSING BASED ON KOLMOGOROV- WIENER PREDICTION OF MFSD PROCESS

**Gorev V. N.** – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Physics, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

**Shedlovska Y. I.** – PhD, Associate Professor of the Department of Information Technology and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

**Laktionov I. S.** – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Computer Systems Software, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

**Diachenko G. G.** – PhD, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

**Kashtan V. Yu.** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Computer Engineering, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

**Khabarлак K. S.** – PhD, Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** We investigate a method to signal processing based on the Kolmogorov-Wiener filter weight function calculation for the prediction of a continuous stationary heavy-tail process in the MFSD (multifractal fractional sum-difference) model. Such a process may describe telecommunication traffic in some systems with data packet transfer, the consideration of the continuous filter may be reliable in the case of the large amount of data.

**Objective.** The aim of the work is to obtain an approximate solution for the Kolmogorov-Wiener filter weight function and to show the applicability of the method to signal processing used in the paper.

**Method.** The Galerkin method based on the orthogonal Chebyshev polynomials of the first kind is used for the calculation of the weight function under consideration. The approximations up to the thirteen-polynomial one are investigated. The corresponding integrals are calculated numerically on the basis of the Wolfram Mathematica package. The higher is the packet rate, the higher accuracy of the integral calculation is needed.

**Results.** It is shown that for rather large number of polynomials the misalignment between the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation under consideration is rather small for the obtained solutions. The corresponding mean absolute percentage errors of misalignment for different packet rates are calculated. The method to signal processing used in the paper leads to reliable results for the Kolmogorov-Wiener filter weight function for the prediction of a process in the MFSD model.

**Conclusions.** The theoretical fundamentals of the continuous Kolmogorov-Wiener filter construction for the prediction of a random process in the MFSD model are investigated. The filter weight function is obtained as an approximate solution of the Wiener-Hopf integral equation with the help of the Galerkin method based on the Chebyshev polynomials of the first kind. It is shown that the obtained results for the filter weight function are reliable. The obtained results may be useful for the practical telecommunication traffic prediction. The paper results may also be applied to the treatment of heavy-tail random processes in different fields of knowledge, for example, in agriculture.

**KEYWORDS:** Kolmogorov-Wiener filter weight function, telecommunication traffic, Galerkin method, MFSD model, Chebyshev polynomials of the first kind, stationary random heavy-tail process.

#### ABBREVIATIONS

GFSD is the Gaussian fractional sum-difference;  
ARIMA is an autoregressive integrated moving average;  
MFSD is a multifractal fractional sum-difference;  
MAPE is a mean absolute percentage error.

#### NOMENCLATURE

$T$  is a time interval on which the traffic data are observed;  
 $p/s$  packets per second;  
 $z$  is a time interval for which the traffic prediction should be made;  
 $h(t)$  is the Kolmogorov-Wiener filter weight function;  
 $\alpha$  is a packet rate;



$\theta, \lambda, \xi$  are auxiliary quantities which depend on the packet rate;

$R(t)$  is a traffic correlation function in the MFSD model;

$\rho(t)$  is a traffic correlation function in the GFSD model;

$\Gamma(x)$  is a gamma function;

$d$  is a fractional differencing parameter of the model;

$a, b$  are auxiliary constants;

$n$  is a number of polynomials in the corresponding approximations;

$g_s$  are coefficients multiplying the polynomials;

$S_s(t)$  are Chebyshev polynomials of the first kind orthogonal on  $t \in [0, T]$ ;

$T_s(x)$  are Chebyshev polynomials of the first kind orthogonal on  $x \in [-1, 1]$ ;

Left( $t$ ) is a left-hand side of the Wiener-Hopf integral equation;

Right( $t$ ) is a right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation;

$G_{ks}$  are integral brackets;

$B_k$  are free terms in the linear system of algebraic equations in  $g_s$ ;

$K, N, L$  are numbers of points in the numerical integration.

## INTRODUCTION

Telecommunication traffic nowadays is usually treated as a heavy-tail random process; see, for example, [1]. The traffic prediction is an important problem for telecommunications. Improving the accuracy of traffic prediction can help companies to develop adequate business planning and improve the economic benefits. Moreover, accurate prediction results can also be urgent for optimal resource management, sophisticated network design, and so on, see [2–4]. Recently several models of the heavy-tail stationary heavy-tail processes which may describe telecommunication traffic were proposed, for example, the generalized fractional Gaussian noise model [5, 6] and the GFSD and the MFSD models [7].

There are a plenty of different methods for traffic prediction, for example, such as ARIMA, neural networks, etc., see, for example, [2, 4, 8]. Recently in our papers we investigated such a simple prediction method as the one based on the Kolmogorov-Wiener filter.

It was shown that both continuous and discrete Kolmogorov-Wiener filter may be applied to the prediction of heavy-tail data if the data are smooth enough [9]. As is known, see, for example, [9], in the continuous case the Kolmogorov-Wiener filter weight function obeys the Wiener-Hopf integral equation. This equation can be solved on the basis of the Galerkin method, see the method description, for example, in [10] and references therein. In particular, it was shown that the Galerkin method

may be applied to the solution of the corresponding Wiener-Hopf equation in the case of the GFSD and the generalized fractional Gaussian noise models, see [11, 12]. But the investigation of the Wiener-Hopf equation solution for the process in the framework of the MFSD model is not yet done. So, this paper is devoted to the search of an approximate solution of the Wiener-Hopf integral equation in the case where the corresponding continuous Kolmogorov-Wiener filter is used to the prediction of the heavy-tail process in the MFSD model.

**The object of study** is the Kolmogorov-Wiener filter for the prediction of continuous heavy-tail process in the MFSD model.

**The subject of study** is the weight function of the corresponding filter.

**The aim of the work** is to obtain an approximate solution for the weight function on the basis of Galerkin method.

## 1 PROBLEM STATEMENT

The Kolmogorov-Wiener filter weight function in the continuous case obeys the following Wiener-Hopf equation (see, for example, [9]):

$$\int_0^T d\tau h(\tau) R(t-\tau) = R(t+z). \quad (1)$$

The problem statement is as follows: to obtain the unknown filter weight function as an approximate solution of the integral equation (1) on the basis of the Galerkin method.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The MFSD model of a stationary random heavy-tail process which may describe telecommunication traffic was proposed in [7]. In some sense, the MFSD model is a modification of the GFSD model which was also proposed in [7].

Our recent papers were devoted to the development of the theoretical fundamentals of the continuous Kolmogorov-Wiener filter construction for the prediction of stationary processes in different models; see [11–13]. In particular, paper [11] was devoted to the corresponding investigation for the GFSD model. However, the MFSD model was not investigated in our previous papers.

In this paper we investigate the continuous Kolmogorov-Wiener filter applied to the prediction of the telecommunication traffic described by the MFSD model. The Wiener-Hopf integral equation (1) is solved on the basis of the Galerkin method [10], the Chebyshev polynomials of the first kind are chosen as the required orthogonal function system. The numerical investigation of the misalignment between the left-hand side and the right-hand side for the obtained solutions is made. It is shown that the proposed method leads to reliable results.

### 3 MATERIALS AND METHODS

According to [7], the traffic correlation function for the discrete MFSD model is as follows:

$$R(t) = \frac{e^{\xi(\alpha)\rho(t)} - 1}{e^{\xi(\alpha)} - 1} \quad (2)$$

where

$$\begin{aligned} \rho(t) &= (1 - \theta(\alpha)) \frac{2(1-d)t^2 - (1-d)^2}{t^2 - (1-d)^2} \times \\ &\times \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(t+d)}{\Gamma(t-d+1)}, \\ \theta(\alpha) &= \frac{2^{-7.21} \alpha^{0.75}}{2^{-7.21} \alpha^{0.75} + 1}, \end{aligned} \quad (3)$$

and

$$\begin{aligned} \xi(\alpha) &= \ln \left( \Gamma \left( 1 + \frac{2}{\lambda(\alpha)} \right) \right) - 2 \ln \left( \Gamma \left( 1 + \frac{1}{\lambda(\alpha)} \right) \right), \\ \lambda(\alpha) &= \frac{2^{-5.36} \alpha^{0.63}}{2^{-5.36} \alpha^{0.63} + 1}, \end{aligned} \quad (4)$$

the packet rate  $\alpha \in [2^{10.22} \text{ p/s}, 2^{17.5} \text{ p/s}]$ ,  $d = 0.31$ , see [7]. The definition of the Gamma function  $\Gamma(x)$  is given, for example, in [14]. The asymptotic behavior of  $R(t)$  at  $t \rightarrow +\infty$  is  $R(t) \sim \text{const} \cdot t^{2d-1}$  [7], so the MFSD model describes a heavy-tail process. In [7] it is indicated that the results (2) and (3) are valid for  $t \geq 1$ . In [11] it is proposed to redefine the function  $\rho(t)$  for the continuous case as follows:

$$\rho(t) = \begin{cases} a|t|^b + 1, |t| \leq 1 \\ (1 - \theta(\alpha)) \frac{2(1-d)t^2 - (1-d)^2}{t^2 - (1-d)^2} \times \\ \times \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(|t|+d)}{\Gamma(|t|-d+1)}, |t| \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

where the values  $a$ ,  $b$  are chosen in such a way that

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow 1-0} \rho(t) &= \lim_{t \rightarrow 1+0} \rho(t), \\ \lim_{t \rightarrow 1-0} \frac{d\rho(t)}{dt} &= \lim_{t \rightarrow 1+0} \frac{d\rho(t)}{dt}. \end{aligned} \quad (6)$$

So, in what follows we use the correlation function  $R(t)$  in the form (2) where the function  $\rho(t)$  is taken according to (5) and (6).

Similarly to the calculations [11], the weight function is sought in the form

$$h(\tau) = \sum_{s=0}^{n-1} g_s S_s(\tau), \quad S_s(\tau) = T_s \left( \frac{2\tau}{T} - 1 \right) \quad (7)$$

where the coefficients  $g_s$  obey the following system of linear algebraic equations:

$$\begin{aligned} \sum_{s=0}^{n-1} g_s G_{ks} &= B_k, \quad k = \overline{0, n-1}, \\ G_{ks} &= \int_0^T \int_0^T d\tau dt S_k(t) S_s(\tau) R(t-\tau), \\ B_k &= \int_0^T dt S_k(t) R(t+z). \end{aligned} \quad (8)$$

The free terms  $B_k$  are calculated with the help of the Wolfram Mathematica package on the basis of the NIntegrate procedure built in the package. As for the calculation of the integral brackets  $G_{ks}$ , the NIntegrate procedure requires too much computation time, so the integral brackets are approximately calculated as follows:

$$\begin{aligned} G_{ks} &\approx \Delta^2 \sum_{i,j=0}^{K-1} S_k \left( i\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) S_s \left( j\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) R(i\Delta - j\Delta), \\ \Delta &= T/K, \end{aligned} \quad (9)$$

it should be stressed that only the calculation of  $G_{ks}$  where  $k$  and  $s$  are of the same parities is needed;  $G_{ks} = 0$  if  $k$  and  $s$  are of different parities, see [11] and references therein. Expression (9) on the basis of the fact that the function  $R(t)$  is an even one may be rewritten as

$$\begin{aligned} G_{ks} &\approx \Delta^2 \sum_{i=1}^{K-1} \sum_{j=0}^{i-1} \left( S_k \left( i\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) S_s \left( j\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) + \right. \\ &+ S_k \left( j\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) S_s \left( i\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) \left. \right) R(i\Delta - j\Delta) + \\ &+ \Delta^2 \sum_{i=0}^{K-1} S_k \left( i\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) S_s \left( i\Delta + \frac{1}{2}\Delta \right) R(0). \end{aligned} \quad (10)$$

So, first of all the quantities  $G_{ks}$  and  $B_k$  should be calculated on the basis of (8) and (10). Then the coefficients  $g_s$  are calculated as the solution of the system (8), the corresponding calculations are made in the Wolfram Mathematica package. The obtained weight function  $h(t)$  is given by (7).

The left-hand side and the right-hand side of the integral equation (1) for the obtained solutions are as follows:

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) &= \int_0^T d\tau h(\tau) R(t-\tau), \\ \text{Right}(t) &= R(t+z), \end{aligned} \quad (11)$$

the calculation of the weight function  $h(t)$  is described above in detail. The corresponding misalignment is described by the MAPE:

$$\text{MAPE} = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{\text{Left}(t) - \text{Right}(t)}{\text{Right}(t)} \right| dt \cdot 100\% . \quad (12)$$

The corresponding integrals can hardly be calculated, so they are estimated as follows, see [11, 12]:

$$\text{MAPE} \approx \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \left| \frac{\text{Left}\left(\frac{jT}{N}\right) - \text{Right}\left(\frac{jT}{N}\right)}{\text{Right}\left(\frac{jT}{N}\right)} \right| \cdot 100\% ; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) \approx & \frac{\delta}{2} \sum_{j=0}^{L-1} (h(j\delta)R(t-j\delta) + \\ & + h((j+1)\delta)R(t-(j+1)\delta)), \quad \delta = T/L. \end{aligned}$$

The corresponding numerical results are given in the next section.

#### 4 EXPERIMENTS

The following values of the parameters are chosen:  $T = 100$ ,  $z = 3$ , a similar choice is made in [11].

The numerical results for the coefficients  $a$ ,  $b$  for different packet rates are given in Table 1, the results in Table 1 are written rounded off to 3 significant digits.

Table 1 – Results for the coefficients in (5) for different packet rates

$\alpha$ , p/s	$a, b$
$2^{11}$	$a = -0.746$ , $b = 0.381$
$2^{13}$	$a = -0.886$ , $b = 0.144$
$2^{15}$	$a = -0.956$ , $b = 0.0522$
$2^{17}$	$a = -0.984$ , $b = 0.0186$

The obtained MAPE results for different packet rates are given in Tables 2 and 3. The results in Table 2 and Table 3 are rounded off to two decimal places.

Table 2 – MAPE for the approximations of  $n$  polynomials for rather low packet rates

$\alpha = 2^{11}$ p/s		$\alpha = 2^{13}$ p/s	
$n$	MAPE, %	$n$	MAPE, %
1	27.39	1	26.49
2	18.58	2	17.78
3	11.77	3	11.09
4	8.67	4	8.09
5	6.01	5	5.53
6	4.71	6	4.31
7	3.49	7	3.15
8	2.92	8	2.62
9	2.28	9	2.05
10	2.03	10	1.79
11	1.69	11	1.50
12	1.57	12	1.40
13	1.34	13	1.23

The values  $K = 3 \cdot 10^3$ ,  $N = 10^2$ ,  $L = 10^4$  are chosen during the calculation of the results shown in Table 2. The values  $K = 6 \cdot 10^3$ ,  $N = 10^2$ ,  $L = 10^4$  are chosen during the calculation of the results shown in Table 3. The value  $K = 3 \cdot 10^3$  does not provide the satisfactory accuracy of the calculations of the integrals used in the obtaining of the results given in Table 3, so a higher value of  $K$  is needed. The increase of  $K$  leads to a rather significant increase in the computation time for the integral brackets, so we restricted ourselves to the value  $K = 6 \cdot 10^3$ .

Table 3 – MAPE for the approximations of  $n$  polynomials for rather high packet rates

$\alpha = 2^{15}$ p/s		$\alpha = 2^{17}$ p/s	
$n$	MAPE, %	$n$	MAPE, %
1	26.30	1	25.46
2	17.57	2	16.75
3	10.94	3	10.18
4	7.97	4	7.32
5	5.46	5	4.96
6	4.25	6	3.86
7	3.14	7	2.91
8	2.61	8	2.47
9	2.07	9	2.10
10	1.83	10	1.95
11	1.56	11	1.81
12	1.45	12	1.78
13	1.29	13	1.74

As can be seen, the left-hand side and the right-hand side of the integral equation (1) are really close for the obtained solutions.

#### 5 RESULTS

The obtained results are graphically illustrated on Fig. 1 – Fig. 4.

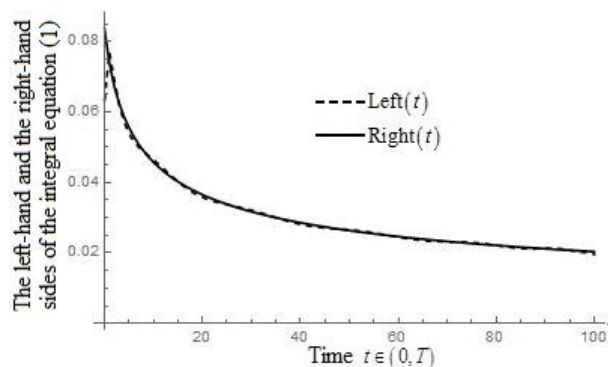


Figure 1 – Comparison of the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the packet rate  $\alpha = 2^{11}$  p/s for the thirteen-polynomial approximation

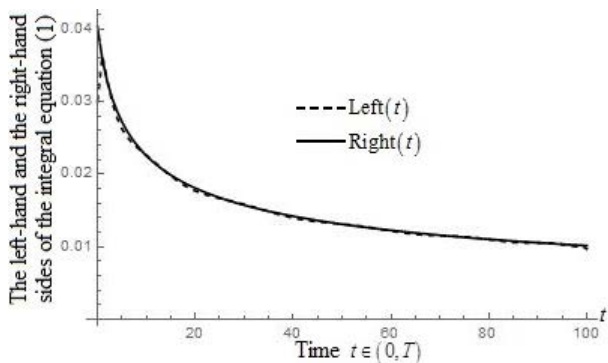


Figure 2 – Comparison of the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the packet rate  $\alpha = 2^{13}$  p/s for the thirteen-polynomial approximation

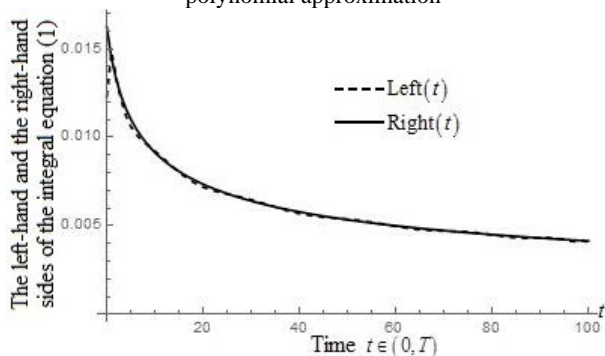


Figure 3 – Comparison of the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the packet rate  $\alpha = 2^{15}$  p/s for the thirteen-polynomial approximation

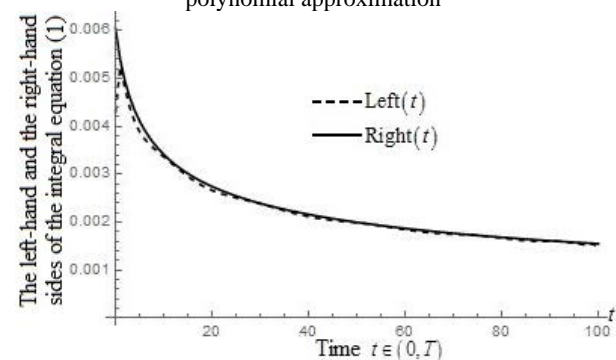


Figure 4 – Comparison of the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the packet rate  $\alpha = 2^{17}$  p/s for the thirteen-polynomial approximation

As can be seen from the corresponding graphs, the left-hand side and the right-hand side of the integral equation (1) are really close for the obtained solutions. According to Table 2 and Table 3, the corresponding misalignment MAPE is less than 2%.

## 6 DISCUSSION

The paper is devoted to the development of the theoretical fundamentals of the continuous Kolmogorov-Wiener filter construction for the prediction of a stationary process in the MFSD model. Such a process may describe telecommunication traffic in the systems with data packet transfer, see [7]. Of course, the traffic measurements in fact lead to a discrete time series, but if we deal

with large amount of data, the consideration of the continuous limit may be reliable, so the results may be also used to digital signal processing of telecommunication traffic.

An approximate solution for the filter weight function is obtained on the basis of the Galerkin method based on the Chebyshev polynomials of the first kind. The main difficulty of the calculation is the fact that in the framework of the considered problem the integral brackets can hardly be calculated either analytically or on the basis of the numerical integration procedure built in the Wolfram Mathematica package. So, the formula (10) is used for the integral brackets obtaining. The higher the number of points  $K$  is, the more precise the result is; however, the increase of the value of  $K$  leads to the significant increase of the computation time. The value  $K = 3 \cdot 10^3$  is enough for rather low packet rates, but higher values are required for rather high packet rates, the corresponding value  $K = 6 \cdot 10^3$  is chosen. The misalignment of the left-hand side and the right-hand side of the integral equation (1) is rather low for rather large number of polynomials (corresponding MAPE is less than 2%), so we can conclude that the solutions for the weight function obtained in this paper are rather accurate.

The plans for the future are as follows. The practical applications of the constructed theoretical fundamentals are of interest. Moreover, another orthogonal system may be used in order to avoid such computational difficulties, for example, the Walsh function system, see [13, 15]. The method used in the paper may be applied to the self-similar processes in other models, for example, for the recently developed rational Gaussian noise model [16]. The heavy-tail processes play important role not only for the traffic prediction, but also in other fields of knowledge, for example, in agriculture [17, 18]. So the proposed method may be useful for data treatment in agriculture, for time series in mining (see [19, 20]) and so on. These plans may be realized in other papers.

## CONCLUSIONS

The Kolmogorov-Wiener filter weight function for the prediction of continuous stationary self-similar heavy-tail process in the MFSD) model is obtained on the basis of the Galerkin method based on the Chebyshev polynomials of the first kind. The obtained results may be used to digital signal processing of telecommunication traffic. Approximations up to the 13-polynomial one are investigated. It is shown that if the number of polynomials is rather large, the coincidence between the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation is rather good, so rather accurate solutions for the weight function under consideration are obtained.

**The scientific novelty** of the paper is the fact that for the first time the weight function of the continuous Kolmogorov-Wiener filter is obtained for the heavy-tail process prediction in the MFSD model, which may be important both for analog and for digital signal processing.



**The practical significance**, in particular, is that the obtained results may be applied to telecommunication traffic prediction in systems with data packet transfer.

**Prospects for further research**, in particular, are to apply the obtained theoretical results to practical prediction and to investigate the Galerkin method in the framework of the problem under consideration on the basis of another orthogonal function systems, for example on the basis of the Walsh functions. The method used in the paper may be also applied to treatment of time series which may be measured by wireless sensor networks, including agrotechnical purposes.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This research is carried out as part of the scientific project «Development of software and hardware of intelligent technologies for sustainable cultivation of agricultural crops in war and post-war times» funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine at the expense of the state budget (State Registration No. 0124U000289).

#### REFERENCES

1. Tian H., Guo K., Guan X. Statistical behavioral characteristics of network communication delay in IPv4/IPv6 Internet, *Telecommunication Systems*, 2024, Vol. 85, pp. 679–698. DOI: 10.1007/s11235-024-01111-y
2. Saha S., Haque A., Sidebottom G. Multi-Step Internet Traffic Forecasting Models with Variable Forecast Horizons for Proactive Network Management, *Sensors*, 2024, Vol. 24, 1871 (29 pages). DOI: 10.3390/s24061871
3. Balabanova I., Georgiev G. Forecasting Teletraffic Performance Using Regression Analysis, FNNN, GRNN and CFNN, *Engineering Proceedings*, 2024, Vol. 60, 11 (7 pages). DOI: 10.3390/engproc2024060011
4. Wang X., Wang Z., Yang K. et al. A Survey on Deep Learning for Cellular Traffic Prediction, *Intelligent Computing*, 2024, Vol. 3, 0054 (17 pages). DOI:10.34133/icomputing.0054
5. Li M. Direct Generalized fractional Gaussian noise and its application to traffic modeling, *Physica A*, 2021, Vol. 579, 126138 (22 pages). DOI: 10.1016/j.physa.2021.126138
6. Sousa-Vieira M. E., Fernández-Veiga M. Efficient Generators of the Generalized Fractional Gaussian Noise and Cauchy Processes, *Fractal and Fractional*, 2023, Vol. 7, 455 (13 pages). DOI: 10.3390/fractalfract7060455
7. Anderson D., Cleveland W. S., Xi B. Multifractal and Gaussian fractional sum-difference models for Internet traffic, *Performance Evaluation*, 2017, Vol. 107, pp. 1–33. DOI: 10.1016/j.peva.2016.11.001
8. Ferreira G. O., Ravazzi C., Dabbene F. et al. Forecasting Network Traffic: A Survey and Tutorial With Open-Source Com-

- parative Evaluation, *IEEE Access*, 2023, Vol. 11, pp. 6018–6044. DOI:10.1109/ACCESS.2023.3236261
9. Gorev V., Gusev A., Korniienko V. et al. On the use of the Kolmogorov-Wiener filter for heavy-tail process prediction, *Journal of Cyber Security and Mobility*, 2023, Vol. 12, № 3, pp. 315–338. DOI: 10.13052/jcsm2245-1439.123.4.
10. Pooja, Kumar J., Manchanda P. Numerical Solution of First Kind Fredholm Integral Equations Using Wavelet Collocation Method, *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*, 2024, Vol. 39., Issue 6, pp. 66–79. DOI: 0.9734/jamcs/2024/v39i61902
11. Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. Kolmogorov-Wiener filter for continuous traffic prediction in the GFSD model, *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2022, No. 3, pp. 31–37. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-3-3.
12. Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. et al. Generalized fractional Gaussian noise prediction based on the Walsh functions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2023, No. 3, pp. 48–54. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-5
13. Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. et al. On the Kolmogorov-Wiener filter for random processes with a power-law structure function based on the Walsh functions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, No. 2. pp. 39–47. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-2-4
14. Koroviaka Y., Pinka J., Tymchenko S. et al. Elaborating a scheme for mine methane capturing while developing coal gas seams, *Mining of Mineral Deposits*, 2020, Vol. 14, Issue 3, pp. 21–27. DOI: 10.33271/mining14.03.021
15. Li S., Song G., Ye M. et al. Multiband SHEPWM Control Technology Based on Walsh Functions, *Electronics*, 2020, Vol. 9, Issue 6, 1000 (16 pages). DOI: 10.3390/electronics9061000
16. Yang Y. Long-range dependence and rational Gaussian noise, *A Journal of Theoretical and Applied Statistics*. – 2024, Vol. 58, Issue 2, pp. 364–382. DOI: 10.1080/02331888.2024.2344689
17. Baul T., Karlan D., Toyama K. et al. Improving smallholder agriculture via video-based group extension, *Journal of Development Economics*, 2024, Vol. 169, 103267 (26 pages). DOI: 10.1016/j.jdeveco.2024.103267
18. Laktionov I., Diachenko G., Koval V. et al. Computer-Oriented Model for Network Aggregation of Measurement Data in IoT Monitoring of Soil and Climatic Parameters of Agricultural Crop Production Enterprises, *Baltic Journal of Modern Computing*, 2023, Vol. 11, Issue 3, pp. 500–522. DOI: 10.22364/bjmc.2023.11.3.09
19. Malashkevych D., Petlovanyi M., Sai K. et al. Research into the coal quality with a new selective mining technology of the waste rock accumulation in the mined-out area, *Mining of Mineral Deposits*, 2022, Vol. 16, Issue 4, pp. 103–114. DOI: 10.33271/mining16.04.103
20. Lymperi O. A., Varouchakis E. A. Modeling Extreme Precipitation Data in a Mining Area, *Mathematical Geosciences*, 2024. DOI: 10.1007/s11004-023-10126-1

Received 17.06.2024.  
Accepted 09.09.2024.

УДК 004.94, 51–74, 517.968.21

#### МЕТОД ОБРОБКИ СИГНАЛІВ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ КОЛМОГОРОВА-ВІНЕРА ПРОЦЕСУ В MFSD МОДЕЛІ

**Горєв В. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, завідувач кафедри фізики, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Шедловська Я. І.** – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Лактіонов І. С.** – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Дяченко Г. Г.** – канд. техн. наук, доцент кафедри електропривода, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Каштан В. Ю.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

**Хабарлак К. С.** – д-р філософії, доцент кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

© Gorev V. N., Shedlovska Y. I., Laktionov I. S., Diachenko G. G., Kashtan V. Yu., Khabarlak K. S., 2024  
DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-2



#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Досліджено метод обробки сигналів, що базується на обчисленні вагової функції фільтра Колмогорова-Вінера для прогнозування неперервного стаціонарного процесу з важким хвостом в MFSD (multifractal fractional sum-difference) моделі. Такий процес може описувати телекомунікаційний трафік у деяких системах з пакетною передачею даних, розгляд неперервного фільтра може бути доцільним у випадку великої кількості даних.

**Мета роботи.** Метою роботи є отримання наближеного розв'язку для вагової функції фільтра Колмогорова-Вінера та показати застосовність методу обробки сигналів, використаного в роботі.

**Метод.** Для розрахунку вагової функції, яку розглянуто в роботі, використовується метод Галеркіна, що базується на ортогональних поліномах Чебишова першого роду. Досліджено різні наближення включно до наближення тринадцяти поліномів. Відповідні інтеграли обчислені числовими методами на основі математичного пакету Wolfram Mathematica. Чим більша швидкість передачі пакетів, тим вищою має бути точність обчислення інтегралів.

**Результати.** Показано, що для досить великої кількості поліномів нев'язка між лівою та правою частинами інтегрального рівняння Вінера-Хопфа, що розглядається в роботі, є досить малою для отриманих розв'язків. Розраховано відповідні середні абсолютні відсоткові похибки нев'язки для різних швидкостей передачі пакетів. Метод обробки сигналів, використаний у роботі, дає адекватні результати для вагової функції фільтра Колмогорова-Вінера для прогнозування процесу в MFSD моделі.

**Висновки.** Досліджено теоретичні основи побудови неперервного фільтра Колмогорова-Вінера для прогнозування випадкового процесу в MFSD моделі. Вагову функцію фільтра отримано як наближений розв'язок інтегрального рівняння Вінера-Хопфа за допомогою методу Галеркіна, що базується на поліномах Чебишова першого роду. Показано, що отримані результати для вагової функції фільтра є адекватними. Отримані результати можуть бути корисними для практичного прогнозування телекомунікаційного трафіку. Результати роботи також можуть бути застосовані для розгляду випадкових процесів з важким хвостом у різних галузях знань, наприклад, у сільському господарстві.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** вагова функція фільтра Колмогорова-Вінера, телекомунікаційний трафік, метод Галеркіна, MFSD модель, поліноми Чебишева першого роду, стаціонарний випадковий процес з важким хвостом.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Tian H. Statistical behavioral characteristics of network communication delay in IPv4/IPv6 Internet / H. Tian, K. Guo, X. Guan // *Telecommunication Systems*. – 2024. – Vol. 85. – P. 679–698. DOI: 10.1007/s11235-024-01111-y
2. Saha S. Multi-Step Internet Traffic Forecasting Models with Variable Forecast Horizons for Proactive Network Management / S. Saha, A. Haque, G. Sidebottom // *Sensors*. – 2024. – Vol. 24. – 1871 (29 pages). DOI: 10.3390/s24061871
3. Balabanova I. Forecasting Teletraffic Performance Using Regression Analysis, FNN, GRNN and CFNN / I. Balabanova, G. Georgiev // *Engineering Proceedings*. – 2024. – Vol. 60. – 11 (7 pages). DOI: 10.3390/engproc2024060011
4. A Survey on Deep Learning for Cellular Traffic Prediction / [X. Wang, Z. Wang, K. Yang et al.] // *Intelligent Computing*. – 2024. – Vol. 3. – 0054 (17 pages). DOI: 10.34133/icomputing.0054
5. Li M. Direct Generalized fractional Gaussian noise and its application to traffic modeling / M. Li // *Physica A*. – 2021. – Vol. 579. – 126138 (22 pages). DOI: 10.1016/j.physa.2021.126138
6. Sousa-Vieira M. E. Efficient Generators of the Generalized Fractional Gaussian Noise and Cauchy Processes / M. E. Sousa-Vieira, M. Fernández-Veiga // *Fractal and Fractional*. – 2023. – Vol. 7. – 455 (13 pages). DOI: 10.3390/fractalfrac7060455
7. Anderson D. Multifractal and Gaussian fractional sum-difference models for Internet traffic / D. Anderson, W. S. Cleveland, B. Xi // *Performance Evaluation*. – 2017. – Vol. 107. – P. 1–33. DOI: 10.1016/j.peva.2016.11.001
8. Forecasting Network Traffic: A Survey and Tutorial With Open-Source Comparative Evaluation / [G. O. Ferreira, C. Ravazzi, F. Dabbene et al.] // *IEEE Access*. – 2023. – Vol. 11. – P. 6018–6044. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3236261
9. On the use of the Kolmogorov-Wiener filter for heavy-tail process prediction / [V. Gorev, A. Gusev, V. Korniienko et al.] // *Journal of Cyber Security and Mobility*. – 2023. – Vol. 12, № 3. – P. 315–338. DOI: 10.13052/jcsm2245-1439.123.4
10. Pooja. Numerical Solution of First Kind Fredholm Integral Equations Using Wavelet Collocation Method / Pooja, J. Kumar, P. Manchanda // *Journal of Advances in Mathematics and Computer Science*. – 2024. – Vol. 39., Issue 6. – P. 66–79. DOI: 0.9734/jamcs/2024/v39i61902
11. Gorev V. N. Kolmogorov-Wiener filter for continuous traffic prediction in the GFSD model / V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2022. – No. 3. – P. 31–37. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-3-3
12. Generalized fractional Gaussian noise prediction based on the Walsh functions / V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko et al. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2023. – No. 3. – P. 48–54. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-5
13. On the Kolmogorov-Wiener filter for random processes with a power-law structure function based on the Walsh functions / [V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko et al.] // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2021. – No. 2. – P. 39–47. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-2-4
14. Elaborating a scheme for mine methane capturing while developing coal gas seams / [Y. Koroviaka, J. Pinka, S. Tymchenko et al.] // *Mining of Mineral Deposits*. – 2020. – Vol. 14, Issue 3. – P. 21–27. DOI: 10.33271/mining14.03.021
15. Multiband SHEPWM Control Technology Based on Walsh Functions / S. Li, G. Song, M. Ye et al. // *Electronics*. – 2020. – Vol. 9, Issue 6. – 1000 (16 pages). DOI: 10.3390/electronics9061000
16. Yang Y. Long-range dependence and rational Gaussian noise / Y. Yang // *A Journal of Theoretical and Applied Statistics*. – 2024. – Vol. 58, Issue 2. – P. 364–382. DOI: 10.1080/02331888.2024.2344689
17. Improving smallholder agriculture via video-based group extension / T. Baul, D. Karlan, K. Toyama et al. // *Journal of Development Economics*. – 2024. – Vol. 169. – 103267 (26 pages). DOI: 10.1016/j.jdeveco.2024.103267
18. Computer-Oriented Model for Network Aggregation of Measurement Data in IoT Monitoring of Soil and Climatic Parameters of Agricultural Crop Production Enterprises / [I. Laktionov, G. Diachenko, V. Koval et al.] // *Baltic Journal of Modern Computing*. – 2023. – Vol. 11, Issue 3. – P. 500–522. DOI: 10.22364/bjmc.2023.11.3.09
19. Research into the coal quality with a new selective mining technology of the waste rock accumulation in the mined-out area / D. Malashkevych, M. Petlovanyi, K. Sai et al. // *Mining of Mineral Deposits*. – 2022. – Vol. 16, Issue 4. – P. 103–114. DOI: 10.33271/mining16.04.103
20. Lymperi O. A. Modeling Extreme Precipitation Data in a Mining Area / O. A. Lymperi, E. A. Varouchakis // *Mathematical Geosciences*. – 2024. DOI: 10.1007/s11004-023-10126-1



## THE SOFTWARE IMPLEMENTATION FOR AUTOMATIC GENERATION OF PETRI NETS

**Gurskiy A. A.** – PhD, Associate Professor of the Department of Technological Processes Automation and Robot-technical Systems, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine.

**Dubna S. M.** – Lecturer of the Department of Technological Processes Automation and Robot-technical Systems, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The important task was solved during this scientific research related to specific development and verification of the fundamental suitability of the software application that provides visualization of the automatic synthesis of Petri nets while setting up the multi-level control systems. This task is current because for the first time the integration of means of discrete-continuous networks from the DC-Net environment in the Labview environment is realized through the implementation of automatic synthesis of Petri nets. This makes it possible to automate the processes of synthesis for the control algorithms based on the development of appropriate intelligent systems.

**Objective.** The purpose of the scientific work is to minimize the time and to automatize process in synthesis of the control algorithms by integrating the means of discrete-continuous networks and implementing the principles of automatic synthesis of Petri nets.

**Method.** This scientific article proposes the principle for automatic formation of Petri nets based on logical algorithm for classifying various uncorrected algorithms. The multilayer neural network in the Labview 2009 software environment was implemented to realize the appropriate algorithm. This artificial neural network provides algorithm formation, automatic synthesis and operation of Petri nets. The article is devoted to the study of operating principle of the software application implementing such automatic synthesis of Petri nets while setting up the multi-level control systems.

**Results.** A number of experiments were performed on the classification of algorithms and formation of Petri nets based on the ready-made software application. The control system was automatically set up based on the Labview 2009 environment application for the determined object.

As a result of these experiments we have determined the fundamental suitability of the software application for the synthesis of some multi-level automatic control systems. It was also shown during these experiments that all mismatch signals in the system and deviations from the ratios of values controlled variables are reduced to zero. All parameters of the control systems settings were noted after the multi-level system setting procedure on the front panel of the virtual stand.

**Conclusions.** The task related to the software application development based on the Labview 2009 environment which provides the automatic synthesis of Petri nets was solved in this scientific work. Thus the method of automatic synthesis of Petri nets and technology for developing certain algorithms based on the functioning of the artificial neural network was further developed.

**KEYWORDS:** Petri net, artificial neural network, coordinating automatic control system, coordination of transient processes, ratio control, algorithms of setting.

### ABBREVIATIONS

NN is a neural network;

PN is a Petri net.

### NOMENCLATURE

$A0i+$  is a  $i$ -th the uncorrected algorithms, where  $i=1...4$ ;

$\varphi(t)$  is a deviation from ratio of variables;

$e(t)$  is a deviation of the controlled variable from the set value with in time;

$J$  is an integral criterion of system;

$u_1, \%$  is a control action on the flow of cooling water on the condenser;

$u_2, \%$  is a control action linked to the speed of rotation of the compressor shaft of the refrigeration plant;

$A^r$  is a coefficient matrix;

$p$  is a differential operators;

$G_{x.a}$  is a compressor capacity;

$P_k$  is a condensation pressure;

$b$  is a constant;

$x_1, x_3, x_4$  are input variables for determination of the initial algorithm control;

$\alpha$  is a weighting coefficient in the integral criterion of system;

$t'_i$  is a  $i$ -th transition in a petit network, where  $i=1...10$ ;

$p_i$  is a  $i$ -th position in the Petri net, where  $i=1...10$ ;

$w_{ij}$  is a coefficient of interneuronal connection of the  $i$ -th neuron of the  $j$ -th layer.

### INTRODUCTION

Petri nets are the mathematical apparatus for discrete systems modeling. It was presented by Carl Petri in 1962 and it has many extensions nowadays. Despite this, there are few software tools to implement the synthesis of Petri nets. The well-known MATLAB software environment also does not have the appropriate tools for the synthesis and analysis of networks. Instead there is StateFlow software module that is implemented based on MATLAB for graphical representation of the finite state machine as the states diagrams. The DC-Net program has the significant difference compared with MATLAB/Simulink/StateFlow in the principle of constructing models in the complex systems [1]. The DC-Net software environment is specialized in the field of analysis and synthesis in hybrid or logical-dynamic systems [2–4]. It is possible to imagine quite visually the synthesis of Petri nets and the development of logical-dynamic models using this environment.

Research has shown that DC-Net tools can be integrated with other software products. Thus, this research work represents the integration of DC-Net tools to implement automatic synthesis of Petri nets and to form of algorithms and sequential calculations. Automatic synthesis of Petri nets and the formation of algorithms are advisable for some tasks in the field of intelligent technologies. In a special case it could be the formation of setting algorithms for the synthesis of complex multi-level automatic control systems with subordinate control processes.

**The object of study** is the processes of automatic synthesis of Petri nets while setting up the coordinating automatic control systems.

**The subject of study** is the methods of automatic synthesis of Petri nets while setting up the coordinating automatic control systems.

**The purpose of the scientific work** is to minimize the time and to automatize process in synthesis of the control algorithms by integrating means of the discrete-continuous networks and implementation of the principles for automatic synthesis of Petri nets.

## 1 PROBLEM STATEMENT

To achieve this purpose it is necessary to solve the problem associated with the development and verification of the fundamental suitability for a software application that provides visualization of the automatic synthesis of Petri nets while setting up multi-level automatic control systems. In this case, the developed software application for setting of the multilevel control systems is acceptable if it allows to determine all the values of the  $k_{ij}$  parameters of various levels for the control system. These  $k_{ij}$  parameters of setting must give the minimum value of  $J$  integral criterion in the multilevel system. The integral criterion is

$$J = \int_0^{\infty} (\alpha \cdot [e(t) / e_{\max}] + |\varphi(t) / \varphi_{\max}|) dt. \quad (1)$$

where  $\alpha$  is coefficient indicating the temporal coordination of the control processes;  $\varphi(t) = A^T \cdot \bar{X} + b$  is deviations from the ratio of the values of regulated variables;  $A^T$  is a coefficient matrix;  $b$  is a constant;  $\varphi_{\max} = x_{1\max} \cdot k - x_{2\min} + b$  is maximum deviations from the ratio of the values of regulated variables;  $e(t)$  is the deviation of some variable in time from the given value;  $\bar{X} = [x_{1C} \quad x_{2C}]^T$  is controlled variables vector;  $x_{1\max}, x_{2\min}$  are the maximum and minimum values of the control variables.

If  $0.3 < \alpha < 0.7$ , then it is possible to obtain the subordination of the control processes and to establish the fundamental suitability in order to implement appropriate control algorithm  $A0i+$ , where  $i=1...4$ . This setting algorithm is presented during the synthesis of a Petri net based on the appropriate software application. In this case, the practical implementation for automatic synthesis of Petri nets is possible through software. This software is capable

of providing visualization of the Petri net synthesis process, as well as graphical programming of Petri net synthesis and analysis algorithms. In such case, it is necessary to use the means of discrete-continuous networks of the DC-Net environment to represent hybrid systems or systems with a logical-dynamic nature of functioning [5].

Currently, there is no integration of discrete-continuous networks tools into software products for implementing the synthesis of appropriate complex systems.

Consequently, the task was determined to integrate various software tools for developing complex systems while expanding Petri nets and development of the means for discrete-continuous networks of the DC-Net environment was determined. In the particular case these systems which provide the implementation for automatic synthesis of Petri nets based on the Labview environment. For our research the Labview platform was chosen along with such tools as MATLAB, C++ builder, Flash etc.

Undoubtedly, the integration of the capabilities for various software tools MATLAB, Flash, DC-Net gives obvious results, however, Labview in this case is intended for specialists with programming experience in this field activity. The Labview environment has a specific graphical programming apparatus and its own visualization platform.

Thus, the task about integrating of the means for discrete-continuous networks is relevant if we can use the graphical programming language for the appropriate environment to implement the automatic synthesis of Petri nets. It should also be noted that the Labview environment is integrated with various automation hardware in order to create measurement laboratories and different virtual stands.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

One of the first mentioned ideas about the automatic synthesis of Petri nets was in the work of J. Peterson [6]. It was noted in this work that “the use of Petri net languages would be in the specification and automatic synthesis of Petri nets. If the behavior which is desired can be specified as a language, than it may be possible to automatically synthesize a Petri net whose language is the specified language. This Petri net can be used as a controller, guaranteeing that all and only the sequences specified are possible”.

Since then, a number of scientific articles related to the automatic synthesis and generation of Petri nets have appeared [7–10]. These scientific works reflect the principles for synthesis of Petri nets based on the rules of composition for individual subnets.

It was proposed to generate automatically Petri nets based on the functioning of the artificial neural network in such scientific works [11–13]. This artificial neural network provides the necessary composition of Petri nets and the intelligent technology for generating algorithms. This automatic composition of Petri nets was implemented primarily in order to form algorithms for the step-by-step setting of multi-level automatic control systems.

The proposed integration of software tools was able to identify the direction linked to the software implementation of automatic synthesis of Petri nets [14–16]. This primarily applies the software integration of DC-Net with visualization tools on the Flash platform. We have found out that the integration of the mathematical apparatus for discrete-continuous networks of the DC-Net environment into the Labview environment is possible through the implementation of automatic synthesis of Petri nets. Thus, it was determined the path of development for automatic synthesis of Petri nets based on software implementation using the Labview environment.

### 3 MATERIALS AND METHODS

The synthesis of Petri nets is performed according to the relevant rules and can be implemented using software. The proposed synthesis of Petri nets based on the functioning of artificial neural networks is also the software implementation of synthesis in an automatic way. In this case, the neural network provides classification of algorithms and their adjustment to the given task. And this neural network is realized in software.

The formation of a Petri net when classifying various uncorrected A01+, A02+, A03+, A04 algorithms can be represented on the basis of a logical classification algorithm representing a binary tree [17 – 18]. In this case we have different logical classification algorithms; one of the simplest algorithms is shown in Figure 1. In such a tree the predicate is prescribed at each vertex  $\beta_i : X \rightarrow \{0; 1\}$ . It should be noted here that the algo-

rithm may include various  $x_4, \alpha, \gamma$  variables and linguistic rules for generating the appropriate result  $\beta(x_4, \alpha, \gamma)$ .

If we consider the classification of setting algorithms and the functioning of coordinating automatic control system, then  $\beta(x_1) = 1$  when selecting logical control algorithm which provides the sequential inclusion of control loops in operation,  $\beta(x_3) = 1$  when setting up the control system in a step-by-step mode,  $\beta(x_4, \alpha, \gamma) = 1$  when setting up the system on the structural-temporal subordination of control processes.

The multi-layer neural network was implemented in the Labview 2009 software environment using graphical programming tools in order to implement the appropriate algorithm. This artificial neural network provides classification of algorithms, automatic synthesis and operation of Petri nets.

The generated Petri net represents a step-by-step algorithm for setting up the multi-level automatic control system that provides the separation of motions mode [13, 19]. Thus, the control system is synthesized and also provided a coordinated change of the controlled variables in transient modes.

The process of generating Petri net and the setting up process of the control system are visualized on the front panel of the virtual stand. This front panel of the stand is shown in Figure 2. The process of Petri net synthesis is presented as the result of the composition  $PN_1 \dots PN_m$  individual networks. The front panel shows a number of  $PN_1 \dots PN_m$  individual Petri nets that can represent the functioning of individual elements for the system being developed.

The classification algorithm which is represented by a decision tree

- 1)  $\forall v \in V_{\text{vertex}} \rightarrow \text{predicate } \beta_i : X \rightarrow \{0; 1\}$
- 2)  $\forall v \in V_{\text{leaf}} \rightarrow \text{class name } Y : A 01+, A 02+, A 03+, A 04+$

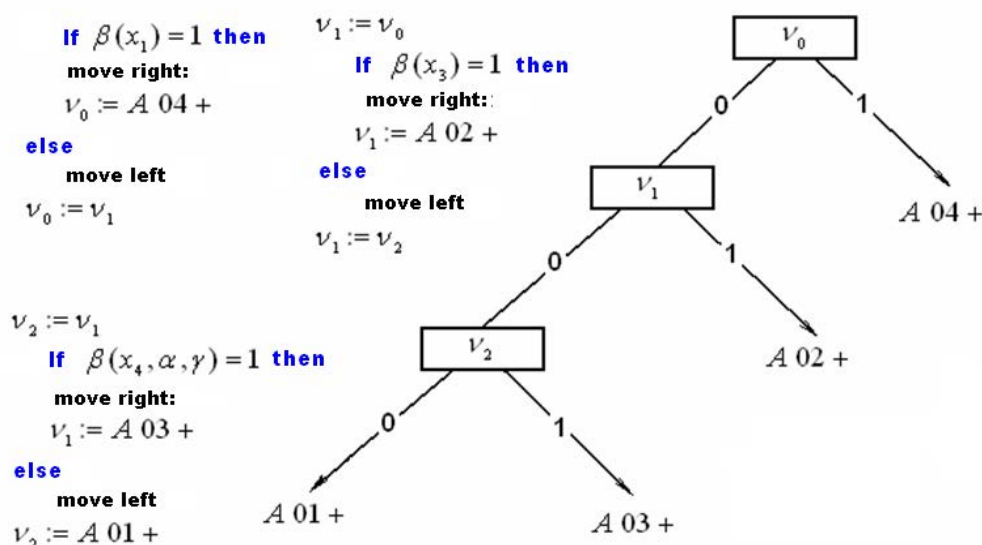


Figure 1 – The logical classification algorithm

It is also presented on the front panel such items:  
 – the automatically generated Petri net as a result of the classification by  $A01+$ ,  $A02+$ ,  $A03+$ ,  $A04$  various algorithms;

- the markings of Petri net;
- the errors displayed at various stages of system operation;
- the values of control system settings parameters.

At the initial stage of operation in this software application we have set the certain parameters of the control object and the ratio coefficients between the controlled variables that we need to coordinate.

After that we can select a task from the various options, such as:

- step-by-step system setting;
- setting to separation of motions mode;
- the control logical.

We also can select the algorithm of step-by-step actions or the algorithm of parallel operation. Petri net is formed as a result of choosing the appropriate task and algorithm. This Petri net is formed as a result of the composition of individual Petri nets, which are presented on the front panel of the stand (Fig. 3).

After the Petri net has been formed, it starts its functioning. The artificial neural network interacts with the

$PN_1...PN_m$  Petri nets, and the process of the synthesized Petri net is visualized (Fig. 4). As a result of the movement of markers in the Petri net, changes are made to the settings of the coordinating control system. If deviations from the predetermined ratio between the regulated variables are reduced to zero then a certain transition in the Petri net is triggered to perform the next stage of system setting. Thus, the Petri net demonstrates the setting of the control system. The operator only makes sure that at all transitions of the Petri net there are no errors when setting up the system.

Ultimately, the system setup will have been completed while appearing the marker in position  $p_{10}$ .

The formation of Petri net is implemented as a result of classification of algorithms and their adjustment if errors are noted at certain stages while operating the synthesized Petri net. One can see in Fig. 5 the  $NN$  multilayer neural network in the fragment of the front panel of the virtual stand. This multilayer neural network operates on the principles of feedback with  $PN_1...PN_m$  separate Petri nets. However, wherein it is ensured the synchronous movement of markers in  $PN_1...PN_m$  Petri nets linked with an  $NN$  artificial neural network.

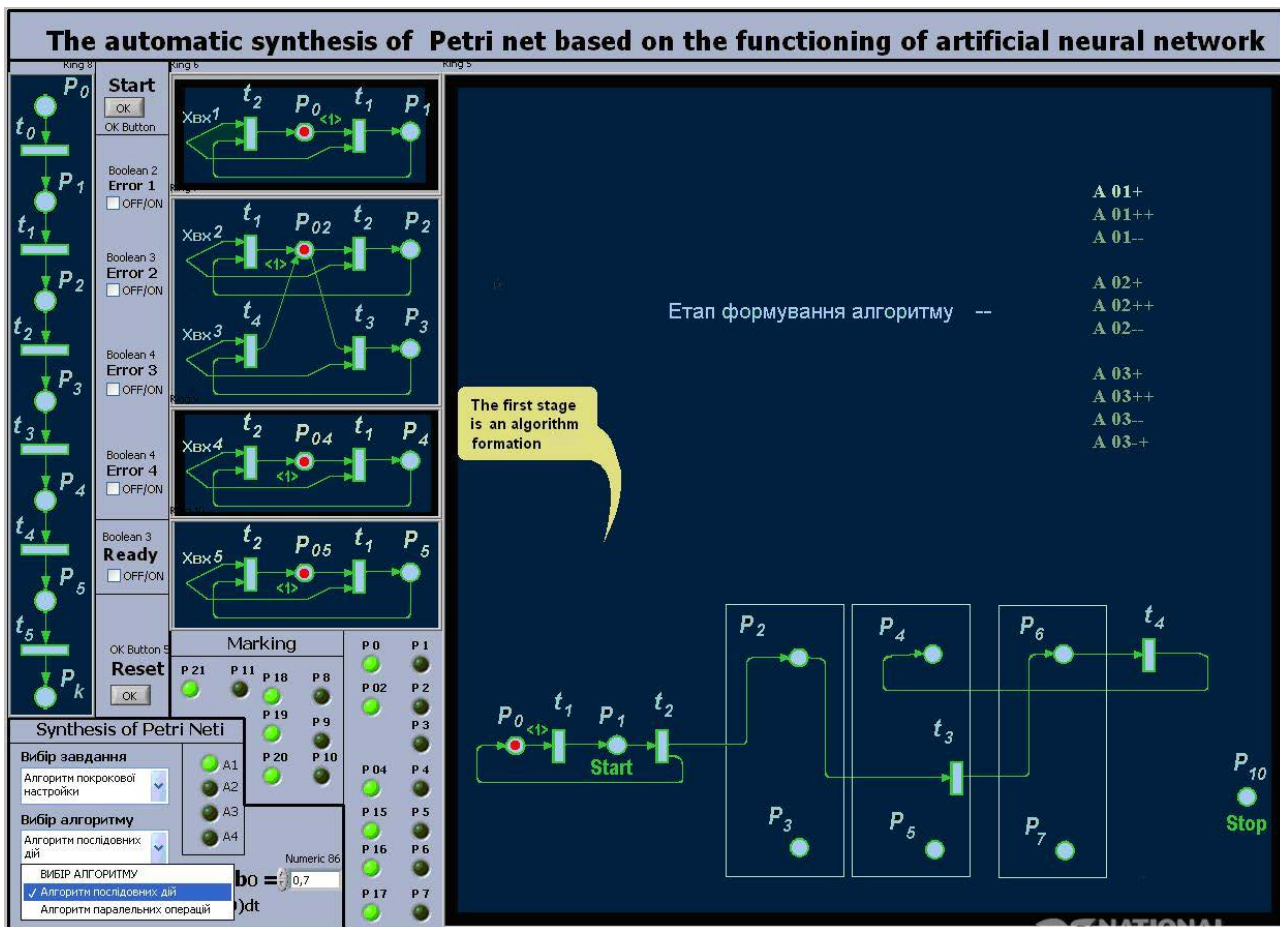


Figure 2 – Front panel of the virtual stand demonstrating the automatic formation of a Petri net as a result of classification of various algorithms



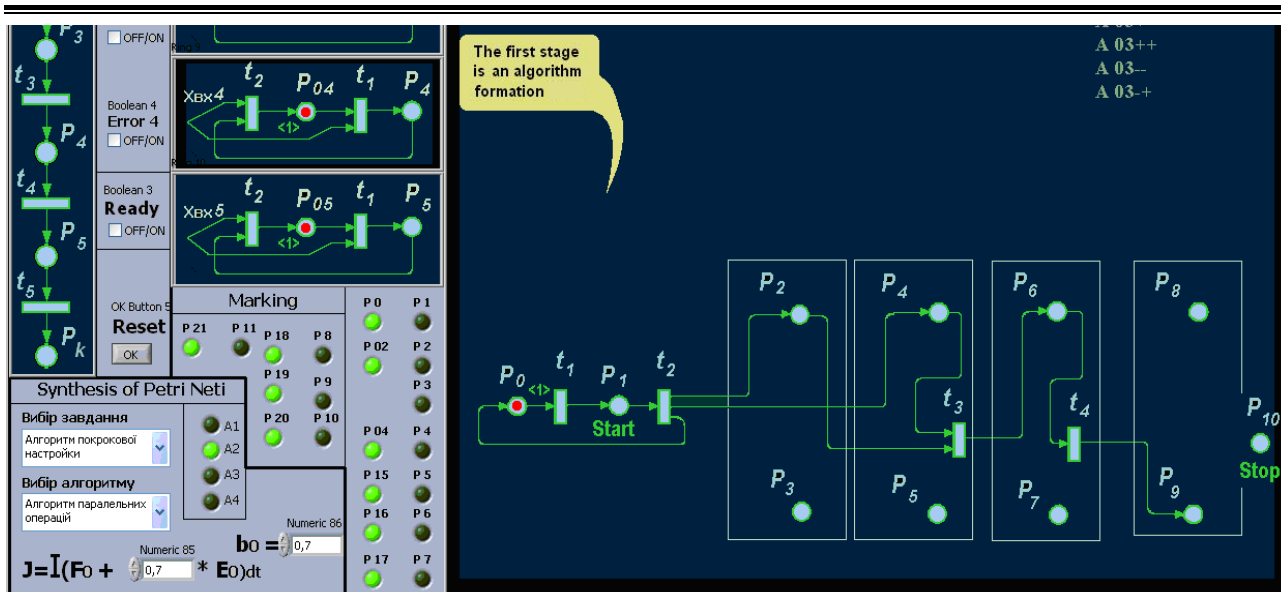


Figure 3 – Front panel of the virtual stand demonstrating the generated Petri net

One can perform the composition of a Petri net during the synchronous changes in the markings in Petri nets. In a particular case, this composition will represent an algorithm for step-by-step configuration of a multi-level control system. It is shown that each position of the generated Petri net matches a specific position of the  $PN_i$  Petri net connected to the  $NN$  neural network. The  $t'_2$  and  $t'_1$  transitions covered by the dotted curve are combined into  $t_2$  transition and so on according to the diagram of the generated Petri net. This is shown in Fig. 5.

#### 4 EXPERIMENTS

A number of experiments were conducted based on the finished software application. A number of experiments were performed by classification of algorithms as well as the formation and correction of Petri nets. The parameters of a certain control object were also specified, for which control systems were automatically implemented based on the Labview 2009 environment. A refrigeration turbocompressor was chosen as the object. To improve the operating efficiency of a turbocharger, we need to coordinate changes in the shaft rotation speed and the cooling water flow rate on the condenser when regulating the boiling pressure. The appropriate block diagram of the customizable control system is presented as seen from the Fig. 4. According to the diagram, we have represented the system control law in the following way:  $\bar{u} = \bar{u}_q + \bar{u}_p = [u_1 \ u_2]^T$ , where:  $\bar{u}_q = [u_{q1} \ u_{q2}]^T$  is the control vector of the 1st level;  $u_1 = u_{q1} = k_1 \cdot (1 + k_{11} \cdot \frac{1}{p}) \cdot \varphi(t)$ ;  $u_{q2} = k_2 \cdot (1 + k_{21} \cdot \frac{1}{p}) \cdot \varphi(t)$ ;  $u_2 = u_{q2} + u_{p2}$   $u_{p2} = \Delta P_{kip} \cdot k_3 (1 + k_{31} \cdot \frac{1}{p} + k_{32} p)$  is the law of 2nd level of control;  $\varphi(t) = k_1 \cdot G_{x.a} - p_k + b$ ;  $\Delta P_{kip}$  is a

deviation of the controlled variable from the set value;  $k_1, k_{11}, k_2, k_{21}, k_3, k_{31}, k_{32}$  are parameters that are determined in the process of step-by-step setting according to the generated Petri net. These parameters are determined in this way that the integral indicator has a minimum value.

We have also carried out the system optimization in MATLAB/Simulink 5.2 in order to assess the quality of system settings. All parameters in the model of control object and in the appropriate control system which was set we have also shown in Fig. 6. The comparative analysis of the experimental results has been performed using the MATLAB environment.

#### 5 RESULTS

The fundamental suitability of the software application for the synthesis of some multi-level automatic control systems was established as a result of the experiments. After carrying out the procedures for setting up a multi-level system, all the control system setup parameters were presented on the front panel of the virtual stand and it was also shown that all mismatch signals in the system and deviations from the ratio of the values of the controlled variables were reduced to zero. Signals of mismatch and deviation from the given ratio were reduced to zero both during the step-by-step setting up of a multi-level system and when sequentially connecting the control loops into operation. However, the most important thing is that the developed software application has demonstrated the principle for automatic synthesis of Petri nets based on the logical classification algorithm. In the particular case it was demonstrated the automatic synthesis of Petri nets in the formation of algorithms for setting up multi-level automatic control systems.

It was also established the possibility for automatic generation of Petri nets based on the reachability tree. Such a generated Petri net will represent a logical control algorithm ensuring the sequential connection of the control loops for a multi-level system to operation.

The experimental results are presented in Table 1. All these data from Table 1 were obtained as a result of simulation in the MATLAB/Simulink 5.2 software environ-

ment. Based on the data presented in the table we can determine the fundamental suitability of the developed software application for setting control systems.

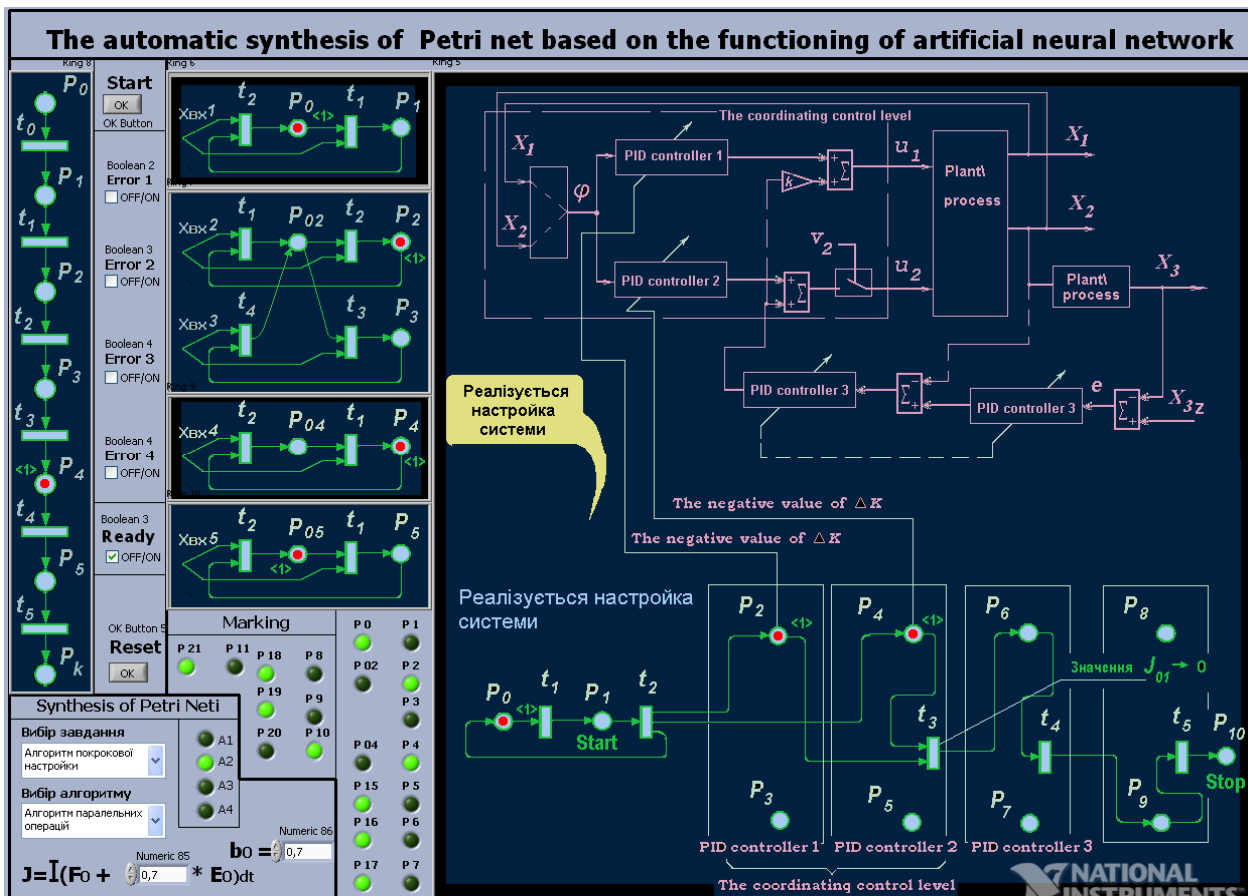


Figure 4 –The front panel of the virtual stand displaying the setting up process of the automatic control system according to the generated Petri net

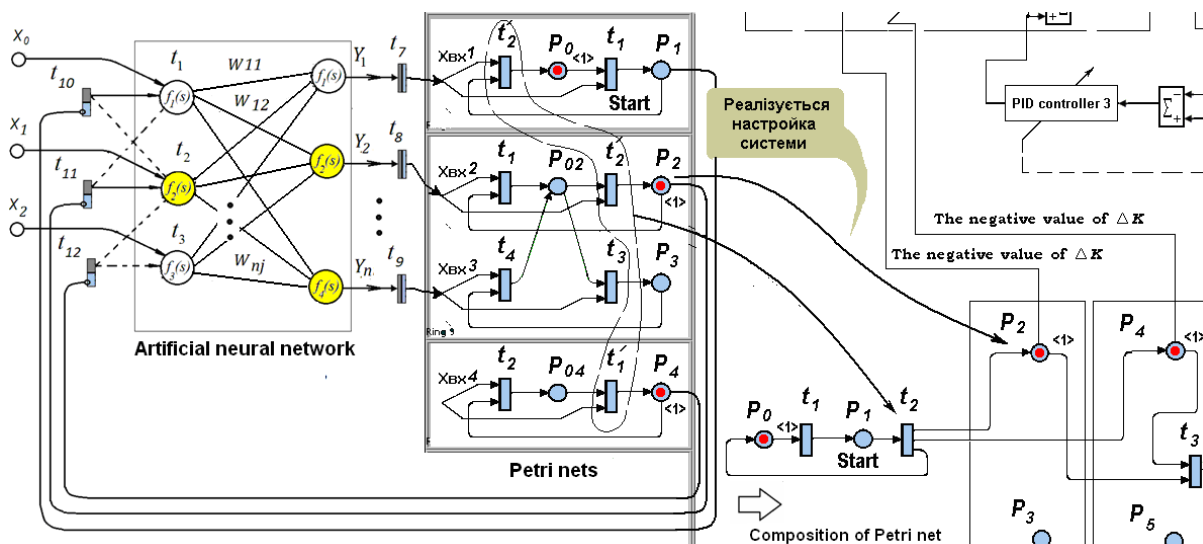


Figure 5 – Schematic diagram for the synthesis of an artificial neural network and Petri nets for the formation of appropriate logical control algorithms,  $w_{11}, \dots, w_{nj}$  is coefficients of interneuron connections;  $t_7, \dots, t_{12}$  is discrete-continuous transitions providing the communication between an artificial neural network and Petri nets



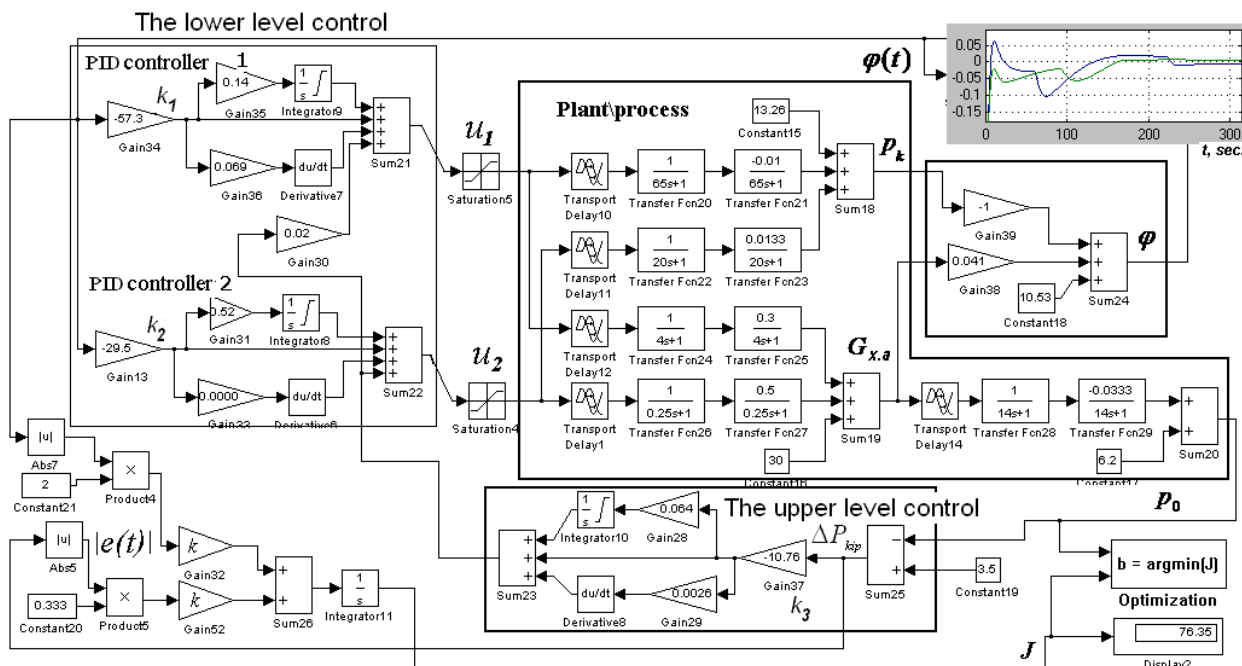


Figure 6 – Block diagram of the model of the coordinating automatic control system presented by means of the MATLAB \ Simulink software environment

Table 1 –Values of the  $J$  integral indicator for the quality of system functioning after setting and optimization based on software

	Setting for separation of motions mode at $\alpha = 0.3$	Setting for separation of motions mode at $\alpha = 0.7$	Step-by-step system setting at $\alpha = 1$
Setting in the application based on the Labview environment	45.32	98.7	115.36
Optimization in the MATLAB/Simulink 5.2 framework.	36.4	81	87

Transient processes of the optimized and set systems in different software environments are also presented in Fig. 6. Such obtained graphs allow to evaluate the quality for setting of system.

## 6 DISCUSSION

The setting program of systems for the subordination of control processes we can compare with an analogue of the optimizer program based on the MATLAB/Simulink 5.2 environment. Comparing the data from Table 1, we can draw the appropriate conclusion. The difference in the values of the integral indicator for different systems is small. However, it is obvious that the quality indicators of the system have become better after optimization in the MATLAB/Simulink environment. In order to assess the fundamental suitability of the presented software application we also need to synthesize on its basis a number of control systems for the various objects of automatic control not only in the field of refrigeration equipment. Further expansion of the software application should be directly related to an increase in the dimension of the multi-layer artificial neural network, which is implemented in software with elements of the initial training (Fig. 5).

This expansion is quite important, since in such a system any operator action is associated with the work of an artificial neural network, which represents an intelligent technology for automated configuration of the multi-level control system. This automated setting has a significant difference from similar synthesis and optimization using

the MATLAB/Simulink environment. In a particular case during operation of the control object we able to rebuild the system in order to provide subordination of regulatory processes.

## CONCLUSIONS

**The scientific novelty of the results.** The problem associated with the development of a software application providing automatic synthesis of Petri nets was solved in the present work. This software application was developed based on Labview 2009 environment for setting up multi-level control systems. Thus the design technique of automatic synthesis of Petri nets based on a logical classification algorithm has got the further development.

**The practical significance of the results.** The developed software application has practical importance. The Labview 2009 software environment is integrated with the various software and hardware automation of laboratory research and technological processes.

**The prospects for further research.** Further development of the scientific direction should be directly related to the formation of methods for training of neural networks which we can use in the developed software application.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The scientific work was carried out at the department of technological processes automation and robotic systems of Odessa National University of Technology.

The authors would like to give thanks to the scientific and technical library of Odessa Technological University in connection with providing search for the necessary scientific materials related to the synthesis of Petri nets and the development of software applications based on the Labview environment.

## REFERENCES

1. Denisenko A. V., Gurskiy A. A. Information technology of visualization for technological processes for research modes of functioning of complex technological systems [Text], *System Research and Information Technologies*, 2021, Issue 2, pp. 74–83. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.2.06
2. Barbierato E., Gribaudo M., Iacono M. Modeling hybrid systems in SIMTHESys, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2016, Issue 327, pp. 5–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2016.09.021>
3. Lu X., Zhou M., Ammari A. C., Ji J. Hybrid Petri nets for modeling and analysis of microgrid systems, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2016, Volume 3, Issue 4, pp. 349–356. DOI: 10.1109/JAS.2016.7510070
4. Yang F., Wu N., Qiao Y., Su R. Polynomial approach to optimal one-wafer cyclic scheduling of treelike hybrid multi-cluster tools via Petri nets, *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 2017, Volume 5, Issue 1, pp. 270–280. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510772
5. Zgurovskii M. Z., Denisenko V. A. Дискретно неперивніє системи з управляємою структурою. Kiev, Naukova dumka, 1998, 350 p. ISBN 966-00-0171-1
6. Peterson J. L. Petri net theory and the modeling of systems. Prentice Hall PTR, 1981, 290 p. ISBN 0-13-661983-5
7. He D. W., Streghe B., Tolle H., Kusiak A. Decomposition in automatic generation of Petri nets for manufacturing system control and scheduling, *International Journal of Production Research*, 2000, Volume 38, Issue 6, pp. 1437–1457. DOI: 10.1080/002075400188942
8. Ndiaye M. A. A. et al. Performance assessment of industrial control system during presales uncertain context using automatic Colored Petri Nets model generation [Text], *2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*. IEEE, 2016, pp. 671–676. DOI: 10.1109/CoDIT.2016.7593643
9. Durmuş M. S., Yıldırım U., Söylemez M. T. Automatic generation of Petri Net supervisors for railway interlocking design [Text], *2012 2nd Australian Control Conference*. IEEE, 2012, pp. 180–185. ISBN: 978-1-4244-9588-7book e-ISBN :978-605-01-0013-6
10. Yu D., Liu Z. Towards the Automatic Generation of Petri nets for the OWL-S-based Complex Processes [Text], *International Journal of u-and e-Service, Science and Technology*, 2014, Volume 7, Issue 2, pp. 179–188. ISSN: 2005-4246 IJUNESST
11. Gurskiy A. A., Goncharenko A. E., Dubna S. M. Formation of the synthesis algorithms of the coordinating control systems by means of the automatic generation of Petri nets [Text], *Automation of technological and business processes*, 2016, Volume 8, Issue 3, pp. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v8i3.565>
12. Gurskiy A. A., Denisenko A. V., Dubna S. M. Algorithms for tuning of the coordinating automatic control systems [Text], *Radio electronics, computer science, control*, 2020, No. 1, pp. 190–199. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-19>
13. Gurskiy A. A., Denisenko A. V., Dubna S. M. The automatic synthesis of Petri net based on the functioning of artificial neural network [Text], *Radio electronics, computer science, control*, 2021, No. 2, pp. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-9>
14. Denisenko, A. V. Informacionnaya tehnologiya animacii slozhnyh tehniceskikh kompleksov na osnove diskretno-neprevrynyh setej, Flash-tehnologii i instrumentalnyh sredstv DCNET, *Data Recording, Storage & Processing*, 2016, Volume 16, Issue 3, pp. 54–60. ISSN 1560-9189
15. Denisenko A. V. Strukturno-analiticheskoe modelirovanie i animaciya tehnologicheskikh processov v inzhenerno-tehniceskikh kompleksah, *Data Recording, Storage & Processing*, 2016, Volume 18, Issue 2, pp. 67–74. ISSN 1560-9189
16. Denisenko A. V., Gurskiy A.A. Development of principles of dc-net and flash environments interaction, *Automation of technological and business-processes*, 2016, Volume 8, Issue 2, pp. 22–26. DOI: 10.15673/atbp.v8i2.164.
17. Du C., Li B., Liu H., Ji Y., Yao R., Yu W. et al. Quantification of personal thermal comfort with localized airflow system based on sensitivity analysis and classification tree model, *Energy and Buildings*, 2019, July, Volume 194, pp. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.010>
18. Liang J., Qin Z., Xiao S., Ou L., Lin X. et al. Efficient and secure decision tree classification for cloud-assisted online diagnosis services, *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, 2021, Volume 18, Issue 4, pp. 1632–1644. DOI: 10.1109/TDSC.2019.2922958
19. Boychuk L. M. Separation of motions and steady balance in the balance dynamic systems of the open type, *Journal of Automation*, 1991, Issue 6, pp. 55–64. ISSN 0572-2691
20. Boychuk L. M. Two Approaches to the Structural Synthesis of Control Systems: Dynamical Filtration and Automatic Compensation [Text], *Journal of Automation and Information Sciences*, 1998, Volume 30, Issue 6, pp. 13–22. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v30.i6.20

Received 13.05.2024.

Accepted 18.08.2024.

УДК 681.513

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АВТОМАТИЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ МЕРЕЖ ПЕТРІ

**Гурський О. О.** – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем інституту комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П.Н. Платонова Одеського національного технологічного університету, Одеса, Україна.

**Дубна С. М.** – старший викладач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем інституту комп'ютерних систем і технологій «Індустрія 4.0» ім. П. Н. Платонова Одеського національного технологічного університету, Одеса, Україна.

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Вирішено актуальне завдання, що пов'язане з розробкою та перевіркою на принципову придатність програмного додатку, який представляє візуалізацію автоматичного синтезу мереж Петрі при налаштуванні багатоперивних систем управління. Таке завдання є актуальним, оскільки вперше реалізується інтеграція засобів дискретно-безперервних мереж середовища DC-Net у середовище Labview за рахунок реалізації автоматичного синтезу мереж Петрі. Це дає можливість автоматизувати процеси синтезу алгоритмів управління на основі розробки відповідних інтелектуальних систем.

**Мета роботи** – мінімізація часу та автоматизація процесу синтезу алгоритмів управління за рахунок інтеграції засобів дискретно-безперервних мереж та реалізації принципів автоматичного синтезу мереж Петрі.

**Метод.** Запропоновано принцип автоматичного формування мереж Петрі на основі логічного алгоритму класифікації різних нескоригованих алгоритмів. Для реалізації відповідного алгоритму, в програмному середовищі Labview 2009 за допо-

могою засобів графічного програмування було реалізовано багатопарову штучну нейронну мережу, на основі якої забезпечується формування алгоритмів, автоматичний синтез та функціонування мереж Петрі. Показано принципи роботи програмного додатку, що реалізує такий автоматичний синтез мереж Петрі при налаштуванні багаторівневих систем управління.

**Результати.** На основі вже готового програмного додатку було проведено ряд експериментів з класифікації алгоритмів, формування та коригування мереж Петрі. Були задані також параметри деякого об'єкта управління, для якого були автоматично налаштовані системи управління на базі середовища Labview 2009. В результаті проведених експериментів було встановлено принципову придатність програмного додатку для синтезу деяких багаторівневих автоматичних систем управління. Після проведення процедур налаштування відповідної багаторівневої системи на лицьовій панелі віртуального стенду відзначалися всі параметри налаштування системи керування, а також було показано, що всі сигнали неузгодженості в системі та відхилення від співвідношення значень регульованих змінних зведені до нуля.

**Висновки.** Таким чином, у роботі було вирішено завдання, пов'язане з розробкою програмного забезпечення, на основі середовища Labview 2009, що реалізує автоматичний синтез мереж Петрі. Тим самим отримала подальший розвиток методика автоматичного синтезу мереж Петрі та технологія розробки певних алгоритмів на основі функціонування штучних нейронних мереж.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** мережа Петрі, штучна нейронна мережа, координувальна система автоматичного управління, узгодження перехідних процесів, регулювання співвідношення, алгоритм настройки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Denisenko A. V. Information technology of visualization for technological processes for research modes of functioning of complex technological systems [Text] / A. V. Denisenko, A. A. Gurskiy // System Research and Information Technologies. – 2021. – Issue 2. – P. 74–83. DOI: 10.20535/SRIT.2308-8893.2021.2.06
2. Barbierato E. Modeling hybrid systems in SIMTHESys / E. Barbierato, M. Gribaud, M. Iacono // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2016. – Issue 327 – P. 5–25. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.entcs.2016.09.021>
3. Hybrid Petri nets for modeling and analysis of microgrid systems / [X. Lu, M. Zhou, A. C. Ammari, J. Ji] // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2016. – Volume 3, Issue 4. – P. 349–356. DOI: 10.1109/JAS.2016.7510070
4. Polynomial approach to optimal one-wafer cyclic scheduling of treelike hybrid multi-cluster tools via Petri nets / [F. Yang, N. Wu, Y. Qiao, R. Su] // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. – 2017. – Volume 5, Issue 1. – P. 270–280. DOI: 10.1109/JAS.2017.7510772
5. Згуровский М. З. Дискретно непрерывные системы с управляемой структурой. [Текст] / М. З. Згуровский, В. А. Денисенко. – К. : Наукова думка, 1998. – 350 с. – ISBN 966-00-0171-1
6. Peterson J. L. Petri net theory and the modeling of systems / J. L. Peterson. – Prentice Hall PTR, 1981. – 290 p. ISBN 0-13-661983-5
7. Decomposition in automatic generation of Petri nets for manufacturing system control and scheduling / [D. W. He, B. Stregge, H. Tolle, A. Kusiak] // International Journal of Production Research. – 2000. – Volume 38, Issue 6. – P. 1437–1457. DOI: 10.1080/002075400188942
8. Performance assessment of industrial control system during presales uncertain context using automatic Colored Petri Nets model generation [Text] / Ndiaye M. A. A. et al. // 2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). – IEEE, 2016. – P. 671–676. DOI: 10.1109/CoDIT.2016.7593643
9. Automatic generation of Petri Net supervisors for railway interlocking design [Text] / M. S. Durmuş, U. Yıldırım, M. T. Söylemez // 2012 2nd Australian Control Conference. – IEEE, 2012. – P. 180–185. ISBN: 978-1-4244-9588-7book e-ISBN: 978-605-01-0013-6
10. Yu D. Towards the Automatic Generation of Petri nets for the OWL-S-based Complex Processes [Text] / D. Yu, Z. Liu // International Journal of u-and e-Service, Science and Technology. – 2014. – Volume 7, Issue 2. – P. 179–188. ISSN: 2005-4246 IJUNESST
11. Gurskiy A. A. Formation of the synthesis algorithms of the coordinating control systems by means of the automatic generation of Petri nets [Text] / A. A. Gurskiy, A. E. Goncharenko, S. M. Dubna // Automation of technological and business processes. – 2016. – Volume 8, Issue 3. – P. 13–23. DOI: <https://doi.org/10.15673/atbp.v8i3.565>
12. Gurskiy A. A. Algorithms for tuning of the coordinating automatic control systems [Text] / A. A. Gurskiy, A. V. Denisenko, S. M. Dubna // Radio electronics, computer science, control. – 2020. – No. 1. – P. 190–199. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-1-19>
13. Gurskiy A. A. The automatic synthesis of Petri net based on the functioning of artificial neural network [Text] / A. A. Gurskiy, A. V. Denisenko, S. M. Dubna // Radio electronics, computer science, control. – 2021. – No. 2. – P. 84–92. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2021-2-9>
14. Денисенко А. В. Информационная технология анимации сложных технических комплексов на основе дискретно-непрерывных сетей, Flash-технологии и инструментальных средств DCNET / А. В. Денисенко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2016. – Т. 16, № 3. – С. 54–60. ISSN 1560-9189
15. Денисенко А. В. Структурно-аналитическое моделирование и анимация технологических процессов в инженерно-технических комплексах / А. В. Денисенко // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 67–74. ISSN 1560-9189
16. Denisenko A. V. Development of principles of dc-net and flash environments interaction. / A. V. Denisenko, A. A. Gurskiy // Automation of technological and business-processes. – 2016. – Volume 8, Issue 2. – P. 22–26 DOI: 10.15673/atbp.v8i2.164.
17. Quantification of personal thermal comfort with localized airflow system based on sensitivity analysis and classification tree model / [C. Du, B. Li, H. Liu et al.] // Energy and Buildings. – 2019. – July, Volume 194. – P. 1–11 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.010>
18. Efficient and secure decision tree classification for cloud-assisted online diagnosis services / [J. Liang, Z. Qin, S. Xiao et al.] // IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing. – 2021. – Volume 18, Issue 4. – P. 1632–1644 DOI: 10.1109/TDSC.2019.2922958
19. Boychuk, L. M. Separation of motions and steady balance in the balance dynamic systems of the open type / L. M. Boychuk // Journal of Automation. – 1991. – Issue 6. – P. 55–64. ISSN 0572-2691
20. Boychuk L. M. Two Approaches to the Structural Synthesis of Control Systems: Dynamical Filtration and Automatic Compensation [Text] / L. M. Boychuk // Journal of Automation and Information Sciences. – 1998. – Volume 30, Issue 6. – P. 13–22. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v30.i6.20

## OPTIMIZATION OF THE PARAMETERS OF SYNTHESIZED SIGNALS USING LINEAR APPROXIMATIONS BY THE NELDER-MEAD METHOD

**Lysechko V. P.** – Dr Sc. Professor, Scientific Center of the Air Force Ivan Kozhedub Kharkov National University of Air Forces, Kharkiv, Ukraine.

**Komar O. M.** – PhD, Associate Professor, Associate Professor of National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Bershov V. S.** – Post-graduate student, Department of Transport Communication, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine.

**Veklych O. K.** – Post-graduate student, Department of Telecommunication systems and networks State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The article presents the results of a study of the effectiveness of using the Nelder-Mead method to optimize the parameters of linear approximations of synthesized signals. Algorithms have been developed and tested that integrate spectral, temporal, and statistical analyzes and provide reasonable optimization. The effectiveness of the application of the Nelder-Mead method was proven by experiment. The obtained results substantiate the improvement of the properties of the mutual correlation of signals and the reduction of the maximum deviations of the side lobes, which opens up prospects for the further application of the method in complex scenarios of signal synthesis.

**Objective.** The purpose of the work is to evaluate the effectiveness of the application of the Nelder-Mead method when adjusting the parameters of linear approximations to optimize the mutual correlation and minimize side deviations of complex synthesized signals.

**Method.** The main research method is the comparison of various optimization algorithms for the selection of the most effective approaches in linear approximations of synthesized signals, taking into account such criteria as accuracy, speed and minimization of deviations. Scientific works [1, 2, 4–6, 8, 9] present algorithms, including the Nelder-Mead method and differential evolution. The effectiveness of these methods is achieved due to adaptive optimization procedures that improve the characteristics of signals.

It is worth noting that the methods have disadvantages associated with high requirements for computing resources, especially when processing large data. This can be minimized using combined optimization methods that take into account the interaction of signal parameters. Another important direction of improvement is the optimization of methods for adaptation to dynamic changes in the characteristics of complex signals, which allows to achieve high adaptability and reliability of real-time systems.

**Results.** As a result of the experiment using the Nelder-Mead method, an increase in the similarity of spectral densities was achieved from 0.52 in the first iteration to 0.90 in the fourth, with a significant decrease in the distance between the peaks of the spectrum from 1.2 to 0.4, which indicates high adaptability and the accuracy of the method in adjusting the parameters of the synthesized signals.

**Conclusions.** The effectiveness of the Nelder-Mead method for adjusting the specified parameters of the synthesized signals was experimentally proven, which is confirmed by a significant improvement in the similarity of the spectra with each iteration. This opens the way for additional optimizations and application of the method in various technological areas.

**KEYWORDS:** optimization method, synthesized signals, Nelder-Mead method, approximation by linear functions, spectral characteristics, ensemble properties of signals, iteration algorithm, noise immunity, side lobe emissions.

### NOMENCLATURE

$J(x)$  is an objective function

$x(t)$  is a signal;

$y(t)$  is a set value for deviation;

$T$  is a duration;

$E$  is an energy;

$BW$  is a spectrum width;

$C$  is a cross-correlation;

$P(t)$  is a deviation of the signal at the moment of time;

$t$  is a time index;

$\lambda, \mu, \xi, \nu$  is a parameters that regulate the weight between the deviation criterion and the side lobes;

$x_i^0$  is the initial value of the  $i$ -th variable;

$x_r$  is a displayed point;

$x_c$  is a centroid, calculated as the arithmetic mean of all points of the simplex, except for the worst one;

$x_h$  is the worst point of the simplex, the point with the highest value of the objective function;

$\alpha$  is a “reflection” coefficient;

$x$  is a set of parameters for an ensemble of signals;

$S_x$  is a spectral density of an ensemble of signals with parameters  $x$ ;

$S_0$  is a given spectral density;

$H_x$  is a signal function with parameters  $x$ ;

$H_0$  is a given signal function;

$w_1 w_2$  is a weighting factors that determine the importance of the similarity of the spectral densities and the level of blurring of the side lobes;

$Sim_{ensemble}$  – the similarity function, which takes into account the similarity between the spectral characteristics of the signals in the ensemble;

$Blur_{resistant}$  is a blur function that takes into account the blurring of the side lobes of the signal function;



$\alpha, \beta$  is a weighting factors that regulate the importance of ensemble properties and immunity properties, respectively;

$S_i(t), S_j(t)$  is a functions of the spectral density of two different distributions of signals (“true” distribution and approximation of this distribution);

$\log\left(\frac{S_i(t)}{S_j(t)}\right)dt$  is a logarithm of the ratio of the distribution densities at each moment of time  $t$ , which reflects the local difference between them;

$\sigma$  is a standard deviation or scale of uncertainty or noise;

$t$  is a time parameter;

$S(t; \theta)$  is a signal or its spectral component depends on certain parameters  $\theta$ ;

$\int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)$  is a Gaussian function that decreases on either side of the center.

## INTRODUCTION

Optimizing the parameters of synthesized signals using methods with constraints that use approximation by linear and nonlinear functions is a promising and relevant area of research [1–14]. These methods make it possible to obtain signals with specified spectral, temporal, statistical and other characteristics, including a high level of immunity. They turn the problem of signal synthesis into the problem of optimizing the chosen objective function, which contains physical or technological limitations [2, 6, 8]. Various approaches are used to study the properties of synthesized signals, in particular, the analysis of their frequency, time characteristics and resistance to interference. Solving this problem is important and necessary for improving the efficiency of telecommunication systems, because it ensures their stable and reliable operation in conditions of various disturbances.

**The object of study** is the process of optimizing synthesized signals according to given parameters.

**The subjects of study** are optimization algorithms and methods, in particular the Nelder-Mead method.

**The purpose of this work** is to evaluate the effectiveness of the Nelder-Mead method for optimizing the parameters of linear approximations of synthesized signals in order to improve their properties.

## 1 PROBLEM STATEMENT

Let us consider the most effective methods of approximating functions for solving optimization problems in signal synthesis. Classical optimization methods with constraints, which are based on the approximation of the objective function by linear functions, are widely used for the synthesis of signals with defined characteristics. Such methods include the Nelder-Mead method, methods based on gradients, Newton’s method, and others [1, 3, 5]. We will analyze the effectiveness of the Nelder-Mead method

for the synthesis of complex signal ensembles, in particular, focusing on improving the cross-correlation properties and significantly reducing the maximum deviations of the side lobes of the target function.

Methods based on linear approximation of the objective function systematize scientific optimization problems using the universal algorithm presented in Fig. 1.

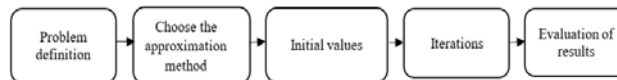


Figure 1 – General optimization algorithm by linear approximation

These methods, in particular, make it possible to simplify the optimization process through the linear representation of complex dependencies, which is the key to effectively solving a wide range of current scientific problems.

Linear approximation provides ease of use and implementation, especially when initial data or functional dependencies are too complex for direct analysis. It allows you to estimate the influence of various parameters on the target function with high accuracy, without delving into the excessive complexity of real processes. The main stages of this algorithm include defining the problem, choosing an approximation method, calculating parameters, verifying the obtained results, and correcting the model for the purpose of optimization.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

Research in the field of optimizing the parameters of synthesized signals using the Nelder-Mead method and other evolutionary algorithms is actively considered in the scientific works of various authors. The works [1, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 13] analyze various aspects of linear and nonlinear signal approximations, demonstrating significant progress in improving the spectral characteristics and efficiency of signals. However, these studies also reveal underexplored areas, such as the impact of algorithmic constraints on system scalability and stability under diverse conditions. Special attention is drawn to the works [2, 3, 11, 14], which investigate the use of Nelder-Mead and other optimization methods for improving block diagrams of signal processing and their analytical models. It was found that despite the effectiveness in specific scenarios, there are problems with the integration of these approaches into wider systems, which requires further research into the adaptation and scaling of the algorithms. The comparative analysis of optimization methods presented in [7] indicates the differences in efficiency and areas of application of various approaches, offering additional opportunities for improving interoperability and interaction in complex scenarios. Also an important aspect is the development and optimization of automatic control systems, as stated in [8], where the Nelder-Mead algorithm is used to achieve higher accuracy and control adaptability.

These works formed the basis for further research devoted to the evaluation of the effectiveness of optimization

tion methods for linear approximations of synthesized signals, namely the Nelder-Mead method for complex signal ensembles, where high accuracy and adaptability to variable conditions are critical. The use of such methods will allow not only to improve the characteristics of signals, in particular their spectral efficiency and mutual correlation, but also to ensure a high level of immunity and performance in complex and dynamic telecommunications systems that require high reliability and adaptation to environmental changes.

### 3 MATERIALS AND METHODS

Let us consider in more detail the stages of the general optimization algorithm by linear approximation.

Preliminary Stage. An optimization problem is determined with the formalization of the objective function and constraints. For demonstration, consider the problem of signal synthesis. [3].

Let the signal be the specified value for the deviation, and the objective function is defined as the sum of the squares of the deviations of the side lobes from the specified value [5] by the formula (1):

$$J(x) = \sum_t x(t) - y(t))^2. \quad (1)$$

Limitations determine such parameters of the ensemble of signals as their duration, energy, spectral width, mutual correlation, etc. This approach is essential to minimize the discrepancies between the side lobes and the desired signal profile, ensuring optimal signal quality and performance. By focusing on the deviations of the side lobes, we can effectively control and optimize the overall signal structure.

Suppose there are restrictions on the duration of the signal duration, energy, spectrum width, cross-correlation, then the mathematical system of restrictions will look like this in the sample:

$$\begin{cases} g_1(x) = T - T_{\max} \leq 0, \\ g_2(x) = E - E_{\max} \leq 0, \\ g_3(x) = BW - BW_{\max} \leq 0, \\ g_4 = C - C_{\max} \leq 0 \\ \dots \end{cases} \quad (2)$$

The cross-correlation determined by the formula (3) [7, 6]:

$$C_{xy}(\tau) = \frac{\sum_t x(t_i)y(t_i)}{\sqrt{\sum_t x(t_i)^2 \cdot \sum_t y(t_i)^2}}. \quad (3)$$

The discrete approximation for sequences is calculated by the formula (4):

$$C_{xy}[n] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[m] \cdot y[m+n]. \quad (4)$$

In this case, it is also necessary to consider the parameter of the signal energy, which is determined as the square of its amplitudes. For the signal  $x(t)$  it is calculated using the mathematical formula:  $E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$ . In the case of a discrete signal or sequence  $x[n]$ , it takes the form of the mathematical expression [2, 4, 11]:

$$E = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x[n]|^2. \quad (5)$$

The side lobes of the signal reflect the deviation of the signal amplitude from its average value  $P(t) = x(t) - x_{aver}$ . This indicator is an important parameter for evaluating signal quality and stability. To quantify these deviations, the sum of the squares of the deviations is used, which is determined by the following formula (6) [5]:

$$J_{side} = \sum_t P^2(t). \quad (6)$$

To consider the objective function in the optimization problem along with the cross-correlation and constraints, the general optimization problem will look like this formula (7):

$$\min J(x) + \lambda \cdot C + \mu \cdot (T - T_{\max}) + \nu \cdot (E - E_{\max}) + \xi \cdot (BW - BW_{\max}). \quad (7)$$

1 Stage. Determination of initial values of variables. At this stage, the initial values of the variables to be optimized are determined. These values can be chosen arbitrarily or with the help of expert judgments. The choice of initial values is important because they can affect the rate of convergence of the optimization algorithm and whether it reaches a global or only a local optimum. Initial values obtained from previous experiments or simulations can be used for the task of optimizing signal parameters. If the initial values of the variables are chosen arbitrarily or with the help of expert estimates, they can be specified by a formula [10,13]:

$$x^0 = [x_1^0, x_2^0, x_3^0, \dots, x_n^0] \quad (8)$$

2 Stage. Iterative method for finding optimal values of variables. This stage involves the use of an iterative method to find new values of variables that are closer to the optimal ones. At each iteration, the method updates the values of the variables, trying to decrease (or increase) the objective function. Examples of such methods are Nelder Mead, gradient descent, Newton, or heuristic optimization algorithms such as genetic algorithms [6, 13].

3 Stage. Evaluation of the optimization result and checking for compliance with constraints. To evaluate the optimization result, it is necessary to check whether the obtained variable values satisfy the constraints of the problem. If not, then it is necessary to continue the execution of the optimization method.

4 At the final stage, the model is corrected and further optimized (if necessary).

Let us consider in more detail the solution of the optimization problem using the Nelder-Mead method. The Nelder-Mead method is one of the most popular constrained optimization methods. It provides an effective search for the optimum within the permissible values of the variables, as it works by successive refinement of the estimate of the global minimum of the function [6, 9].

The Nelder-Mead method, also known as the deformed simplex method, is one of the direct optimization methods that does not require the calculation of function gradients. It is especially useful in problems where it is difficult or impossible to calculate the gradient, or where the function has numerous local extrema [14].

The general view of the optimization algorithm according to the Nelder-Mead method is presented in Fig. 2.

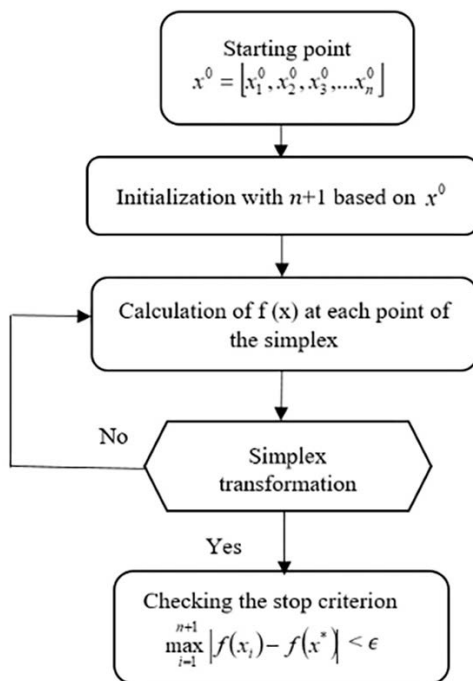


Figure 2 – Optimization algorithm based on the Nelder-Mead method

The main stages of calculation by the Nelder-Mead method are the following.

1. Initialization. Selection of initial simplex consisting of  $n + 1$  points in  $n$  – dimensional space. These points need not lie on the same hyperplane to form a dimensional simplex. Each point of the simplex is initialized so that they are located close enough to each other, but at the same time form a structure sufficient to start the optimization process.

2. Evaluation of the function. Calculation of the value of the objective function at each of  $n + 1$  points of the simplex. Ranking points by function value from best (lowest value) to worst (highest value).

3. Simplex transformation. It consists of a step – reflection – that is, the calculation of the mapped point rela-

tive to the worst point to investigate whether a better value can be found outside it, and extension – that is, if the mapped point shows an improvement, the method will try to “stretch” the simplex in that direction to investigate further. The formula for this step of the algorithm looks like this formula (10) [2]:

$$x_r = x_c + \alpha(x_c - x_h). \quad (9)$$

This formula allows you to calculate a new point  $x_r$ , which is a “mirror” of the worst point  $x_h$  relative to the centroid  $x_c$ , directing the search in a direction that can improve the value of the objective function. If no improvement can be found, the simplex is compressed towards the best point. If compression also fails, reduction is performed, where the simplex is reduced in size around the best point.

4. Checking the stop criterion. To check the stopping criterion in the Nelder-Mead method, the concept of standard deviation or another indicator of the dispersion of the function values among the points of the simplex is used. One approach is to check whether the maximum difference between the function values at the simplex vertices  $f(x_i)$  and the function value at the best point  $f(x^*)$  does not exceed a given threshold  $\epsilon$ . If the condition is fulfilled, the optimization process ends, there is no need for further iterations [8], formula (10):

$$\max_{i=1}^{n+1} |f(x_i) - f(x^*)| < \epsilon. \quad (10)$$

For practical testing, consider the application of the optimization algorithm based on the Nelder-Mead method for the synthesis of signals with specified ensemble properties and noise immunity. This method is optimal for application in the case of minimizing the difference between the spectral characteristics of the generated signals and the given target spectral density, as well as for controlling the blurring of the sidelobe deviation level. Mathematically, the function for the task of creating an ensemble of signals with a given similarity of spectral densities and a defined level of blurring of the side lobes is defined as [6] formula (11):

$$f(x) = w_1 \cdot \|S_x - S_0\|^2 + w_2 \cdot \|H_x - H_0\|^2. \quad (11)$$

This function defines the main minimization criterion for solving the problem of synthesis of signals with defined properties. The goal is to find such a set of parameters  $x$  that minimizes the function. The general form of the functional for optimization using the Nelder-Mead method for the synthesis of signals with given ensemble properties and immunity properties can be formulated as formula (12) [3]:

$$f(\theta) = \alpha \cdot Sim_{ensemble}(S) + \beta \cdot Blur_{resistan_s}(S(\theta)). \quad (12)$$

This approach allows the signal parameters to be precisely tailored to optimally meet the given criteria and ensure efficiency in a wide range of applications, from telecommunications to radar.

For a given objective function, different measures can be chosen to evaluate the similarity and blurring of signals. The choice of a specific measure depends on the specifics of the task and the desired characteristics of the signal. For similarity function can be selected:

– Kullback-Leibler similarity measure. It is especially valuable in scenarios where complex signal ensembles need to be analyzed, such as those used in telecommunications, cryptography, or radar. This measure not only allows us to measure the distance between two probability distributions, but also provides insights into the effectiveness of representing one distribution by another. For complex signal ensembles, the Kullback-Leibler measure provides a deeper understanding of how effectively a particular modulation or coding scheme can reproduce the properties of the original signal [7].

This is important in situations where highly complex signals need to be accurately reconstructed, such as in satellite communication systems, where every lost or distorted bit can lead to serious errors in data transmission. A measure is used to measure the distance or difference between two probability distributions, allowing us to estimate how much one signal distribution deviates from a reference distribution. The mathematical expression that describes the Kullback-Leibler similarity measure can take the form [9, 10]:

$$Measure_{KL}(S_i, S_j) = \int_{-\infty}^{\infty} S_i(t) \log \left( \frac{S_i(t)}{S_j(t)} \right) dt. \quad (13)$$

The integral is calculated over all possible values of  $t$ , which makes it possible to estimate the total difference between the distributions over the entire range of their definition.

– Gaussian similarity measure. This measure is based on considering the spectral density of signals as Gaussian processes, which allows us to estimate the differences between them through the parameters of their distributions. Unlike the Kullback-Leibler similarity measure, it does not evaluate the difference between probability distributions, but focuses on the analysis of deviations between two signals taking into account noise or uncertainty:

$$Measure_G(S_i, S_j) = \exp \left( -\frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \frac{S_i(t) - S_j(t)}{\sigma} \right)^2 dt \right). \quad (14)$$

The exponential function transforms the result into a range from 0 to 1, where a value closer to 1 means a smaller total deviation between  $S_i(t), S_j(t)$ , i.e. a higher

similarity. Function blurring  $Blur_{resistant}$  may include the following measures [5, 8]:

– Gaussian blur measure: used to estimate the fuzziness of the side lobes of a signal by modeling them as a Gaussian process. This helps determine the level of smoothing of unwanted spectral components:

$$Measure_G Blur(S(t; \theta)) = \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left( -\frac{t^2}{2\sigma^2} \right) |S(t; \theta)| dt. \quad (15)$$

Gaussian function that decreases on either side of the center. The integral of this function along  $t$  gives a general estimate of the effect of Gaussian blur on the signal.

– Riemann-Lebesgue blur measure: takes into account the integral sum of deviations from the “reference” (“ideal”) level of the side lobes, which allows for a more accurate assessment of their impact on the overall signal purity:

$$Measure_{RL} Blur(S(t; \theta)) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\varphi[S(t; \theta)](w)|}{1+w^2} dw. \quad (16)$$

Differentiated application of various measures allows for the adaptation of the optimization algorithm to solve specialized tasks in the field of signal synthesis and analysis. The use of the Kullback-Leibler similarity measure provides a deep understanding of the efficiency of reproducing complex signals, which is critically important for telecommunications and cryptography. The Gaussian similarity measure accounts for deviations between signals considering noise, enhancing the accuracy of evaluation. The Gaussian blur measure and the Riemann-Lebesgue blur measure help assess the level of smoothing of unwanted spectral components, improving signal clarity in radar systems and wireless cognitive systems. This approach enables precise tuning of signal parameters, ensuring high efficiency in various applications.

#### 4 EXPERIMENTS

To demonstrate the effectiveness of the Nelder-Mead optimization method in the synthesis of an ensemble of signals with given properties, a Matlab code was developed. The results of the program execution are presented in Figures 3 (a,d,c), which illustrate the process (dynamics) of the current spectral density (blue region) compared to the target spectral density (red region) at each iteration.

The closer the blue line (area) is to the red, the better the optimization result (Table 1).

Parameters: similarity, distance between peaks, error of spectral densities, step size, objective function value, smoothing factor, computation time, sample size, and significance level – show the evolution of the optimization process with each iteration of the Nelder Mead method, and the gradual approximation of the current spectral density to target. An additionally introduced smoothing factor is used to eliminate noise and stabilize



the spectral analysis data, while the computation time reflects the time required for each iteration of data processing, which is important when evaluating the algorithm's performance. Sample size refers to the number of data points used in the spectral analysis and is important

to ensure the reliability of the results. Finally, the level of significance was used to statistically check the dynamics of changes between iterations, confirming their significance or insignificance in the course of the experiment.

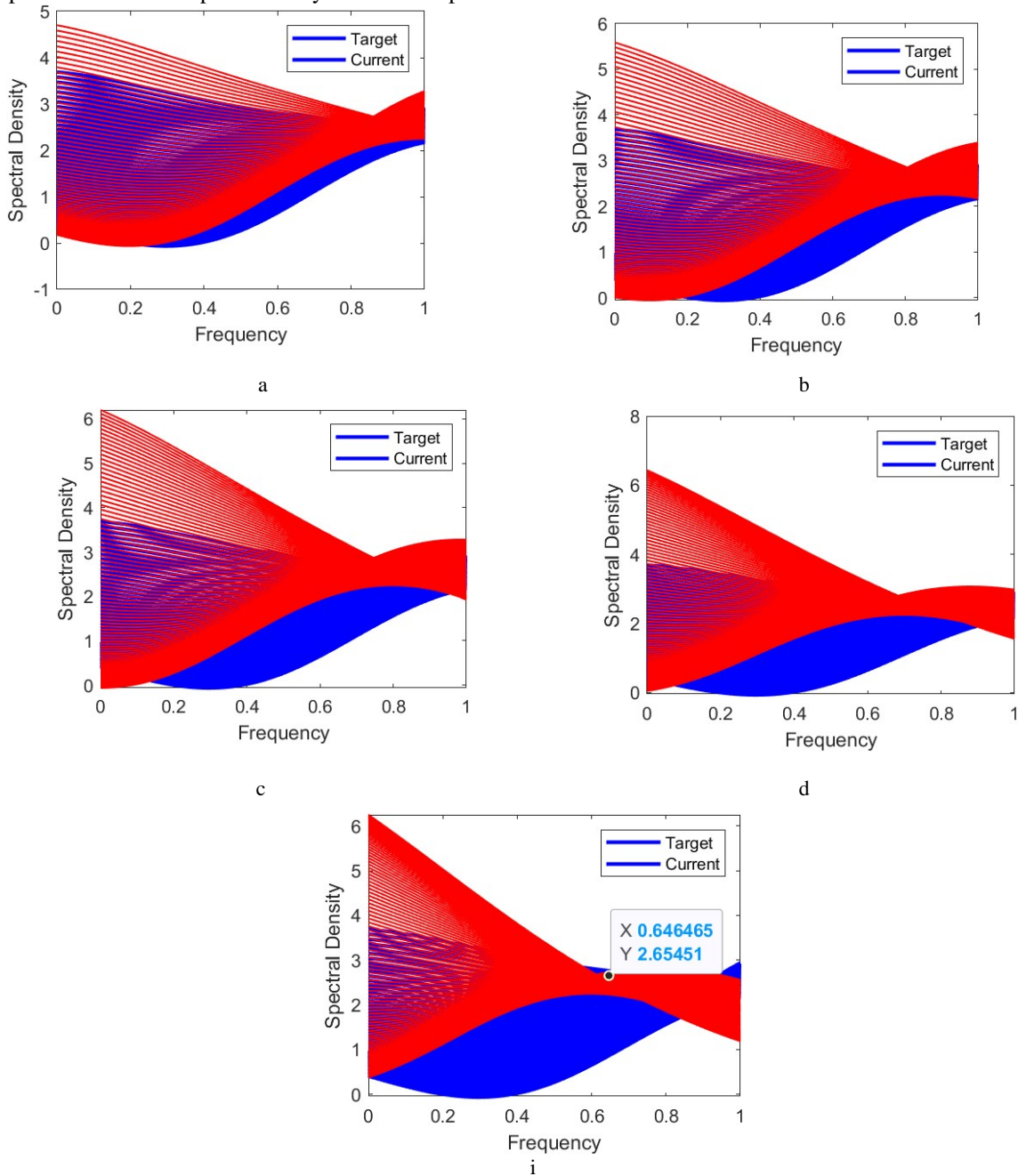


Figure 3 – Iterative optimization process of approximation of the current spectral density value to the target value:  
 a – First iteration, b – The second iteration, c – The third iteration, d – The fourth iteration, i – The fifth iteration

Table 1 – Dynamics of signal spectral density parameters by optimization iterations

Iteration	Similarity	Distance between peaks	Error of spectral densities	Step size	Objective function value	Smoothing factor	Calculation time (sec)	Sample size	Level of significance
1	0.52	1.2	0.5	1.2	0.02	0.1	15	1000	0.05
2	0.68	0.9	0.3	0.9	0.01	0.1	12	1000	0.05
3	0.82	0.6	0.2	0.6	0.005	0.1	10	1000	0.05
4	0.90	0.4	0.1	0.4	0.002	0.1	8	1000	0.05

Table 1 shows how the similarity process of spectral densities between signal parameters and the target spectrum changes with each iteration of the Nelder-Mead algorithm. This confirms the effectiveness of the method in adapting the signal parameters to achieve optimal values according to the relevant criteria.

## 5 RESULTS

As can be seen from Table 1 and Fig. 3–7, the similarity of spectral densities increases with each iteration. At the first iteration, the similarity is 0.52, that is, the initial parameters of the signal are very different from the specified spectral density. And on the fourth iteration, the similarity already reaches 0.90, which means that the synthesized signals become more similar to a signal with a given spectral density.

In the fourth iteration, the similarity increased by 78% compared to the first iteration. The distance between the peaks of the spectral densities also decreases with each iteration. In the first iteration, the distance is 1.2, and in the fourth iteration – 0.4. This means that the signal spectra are becoming more and more similar.

The error of the spectral densities also decreases with each iteration.

From the point of view of ensemble properties, the synthesized signals with each iteration become more and more similar to a signal with a given spectral density. This means that they will have similar statistical characteristics such as mean, variance, autocorrelation function.

Fig. 3 (a–i) and table 1 demonstrate that in this experiment, the speed, accuracy and stability of convergence of the Nelder-Mead method is also high. For 4 iterations, it increases the similarity of spectral densities from 0.52 to 0.90, that is, by 90%, which is equal to an increase of 1.7 times.

The Nelder-Mead method used in this experiment proves its high convergence speed and ability to precisely tune signal parameters, which is critical for applications where high accuracy of spectral characteristics is required, such as in communication, radar, and acoustics systems. Optimization that allows for greater similarity of spectra can significantly improve the quality of signal transmission, reducing errors and interference.

The further development of the direction of this research is that the Nelder-Mead method can provide higher efficiency in optimizing the parameters of complex signal ensembles when it is integrated with other technological approaches to further improve the results. In particular, the use of machine learning can help in the selection of initial parameters for an algorithm based on previously analyzed data, which can potentially reduce the number of iterations required and improve the convergence of the algorithm.

Training models on existing data sets can help determine optimal initial parameters for the Nelder-Mead algorithm, reducing the time to reach the optimal configuration. Also, machine learning models can adaptively adjust optimization parameters based on changing environmental conditions or real-time input, thus providing more

stable and efficient results. This extension of the Nelder-Mead method can significantly improve its versatility and open up new opportunities for its application in diverse and demanding technological areas.

## 6 DISCUSSION

The closest analogue to the proposed Nelder-Mead method for optimizing ensembles of complex signals is the method proposed in the work [12]. Unlike the approaches suggested in this paper, the authors of the referenced article applied the differential evolution method for optimizing the parameters of synthesized signals. However, the disadvantage of their methods lies in the low speed due to the need to calculate the distances between instances and the necessity and ambiguity of integrating the indicator into the complex measures of the informativeness of the instances.

Another relevant article [2], which proposes an approach for optimizing signal processing block diagrams using the Nelder-Mead method. The difference in this work is the focus on optimizing the block diagrams of signal processing, whereas our paper addresses the optimization of parameters of synthesized signals. The disadvantage of the method proposed by the authors is the need for numerous iterations to achieve acceptable results, which can lead to significant computational costs.

The advantage of the Nelder-Mead method proposed in this paper lies in its ability to provide an efficient search for the optimum within the permissible values of the variables without requiring the calculation of function gradients, significantly reducing calculation time and increasing convergence speed. However, this drawback can be seen as an advantage in the case of large samples: if we use a computationally simple distribution (e.g., a regular grid) and know the minimum and maximum values of each parameter, the computational cost of the proposed metrics will be lower than using a set of matched filter.

## CONCLUSIONS

Optimization of synthesized signal parameters using methods with constraints based on linear and nonlinear function approximations is a promising and relevant area of scientific and practical research. These methods allow obtaining signals with specified spectral, temporal, statistical, and other characteristics, including a high level of noise immunity. They transform the signal synthesis task into an optimization problem of the chosen objective function, which includes physical or technological constraints. Solving this problem is necessary to improve the efficiency of cognitive telecommunication systems, as it ensures their stable and reliable operation under various interference conditions.

**The scientific novelty** of the article lies in the improvement of the Nelder-Mead method for optimizing ensembles of synthesized signals by developing algorithms that integrate spectral, temporal, and statistical analyses and provide comprehensive justified optimization.

**The practical results** of the study show that the Nelder-Mead method is effective for tuning the parameters of linear approximations of synthesized signals. It has been experimentally proven that the use of this method significantly improves the mutual correlation properties of signals and reduces the maximum deviations of side lobes.

The obtained results justify the **prospects for further application** of the method in complex signal synthesis scenarios.

The urgent problem of mathematical support development is solved to automate the sampling at diagnostic and recognizing model building by precedents.

## REFERENCES

1. Ivanov V. V., Shovkun V. M., Shevchuk A. V. Optimization of synthesized signals with constraints based on nonlinear programming methods, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". "Radio equipment, radio electronics, television" series*, 2015, No. 1, pp. 11–16.
2. Koc A., & Yilmaz T. A Nelder-Mead Based Approach for Optimizing Signal Processing Block Diagrams, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2017, No. 64(11), pp. 1899–1902. DOI: 10.1109/TCSII.2017.2755464
3. Gülten K. Nelder-Mead simplex method for optimization of linear regression models, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 2016, No. 31(2), pp. 363–369.
4. Komar A. V., Komar O. M. Efficient Optimization of Synthesized Signals Using Nelder-Mead Simplex Algorithm, *Radioelectronics and Communication Systems*, 2020, Vol. 63, № 1, pp. 57–62.
5. Pugach O. V., Ivanov A. M. Optimization of filter parameters using Nelder-Mead and Levenberg-Marquardt algorithms, *Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" Series "Radioelectronics, telecommunications, informatics"*, 2020, No. 3, pp. 22–27.
6. Shevchenko O. S., Kushnirenko O. V. Synthesis of signals with specified spectral characteristics using the Nelder-Mead method, *Bulletin of the National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute". "Automatics, informatics, electronics" series*, 2018, No. 2, pp. 95–100.
7. Khimynets T. D., Khmelivskiy Y. S. Optimization Methods Comparison and Their Efficiency Evaluation, *Donetsk National University "Vasyl Stus". Applied Information Technologies*, 2023, No. 1(75), pp. 206–211
8. Tkachenko V. M., Yakovlev O. M. Optimization of parameters of automatic control systems using the Nelder-Mead algorithm, *Bulletin of the National Technical University "Kyiv Polytechnic Institute". "Automatics, informatics, electronics" series*, 2017, No. 1, pp. 75–80.
9. Petrenko O. M., Komar O. M. Optimization of parameters of linear approximations of synthesized signals using the method of differential evolution, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". "Radio equipment, radio electronics, television" series*, 2016, No. 2, pp. 22–27.
10. Ivanov V. V., Shovkun V. M., Shevchuk A. V. Application of the dynamic programming method to optimize parameters of linear approximations of synthesized signals, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". "Radio equipment, radio electronics, television" series*, 2017, No. 3, pp. 18–23.
11. Syvolovskyi I. M., Lysechko V. P., Komar O. M. et al. Analysis of methods for organizing distributed telecommunication systems using the paradigm of Edge Computing, *National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic". Control, Navigation and Communication Systems*, 2024, No. 1(75), pp. 206–211, DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.206
12. Komar O. M., Petrenko O. M. Optimization of parameters of linear approximations of synthesized signals using evolutionary algorithms, *Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". "Radio equipment, radio electronics, television" series*, 2018, No. 4, pp. 24–29.
13. Shovkun V. M., Ivanov V. V., Shevchuk A. V. Synthesis of multichannel signals with given ensemble properties, *Scientific bulletin of the National University of Defense of Ukraine*, 2016, No. 1, pp. 114–119.
14. Oleinik O. V., Sydorenko O. M. Optimization of Synthesized Signals Using Differential Evolution Algorithm, *International Journal of Microelectronics and Nanotechnology*, 2019, Vol. 14, № 3, pp. 195–202.

Received 31.06.2024.

Accepted 02.09.2024.

УДК 621.391

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ЛІНІЙНИХ АПРОКСИМАЦІЙ СИНТЕЗОВАНИХ СИГНАЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДУ НЕЛДЕРА-МІДА

**Лисечко В. П.** – д-р техн. наук, професор Науковий центр Повітряних Сил Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

**Комар О. М.** – канд. техн. наук, доцент, доцент Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Бершов В. С.** – аспірант кафедри транспортного зв'язку, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна.

**Веклич А. К.** – аспірант кафедри телекомунікаційних систем та мереж, Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій, Київ, Україна.

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** В статті представлено результати дослідження ефективності використання методу Нелдера-Міда для оптимізації параметрів лінійних апроксимацій синтезованих сигналів. Розроблено та апробовано алгоритми, що інтегрують спектральний, часовий та статистичний аналізи та забезпечують обґрунтовану оптимізацію. Ефективність застосування методу Нелдера-Міда доведено за допомогою експерименту. Отримані результати обґрунтовують поліпшення властивостей взаємної кореляції сигналів та зменшення максимальних відхилень бічних пелюсток, що відкриває перспективи для подальшого застосування методу в комплексних сценаріях синтезу сигналів.

© Lysechko V. P., Komar O. M., Bershov V. S., Veklych O. K., 2024  
DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-4



**Мета.** Метою роботи є оцінка результативності застосування методу Нелдера-Міда при налаштуванні параметрів лінійних апроксимацій для оптимізації взаємної кореляції та мінімізації побічних відхилень складних синтезованих сигналів.

**Метод.** Основним методом дослідження є порівняння різних алгоритмів оптимізації для вибору найбільш перспективних підходів у лінійних апроксимаціях синтезованих сигналів. Існують різні показники для порівняння, такі як точність оптимізації, швидкість виконання алгоритмів, та мінімізація відхилень.

У наукових роботах [1, 2, 4, 5, 6, 8, 9], представлені різні методи та алгоритми оптимізації, включаючи метод Нелдера-Міда та диференціальну еволюцію. Найбільш ефективні з них ґрунтуються на використанні адаптивних методів оптимізації та ітераційних процедур для поліпшення характеристик сигналів.

Варто відзначити, що запропоновані методи мають недоліки, пов'язані зі складністю і вимогами до обчислювальних ресурсів, особливо при великих обсягах даних або високих вимогах до точності. Ці недоліки можна суттєво зменшити шляхом застосування комбінованих методів оптимізації, які враховують різні аспекти моделювання, такі як взаємозв'язки між параметрами сигналу та їх вплив на загальні властивості системи. Іншим важливим напрямком вдосконалення є оптимізація методів для адаптації до динамічних змін у характеристиках складних сигналів, що дозволяє досягти високої адаптивності та надійності систем.

**Результати.** В результаті експерименту з використанням методу Нелдера-Міда було досягнуто збільшення схожості спектральних щільностей з 0,52 у першій ітерації до 0,90 у четвертій, зі значним зменшенням відстані між піками спектру з 1,2 до 0,4, що свідчить про високу адаптивність та точність методу в налаштуванні параметрів синтезованих сигналів.

**Висновки.** Експериментальним шляхом доведено ефективність методу Нелдера-Міда для налаштування заданих параметрів синтезованих сигналів, що підтверджується значним покращенням схожості спектрів з кожною ітерацією. Це відкриває шлях для додаткової оптимізації та застосування методу в різноманітних технологічних областях.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** метод оптимізації, синтезовані сигнали, метод Нелдера-Міда, апроксимація лінійними функціями, спектральні характеристики, ансамблеві властивості сигналів, ітераційний алгоритм, завадостійкість, викиди бічних пелюстків.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Іванов В. В. Оптимізація синтезованих сигналів з обмеженнями на основі методів нелінійного програмування / В. В. Іванов, В. М. Шовкун, А. В. Шевчук // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка, телебачення». – 2015. – № 1. – С. 11–16.
2. Koc A. A Nelder-Mead Based Approach for Optimizing Signal Processing Block Diagrams / A. Koc, & T. Yilmaz // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. – 2017. – No. 64(11). – P. 1899–1902. DOI: 10.1109/TCSII.2017.2755464
3. Gülten K. Nelder-Mead simplex method for optimization of linear regression models / K. Gülten // Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University. – 2016. – No. 31(2). – P. 363–369.
4. Komar A. V. Efficient Optimization of Synthesized Signals Using Nelder-Mead Simplex Algorithm / A. V. Komar, O. M. Komar // Radioelectronics and Communication Systems. – 2020. – Vol. 63, № 1. – P. 57–62.
5. Пугач О. В. Оптимізація параметрів фільтрів з використанням алгоритмів Нелдера-Міда та Левенберга-Марквардта / О. В. Пугач, А. М. Іванов // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Серія «Радіоелектроніка, електров'язок, інформатика». – 2020. – № 3. – С. 22–27.
6. Шевченко О. С. Синтез сигналів з заданими спектральними характеристиками за допомогою методу Нелдера-Міда / О. С. Шевченко, О. В. Кушніренко // Вісник Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». Серія «Автоматика, інформатика, електроніка». – 2018. – № 2. – С. 95–100.
7. Khimynets T. D. Optimization Methods Comparison and Their Efficiency Evaluation / T. D. Khimynets, Y. S. Khmelivskiy // Donetsk National University «Vasyl Stus». Applied Information Technologies. – 2023. – No. 1(75). – P. 206–211
8. Ткаченко В. М. Оптимізація параметрів систем автоматичного керування за допомогою алгоритму Нелдера-Міда / В. М. Ткаченко, О. М. Яковлев // Вісник Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут». Серія «Автоматика, інформатика, електроніка». – 2017. – № 1. – С. 75–80.
9. Петренко О. М. Оптимізація параметрів лінійних апроксимацій синтезованих сигналів за допомогою методу диференціальної еволюції / О. М. Петренко, О. М. Комар // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка, телебачення». – 2016. – № 2. – С. 22–27.
10. Іванов В. В. Застосування методу динамічного програмування для оптимізації параметрів лінійних апроксимацій синтезованих сигналів / В. В. Іванов, В. М. Шовкун, А. В. Шевчук // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка, телебачення». – 2017. – № 3. – С. 18–23.
11. Analysis of methods for organizing distributed telecommunication systems using the paradigm of Edge Computing / [I. M. Syvolovskyi, V. P. Lysechko, O. M. Komar et al.] // National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». Control, Navigation and Communication Systems. – 2024. – No. 1(75). – P. 206–211. DOI: 10.26906/SUNZ.2024.1.206
12. Комар О. М. Оптимізація параметрів лінійних апроксимацій синтезованих сигналів за допомогою еволюційних алгоритмів / О. М. Комар, О. М. Петренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Радіотехніка, радіоелектроніка, телебачення». – 2018. – № 4. – С. 24–29.
13. Шовкун В. М. Синтез багатоканальних сигналів з заданими ансамблевими властивостями / В. М. Шовкун, В. В. Іванов, А. В. Шевчук // Науковий вісник Національного університету оборони України. – 2016. – № 1. – С. 114–119.
14. Oleinik O. V. Optimization of Synthesized Signals Using Differential Evolution Algorithm / O. V. Oleinik, O. M. Sydorenko // International Journal of Microelectronics and Nanotechnology. – 2019. – Vol. 14, № 3. – P. 195–202.



## ADAPTATION OF THE DECISION-MAKING PROCESS IN THE MANAGEMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE

**Perederyi V. I.** – Dr. Sc., Professor of the Department of Computer Technologies and Information Security, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

**Borchik E. Y.** – PhD, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Mykolaiv National Agrarian University, Mykolaiv, Ukraine.

**Zosimov V. V.** – Dr. Sc., Professor of the Department of Computer Engineering, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine.

**Bulgakova O. S.** – PhD, Associate Professor of the Department of Computer Engineering, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The problem of human factor management in the process of making relevant decisions in the management of critical infrastructure facilities is currently very important and complex. This issue is becoming increasingly significant due to the dynamic and unpredictable nature of the environment in which these facilities operate. Effective management of CIF requires the development of new models and methods that are based on adaptive management principles. These models and methods must take into account the personal emotional and cognitive capabilities of the decision maker, who is often operating under the influence of destabilizing uncertain factors. The challenge is further compounded by the need to integrate these adaptive methods into existing human-machine systems, ensuring that they can respond in real-time to the rapidly changing conditions that can affect the decision-making process. The complexity and importance of this problem necessitate a multifaceted approach that combines probabilistic methods, intellectual technologies, and information-cognitive technologies. These technologies must be capable of providing real-time adaptation and assessment of the DM's emotional and cognitive state, which is critical for making relevant and timely decisions. The current unresolved problems in the field of creating adaptive information technologies for decision support in the management of CIF highlight the urgent need for a promising approach that can address these issues effectively and efficiently.

**Objective.** The objective is to propose a comprehensive method for evaluating the process of relevant decision-making, which depends on the functional stability of critical infrastructure facilities and the adaptation of factors related to the emotional-cognitive state of the decision maker. This method aims to provide a systematic approach to understanding how various factors, including the psycho-functional state of the DM, influence the decision-making process. Additionally, the objective includes the development of adaptive information and intellectual technologies that can support real-time evaluation and adjustment of the DM's emotional and cognitive states. This approach seeks to ensure that decisions are made efficiently and effectively, even under the influence of destabilizing uncertain factors. By addressing these aspects, the method aims to enhance the overall reliability and resilience of the CIF management processes. Furthermore, the objective encompasses the integration of Bayesian networks and a comprehensive knowledge base to facilitate the decision support system in providing timely and accurate information for decision-making.

**Method.** To implement this method, probabilistic methods, intellectual and information-cognitive technologies were used to provide acceptable adaptation and evaluation of the relevant decision-making process in real-time.

**Results.** The proposed method, based on intellectual and information-cognitive technology, allows for real-time assessment and adaptation of the emotional and cognitive state of the decision maker during the process of making relevant decisions. The implementation of probabilistic methods and Bayesian networks has enabled the development of a robust decision support system that effectively integrates adaptive management principles. This system ensures that the decision-making process remains stable and reliable, even in the presence of destabilizing uncertain factors. The real-time capabilities of the system allow for prompt adjustments to the psycho-functional state of the DM, which is critical for maintaining the functional stability of critical infrastructure facilities. The results demonstrate that the use of intellectual technologies and a comprehensive knowledge base significantly enhances the DM's ability to make informed decisions. Experiments have shown that this method improves the overall efficiency and effectiveness of CIF management, providing a promising approach for future applications in adaptive decision support processes. The results obtained from these experiments validate the potential of the proposed method to revolutionize the management of CIF by ensuring that decisions are both timely and appropriate, thereby contributing to the resilience and reliability of these essential facilities.

**Conclusions.** The results of the experiments allow us to recommend the use of the proposed method of rapid assessment and adaptation of the emotional and cognitive state of the decision maker for the process of making relevant decisions in real-time. The integration of intellectual and information-cognitive technologies into the decision support system has proven to be effective in enhancing the stability and reliability of the decision-making process in the management of critical infrastructure facilities. The real-time capabilities of the system facilitate prompt adjustments to the psycho-functional state of the DM, ensuring that decisions are made efficiently and effectively, even under the influence of destabilizing uncertain factors. The experimental results demonstrate that the proposed method significantly improves the overall efficiency of CIF management by providing a robust framework for adaptive decision support. The results obtained can be used in the development of adaptive DSS in the management of CIF, offering a promising approach for future applications. This method not only enhances the decision-making capabilities of DMs but also contributes to the resilience and reliability of CIF, ensuring their functional stability in dynamic and uncertain environments.

**KEYWORDS:** human-machine systems, decision making, adaptation, decision maker, information-cognitive technologies, intelligent technologies, Bayesian networks, information security, cybernetic security.

## ABBREVIATIONS

HMS is a human-machine systems;  
DM is a decision maker;  
DMP is a decision making process;  
DSS is a decision support system;  
BN is a Bayesian networks;  
DS is a decision support;  
CIF is a critical infrastructure facilities;  
PFS is a psycho functional state;  
KB is a knowledge base.

## NOMENCLATURE

$S_w$  is a main factors associated with the current psycho-emotional state of the DM;  
 $F$  is a physical and emotional fatigue;  
 $ET$  is an emotional tension;  
 $PR$  is a productivity;  
 $S_p$  is a main factors associated with the current cognitive state of DM;  
 $PI$  is a perception of information;  
 $RT$  is a reaction time;  
 $DT$  is a decision-making time;  
 $C$  is a concentration;  
 $IS$  is an information security;  
 $CS$  is a cyber security;  
 $Risk$  is a risk state of the production process of a critical facility;  
 $P_i$  is a probability of the implementation of the  $i$ -th threat to the production process of a critical facility;  
 $C_i$  is an amount of damage from the implementation of the  $i$ -th threat;  
 $FS$  is a functional stability of a critical infrastructure facility;  
 $Ad EC$  is an adaptation of the emotional and cognitive state of the DM;  
 $REL$  is a relevance of decision-making;  
 $u_1$  is a linguistic variable “decision-making time”;  
 $u_2$  is a linguistic variable “reaction time”;  
 $u_3$  is a linguistic variable “perception of information”;  
 $u_4$  is a linguistic variable “productivity”;  
 $u_5$  is a linguistic variable “physical and emotional fatigue”;  
 $u_6$  is a linguistic variable “emotional tension”;  
 $u_7$  is a linguistic variable “concentration”;  
 $v$  is a linguistic variable;  
{“standard”, “not standard”} is a term-set of variables  $u_i$ ;  
{“low”, “average”, “high”} is a term-set of the variable  $v$ ;  
 $R^*$  is a critical value of the measure of relevance of the decision making;  
 $f_1()$  is a function for assessing the degree of adaptation of DM’s emotional-cognitive state factors;  
 $f_2()$  is a function for assessing the degree of functional stability of CIF;  
 $f_3()$  is a function for assessing the degree of relevance of decisions made by DM.

## INTRODUCTION

The human factor in emergency situations, as one of the most important in safety, has become a subject of fundamental and applied scientific research and development in recent years. Recent events indicate the importance of the influence of destabilising factors of the external and industrial environment on the decision-making process of the DM, which leads to an increase in the probability of wrong decisions, especially in multi-level CIF with increased risk in management.

The classical methodology of decision-making with a given number of alternatives and complete information about them is not suitable for these conditions, because the information is limited and incomplete, while decisions should be made promptly, relying on the psycho-emotional and cognitive state of the DM.

In this regard, one of the most important problems is mutual adaptation and optimal distribution of functions between technical means and the operator, taking into account his psychophysiological and cognitive capabilities. However, the solution of this problem goes beyond the possibilities of traditional methods and means of solving these issues. For this purpose, an essential role should be given to the engineering-psychological aspect, which should be based on modern tools of artificial intelligence and information-cognitive technology.

Therefore, the technology of decision-making process in the process of CIF management should be based on the principle of hybrid intelligence – symbiotic integration of the functionality of artificial (computer) and natural (operator) intelligences.

**The object of study** are informational and mathematical models of decision-making process evaluation depending on the functional stability of CIF and the adaptation of factors of the DM’s emotional and cognitive state of mind when managing the object.

**The subject of study** are models and methods of decision-making in man-machine systems in the management of CIF.

**The purpose of the work** is to propose a method for evaluating the process of making relevant decisions depending on the functional stability of the CIF and adaptation of factors of the emotional-cognitive state of the DM.

## 1 PROBLEM STATEMENT

In the process of decision-making, the DM is influenced by external factors of the production environment and factors characterising his psycho-emotional  $S_w = \{ET, PR, F\}$  and cognitive  $S_p = \{PI, RT, DT, C\}$  state.

It is necessary, on the basis of expert evaluations and information-cognitive technology to estimate the degree of relevance of decisions made by DM  $REL = f_3(S_p, S_w, IS, CS, Risk)$  depending on the adaptation of factors of his emotional-cognitive state  $Ad EC = f_1(S_p, S_w)$  and the functional stability of CIF  $FS = f_2(IS, CS, Risk)$  in conditions of limited time in the management of the object.

According to the results of evaluation to draw a conclusion about the degree of adaptation of the emotional-cognitive state of the decision-maker for the relevance of the decision-making process. If the value of  $REL \geq R^*$  then an adaptation of the emotional-cognitive state of the DM is sufficient. In case of  $REL < R^*$  it is no sufficient and requires adjustment of factors  $Sw$  and  $Sp$  in accordance with engineering-psychological standards.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The operation of critical infrastructure facilities is associated with both information and cyber vulnerabilities and risky process conditions and requires the development of new tools to ensure the sustainability of operation based on knowledge of the state of the management objects, the state of the operating environment and the impacts that occur. An integral element of such systems is a number of decision support subsystems, the capabilities of which directly depend on the ability to provide the DM with qualitatively balanced information characterizing the actual and forecasted states of the CIF.

In scientific works of a number of authors, it is noted that the most important problem in the theory of decision-making is to overcome the factor of subjectivity, which is caused by the presence of psychological and cognitive characteristics of the DM, in the decision-making process.

Research [1] shows the dependence of human operator efficiency on the characteristics of the workplace environment and proposes a comprehensive assessment of their impact. However, cognitive models for identifying and assessing uncertain situations of the impact of uncertain environmental and production environment factors on the DSS have not been studied.

Studies [2, 3] present human errors that depend on time and other factors affecting work productivity. A roadmap methodology for the selection and consistent application of approaches to the human factor is presented. The ergonomic functional approach to modeling control processes for the tasks of adapting the technical component to the human operator is proposed, but the models and methods of functional dependence of the efficiency of complex systems on the influence of external factors and the uncertain risk of making irrelevant decisions are not investigated; Hierarchical cognitive models for determining the optimal interaction of uncertain factors of the external and production environment on the psychophysiological state of a person in decision-making.

Publications [4-6] describe the technology and cognitive aspects of human factor engineering. The optimization of human-machine interaction at the stage of designing dynamic systems focused on the problems of physical, functional and information security is indicated. A method for analyzing the reliability of a human-machine system based on the IDA model is proposed. Recommendations for the use of various methods of formalized description of operators' activities in the process of engineering and psychological support for the development of human-machine systems have been determined. However, no study has been made of fuzzy cognitive models for de-

© Perederyi V. I., Borchik E. Y., Zosimov V. V., Bulgakova O. S., 2024  
 DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-5

termining and evaluating the optimal interaction of environmental factors on the decision-making process of DM in the management of real-time CIF.

Studies [9–11] indicate the main sources of cyber and information security factors, which differ significantly from other categories of risks, such as human behavior. The process of determining the risks from erroneous decision-making by DM under the influence of threats is presented. However, models and methods for assessing the dependence of the functional stability of a critical infrastructure facility on the impact of cyber and information security factors have not been studied.

Publications [12–14] propose methods that make it possible to determine the total amount of damage caused by threat factors for a certain period of time. It is also noted that the process of determining and assessing the risk of erroneous decision-making under the influence of threat factors is the basis and basis for research in the field of analysis and improvement of existing, as well as the invention of new methods of risk assessment, improving the accuracy of its assessment. The author recommends that in the course of functioning of the CIF, the risks of irrelevant decision-making by DM arising in unpredictable conditions, as well as special requirements to the emotional and cognitive state of a person and their admission to perform particularly responsible work should be taken into account. It is also noted that the information and cognitive aspects of human factor engineering play a key role in the safety, reliability and efficiency of the management of critical control facilities.

## 3 MATERIALS AND METHODS

Based on the results of the literature analysis, it is noted that the decision-making process is most significantly influenced by the factors of the emotional and cognitive state of DM shown in the information-logical model (Fig. 1), [15–18].

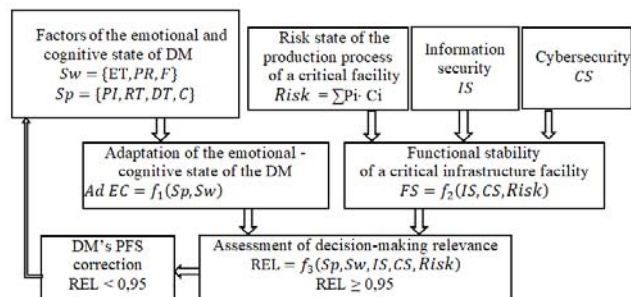


Figure 1 – Information-logical model of adaptation of the emotional-cognitive state of the decision-maker for the relevance of the decision-making process

For quantitative assessment of the degree of relevance of the decision made by the DM, it is proposed to use the BN, shown in Fig. 2. It should be noted that when building the structure of this BN and filling in the tables of conditional probabilities for the variables of the network, the requirements of engineering-psychological standards of working conditions of human operators and knowledge of experts were used.



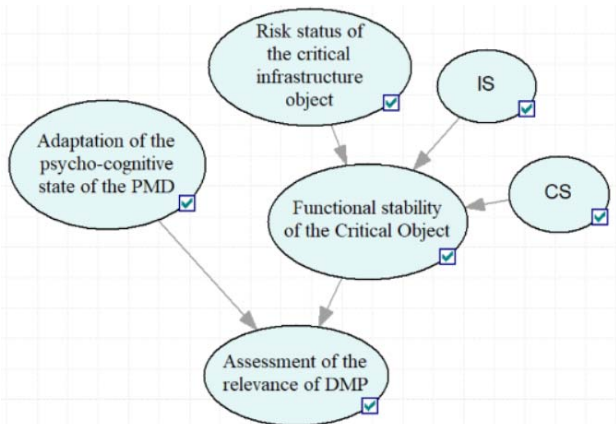


Figure 2 – A Bayesian network for estimating the probability of relevance of a decision made by a DM

All nodes of the network are binary, i.e. they have two states and are of type “Chance – General”. Thus, the Risk node characterises the Risk status of the critical infrastructure object and can take only two values: “occurs” if such a risk exists and “not occur” otherwise. The IS and CS nodes characterise information and cyber security and can also take two values. If the object is informational or cybernetically fully protected, the corresponding vertices take the value “protect”, otherwise they take the value “no protect”. The probability that these nodes take the value “no protect” is determined by the security control modules.

Since the nodes “Functional stability of the Critical Object” and “Assessment of the relevance of DMP” each have several parent nodes, the Noisy MAX type is assigned to these nodes to reduce the labour intensity of filling in the conditional probability tables. In this case, conditional probabilities are conditioned on the separate influence of factors on the expected event rather than jointly, which makes it easier for experts to estimate the conditional probability [19]. The “Functional stability of the Critical Object” node can take the values “sufficient” and “not sufficient”, and the “Assessment of the relevance of DMP” can take the values “relevant” and “irrelevant”.

To describe the nodes “Functional stability of the Critical Object” and “Assessment of the relevance of DMP”, the experts were asked to estimate the conditional probabilities of the possible states of these nodes. The results are presented in Tables 1–2.

Examine the node “Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM”. The random value of “Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM” is influenced by the following factors of the emotional-cognitive state of the DM: “physical and emotional fatigue” F, “emotional tension” ET, “productivity” PR, “perception of information” PI, “reaction time” RT, “decision-making time” DT, “concentration” C. Based on engineering and psychological standards for the working conditions of a human operator [20–22] and the results of expert assessments, Table 3 shows the levels of values of these factors in relative units.

Depending on the values of emotional-cognitive factors, the degree of adaptation of the DM to the decision-making process may be different. The question arises: what is the probability that the random variable “Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM” takes the value “negative”?

To answer this question, it is proposed to use a probability value prediction system based on fuzzy logical inference using Mamdani’s algorithm on a fuzzy knowledge base, in which the values of the input and output variables are given by fuzzy sets. Taking into account that according to [21, 22] the most noticeable influence on the cognitive state of the LPR has the factors time to make decisions DT, reaction time RT, and information perception PI, the experts propose the following uncertain knowledge base:

RULE 1: IF  $u_1$  is “not standard” AND  $u_2$  is “not standard” THEN  $v$  is “high”.

RULE 2: IF  $u_1$  is “not standard” AND  $u_2$  is “not standard” AND  $u_5$  “standard” THEN  $v$  is “high”.

RULE 3: IF  $u_3$  is “not standard” AND  $u_5$  is “standard” AND  $u_6$  “standard” AND  $u_7$  “not standard” THEN  $v$  is “high”.

RULE 4: IF  $u_4$  is “not standard” AND  $u_3$  is “not standard” AND  $u_5$  “not standard” AND  $u_7$  “standard” THEN  $v$  is “average”.

RULE 5: IF  $u_1$  is “standard” AND  $u_3$  is “standard” AND  $u_4$  “not standard” AND  $u_5$  “not standard” AND  $u_6$  “not standard” THEN  $v$  is “average”.

RULE 6: IF  $u_2$  is “standard” AND  $u_3$  is “standard” AND  $u_4$  “standard” AND  $u_5$  “not standard” AND  $u_6$  “standard” AND  $u_7$  “not standard” THEN  $v$  is “average”.

RULE 7: IF  $u_6$  is “not standard” AND  $u_4$  is “standard” AND  $u_1$  “standard” AND  $u_2$  “standard” AND  $u_3$  “standard” AND  $u_7$  “not standard” THEN  $v$  is “low”.

RULE 8: IF  $u_1$  is “standard” AND  $u_2$  is “standard” AND  $u_3$  “standard” AND  $u_4$  “standard” AND  $u_5$  “standard” AND  $u_6$  “standard” AND  $u_7$  “standard” THEN  $v$  is “low”.

The membership function  $\mu_i(x_i)$  of the term “standard” of linguistic variables  $U_i (i = 1, 7)$  will be given in the form of a two-sided Gaussian function:

$$\mu_i(x_i) = \text{gauss2mf}(x_i, [\sigma_1^i, c_1^i, \sigma_2^i, c_2^i]) = \begin{cases} e^{-(x_i - c_1^i)^2 / 2(\sigma_1^i)^2}, & \text{if } 0 \leq x_i \leq c_1^i, \\ 1, & \text{if } c_1^i < x_i < c_2^i, \\ e^{-(x_i - c_2^i)^2 / 2(\sigma_2^i)^2}, & \text{if } c_2^i \leq x_i, \end{cases} \quad (1)$$

where parameters  $\sigma_1^i, \sigma_2^i > 0$ ;  $c_1^i, c_2^i \geq 0$ ;  $c_1^i \leq c_2^i$ ;  $x_i$  are an elements of the universal set  $X = [0; 1]$ , on which the terms “standard”, “not standard” are defined.



Table 1 – Conditional probabilities of the “Functional stability of the Critical Object”

Parent	Risk		IS		CS	
State	occurs	not occurs	no protect	protect	no protect	protect
not sufficient	0.2	0	0.25	0	0.35	0
sufficient	0.8	1	0.75	1	0.65	1

Table 2 – Conditional probabilities of the “Assessment of the relevance of DMP”

Parent	Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM		Functional stability of the Critical Object	
State	no sufficient	sufficient	negative	positive
irrel	0.3	0	0.2	0
rel	0.7	1	0.8	1

Table 3 – Levels of significance of factors of emotional and cognitive state of DM

State	ET	F	PR	PI	RT	DT	C
high	0.85 – 1	0.8 – 1	0.75 – 1	0.8 – 1	0.85 – 1	0.86 – 1	0.76 – 1
average	0.4–0.84	0.36–0.79	0.46–0.74	0.46–0.79	0.55–0.84	0.55–0.85	0.41–0.75
low	0.15 – 0.39	0.2 – 0.35	0.25–0.45	0.15–0.45	0.25–0.54	0.3–0.54	0.25–0.4

Considering the values of the factors of the emotional and cognitive state of the DM (Table 3) allows us to determine some of the values of the parameters  $\sigma_i^i, \sigma_2^i, c_1^i, c_2^i (i = \overline{1,7})$ . Then the membership functions  $\mu_i(x_i)$  can be written in the form:

$$\begin{aligned}
 \mu_1(x_1) &= \text{gauss2mf}(x_1, [1, 0, \sigma_2^1, 0.3]), x_1 \in [0, 1]; \\
 \mu_2(x_2) &= \text{gauss2mf}(x_2, [1, 0, \sigma_2^2, 0.25]), x_2 \in [0, 1]; \\
 \mu_3(x_3) &= \text{gauss2mf}(x_3, [\sigma_1^3, 0.8, 1, 1]), x_3 \in [0, 1]; \\
 \mu_4(x_4) &= \text{gauss2mf}(x_4, [\sigma_1^4, 0.75, 1, 1]), x_4 \in [0, 1]; \\
 \mu_5(x_5) &= \text{gauss2mf}(x_5, [1, 0, \sigma_2^5, 0.2]), x_5 \in [0, 1]; \\
 \mu_6(x_6) &= \text{gauss2mf}(x_6, [1, 0, \sigma_2^6, 0.15]), x_6 \in [0, 1]; \\
 \mu_7(x_7) &= \text{gauss2mf}(x_7, [\sigma_1^7, 0.76, 1, 1]), x_7 \in [0, 1].
 \end{aligned} \tag{2}$$

For definition, the parameters  $\sigma_1^i, \sigma_2^i$  of the membership functions, which can, as the analysis of the data in Table 2 shows, take any values, are assigned the value 1 in the formula (2).

The statement “the  $i$ -th external factor takes the value “not the norm” is opposite to the statement the  $i$ -th external factor takes the value “standard”. Then the membership functions  $\varphi_i(x_i)$  of the term “not standard” of the linguistic variables  $u_i$  have the form:

$$\varphi_i(x_i) = 1 - \mu_i(x_i), (i = \overline{1,7}).$$

For the membership functions of the terms ‘low’, ‘average’, ‘high’ of the linguistic variable  $v$  are introduced the notations  $\theta_i(y) (i = \overline{1,3})$  correspondingly, where  $y$  are the elements of the universal set  $Y = \{0; 1\}$ , on which these terms are defined.

The function  $\theta_i(y)$  is defined as a symmetric Gaussian function:

$$\theta_i(y) = \text{gaussfm}(y, [\sigma_i, c_i]) = e^{-\frac{(y - c_i)^2}{2\sigma_i^2}}, \tag{3}$$

where parameters  $\sigma_i > 0; c_i \geq 0, (i = \overline{1,3})$ .

Below are characteristic graphs of membership functions. The graphs of the functions  $\mu_1(x_1), \varphi_1(x_1), \mu_2(x_2), \varphi_2(x_2), \mu_5(x_5), \varphi_5(x_5), \mu_6(x_6), \varphi_6(x_6)$  have the form of the graphs in Fig. 3. The graphs of functions  $\mu_3(x_3), \varphi_3(x_3), \mu_4(x_4), \varphi_4(x_4), \mu_7(x_7), \varphi_7(x_7)$  have the same form as in Fig. 4.

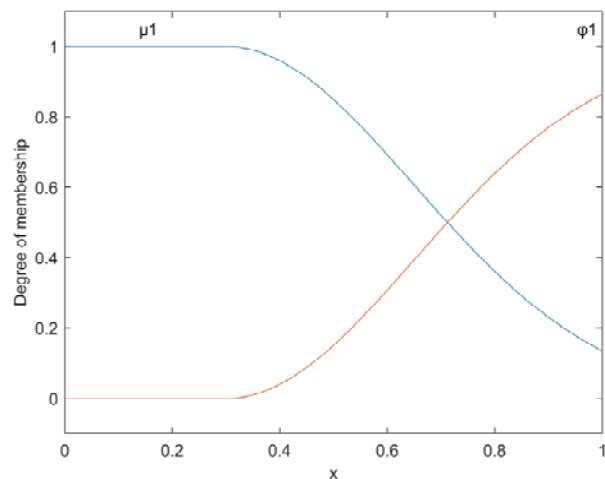


Figure 3 – Membership functions  $\mu_1(x_1)$  and  $\varphi_1(x_1)$

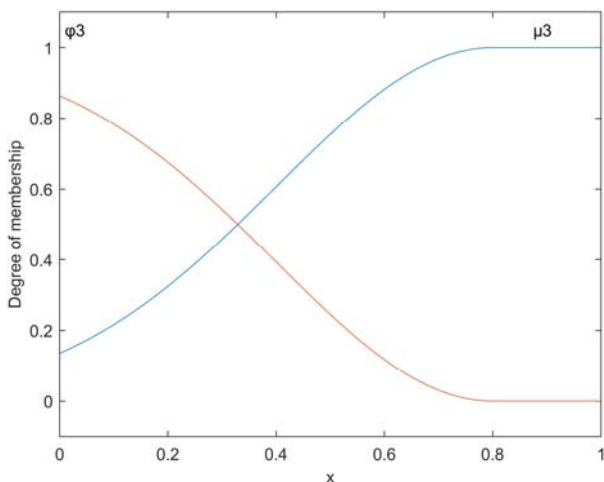


Figure 4 – Membership functions  $\mu_3(x_3)$  and  $\varphi_3(x_3)$

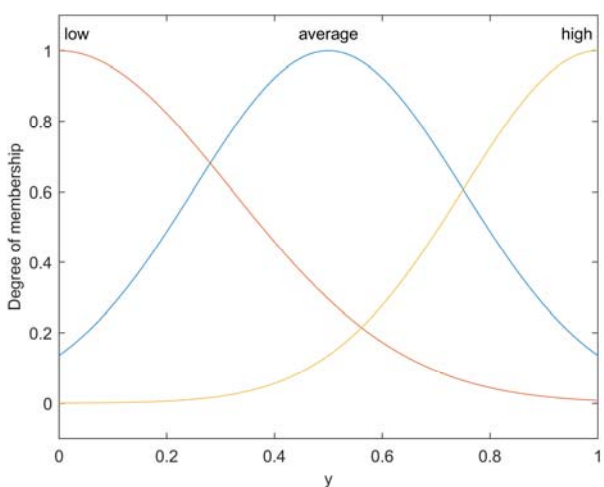


Figure 5 – Membership functions  $\theta_i(y)$  ( $i = \overline{1,3}$ )

To set up the fuzzy model  $F$ , i.e. to determine the coefficients of the model  $\sigma_2^1, \sigma_2^2, \sigma_2^5, \sigma_2^6, \sigma_1^3, \sigma_1^4, \sigma_1^7; \sigma_j, c_j, (j = \overline{1,3})$ , it is required that the value of root mean square deviation should be minimized:

$$R = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y_k - \mathbf{F}(P, E_k))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Here  $n$  is the volume of the sample of experimental data connecting the inputs  $E = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7)$  to the output  $y$  of the investigated dependence:

$$(E_k, y_k), k = \overline{1, n},$$

where  $E_k = (x_{k,1}, x_{k,2}, x_{k,3}, x_{k,4}, x_{k,5}, x_{k,6}, x_{k,7})$  is a vector of inputs and  $y_k$  is an output in  $k$ -pair. In addition,  $\mathbf{F}(P, E_k)$  is the value of the output of the fuzzy model at the value of the inputs specified by the vector  $E_k$ ;  $P = (\sigma_1^i, \sigma_2^i, \sigma_j, c_j)$  is a vector of coefficients of mem-

bership functions of terms of input and output variables of the fuzzy model.

Taking into account the knowledge of experts about the influence of the factors of the emotional and cognitive state of the DM on the degree of adaptation to the decision-making process, it is possible to find a solution to the mathematical programming problem (4) with the help of the Fuzzy Logic Toolbox and Optimization Toolbox packages and thus set up a fuzzy model.

#### 4 EXPERIMENTS

To verify the proposed method, numerical experiments were carried out, the essence of which was the following.

Assume that at some point in time the corresponding control modules fix certain values of the factors of the emotional-cognitive state of the LPR. On the basis of the above proposed fuzzy knowledge base using the Mamdani algorithm and the known values of the corresponding factors, the probabilities of the states of the top of the BN “Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM” are estimated.

According to the respective functional resilience control modules of the CIF, its information and cyber security status probabilities and risk status probabilities are determined.

The found probabilities allow us to estimate the value of the probability (relevance=rel) of relevance of the decision made by the DM according to the proposed BN (Fig. 2). Comparing the value of  $P(\text{relevance=rel})$  with the critical value of  $P_{cr}$  according to a given criterion allows us to attribute the decision taken to either relevant or irrelevant.

#### 5 RESULTS

Numerical experiments were carried out for two cases. Let at some moment of time modules, control of factors of emotional and cognitive state of DM, fixes the following their values (Table 4).

Using Mamdani’s algorithm, the probabilities of the states of the BN node “Adaptation of the psycho-cognitive state of the DM” are estimated from the data in Table 4. The values of the probabilities of a given node and the probabilities of the states of the nodes “Risk status of the critical infrastructure object”, “IS”, “CS” are indicated on the icons of the corresponding nodes (Fig. 6). The calculation performed in the GeNIe system shows that the probability of making a relevant decision by the DM turned out to be equal to  $P(\text{relevance=rel}) = 0.93$ .

In the second case, the calculation was performed with the same values of the probabilities of the nodes “Risk status of the critical infrastructure object”, “IS”, “CS” and values of the emotional and cognitive parameters as in the first case, except for the RT factor, which now takes the value 0.3. The BN calculation (Fig. 2) shows that in this case the probability of making a relevant decision by the DM turned out to be equal to  $P(\text{relevance=rel}) = 0.96$

Table 4 – The values of factors of emotional and cognitive state of DM

	<i>ET</i>	<i>F</i>	<i>PR</i>	<i>PI</i>	<i>RT</i>	<i>DT</i>	<i>C</i>
high			0.9	0.95	0.85		0.9
average							
low	0.15	0.2				0.5	

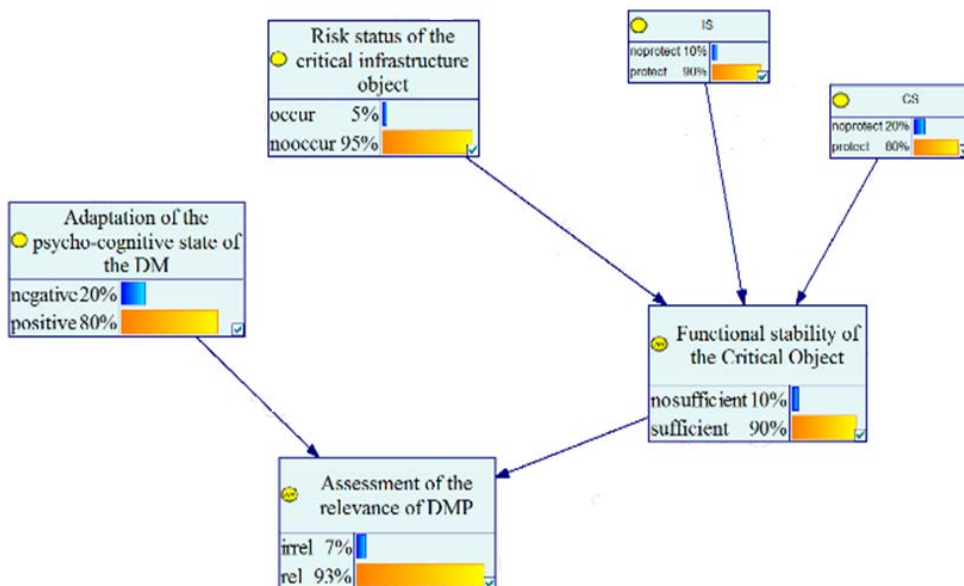


Figure 6 – Estimation of the probability of making a relevant decision by the DM at the value of the parameter  $RT = 0.85$

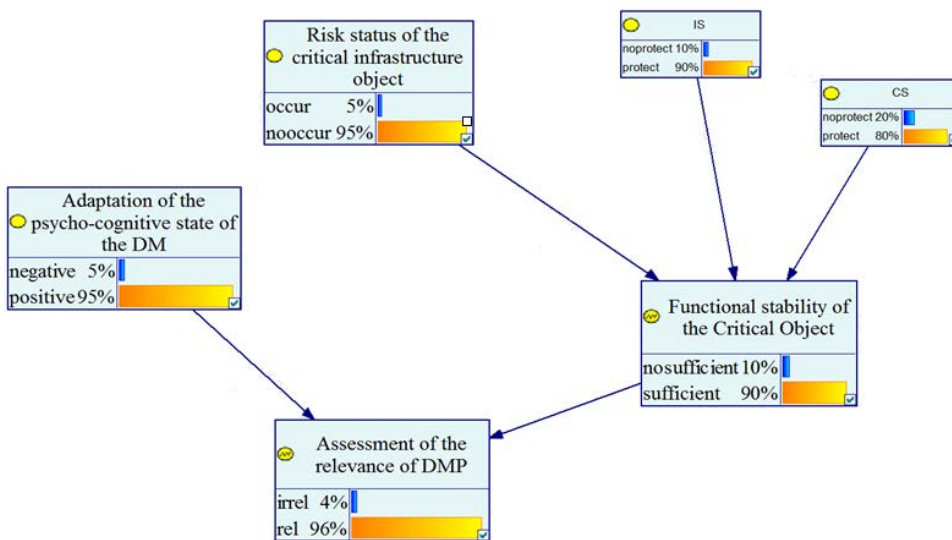


Figure 7 – Estimation of the probability of making a relevant decision by the DM at the value of parameter  $RT = 0.3$

## 6 DISCUSSION

In accordance with the results of studies of literature and regulatory sources for many CIF, when the probability value  $REL \geq 0.95$ , the decision made is considered relevant. Since in the first case the calculated probability is less than the permissible  $Pcr = 0.93$ , the decision made by the DM cannot be considered relevant. The results of the BN calculation in this case are presented in Fig. 6.

It is assumed that the probabilities of the values of the BN nodes "Risk status of the critical infrastructure object" "IS", "CS" remain unchanged during the experiment. Then, it is only possible to increase the degree of decision relevance by increasing the degree of adaptation of the

DM to the decision-making process. The analysis shows that the only emotional-cognitive factor whose value is out of the standard is the factor ( $RT = 0.85$ ), the value of which is too high for an adequate response to the situation. After the adjustment of this factor in accordance with the recommendations of engineering-psychological standards, its value can be reduced to the value of 0.3. The results of the BN calculation in this case are presented in Fig. 7. After that the probability of making a relevant decision by the DM turned out to be equal to  $P(\text{relevance}=\text{rel}) = 0.96$ , which is greater than the critical probability  $Pcr = 0.95$ . Therefore, the decision made by the DM can be considered relevant.

The obtained results of numerical experiments are quite consistent with practical situations of decision-making in critical infrastructure systems. In the first case, the overestimated value of one of the emotional and cognitive factors (RT) – the reaction time of the DM to the situation – negatively affected the process of relevant decision-making. In this case it is necessary to correct this factor according to engineering psychological recommendations and requirements. In the second case after adjustment of the factor (RT), at the same values of other factors, the probability of relevant decision-making of the DM has significantly increased. In this case, adjustment of the degree of negative impact of factors was not required.

Therefore, the results of the experiments allow us to recommend the use of the proposed method of rapid assessment and adaptation of the emotional and cognitive state of DM to the process of making relevant decisions in real time. The results can be used in the development of adaptive DSS in the management of CIF.

### CONCLUSIONS

The urgent scientific and applied problem of adaptation of the decision-making process in the process of management of the CIF, taking into account the personal emotional and cognitive capabilities of the DM under the influence of destabilising uncertain factors, has been solved.

**The scientific novelty** of obtained results is consist:

– the method of operative estimation and adaptation of emotional and cognitive state of DM to the process of making relevant decisions, in real time and uncertainty, when managing man-machine systems of critical infrastructure is proposed;

– on the basis of research and assessments of experts, a fuzzy knowledge base has been developed, which allows to determine the degree of adaptation of the DM to the decision-making process in real time.

**The practical significance** of obtained results is that the proposed method can be used for rapid assessment and adaptation of the emotional and cognitive state of the DM to the process of making relevant decisions in real time, when managing man-machine systems of critical infrastructure.

**Prospects for further research** are to develop tools and methods for adapting decision making, in real time and uncertainty, to improve the efficiency of management of critical infrastructure human-machine systems.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out with the collaborative assistance of the Department of Computer Engineering, Odesa National University of Technology, Department of Information Technologies, Mykolaiv National Agrarian University, Department of Computer Technologies and Information Security, Admiral Makarov National University of Shipbuilding.

### REFERENCES

1. Lavrov E., Pasko N., Siryk O. Information technology for assessing the operators working environment as an element of the ensuring auto-mated systems ergonomics and reliability, *TCSET-2020 Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: 15th International Conference, Lviv-Slavske: proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2020, pp. 570–575. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235497
2. Alvarenga M., Frutuoso P. A review of the cognitive basis for human reliability analysis, *Progress in Nuclear Energy*, 2019, Vol. 117(103050). DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103050
3. Lavrov E., Pasko N., Siryk O., Burov O., Morkun N. Mathematical Models for Reducing Functional Networks to Ensure the Reliability and Cybersecurity of Ergatic Control Systems, *TCSET-2020 Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: 15th International Conference, Lviv-Slavske: proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2020, pp. 179–184. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235418
4. Mygal G., Mygal V. Interdisciplinary approach to the human factor problem, *Municipal economy of cities*, 2020, Vol. 3, pp. 149–157. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157
5. Tang H., Guo J., Zhou G. Mission reliability analysis of Man-machine system, *ICRSE-2015 International Conference on Reliability Systems Engineering: 1th International Conference*, Beijing, China: proceedings, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICRSE.2015.7366423
6. Zosimov V., Bulgakova O. Calculation the Measure of Expert Opinions Consistency Based on Social Profile Using Inductive Algorithms, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1020, pp. 622–636. DOI: 10.1007/978-3-030-26474-1\_43
7. Berdnik P. G., Kuchuk G. A., Kuchuk N. G., Obidin D. N., Pavlenko M. A., Petrov A. V., Rudenko V. N., Timochko O. I. Matematicheskie osnovy jergonomicheskikh issledovanij: monografija. Kropivnickij, KLA NAU, 2016, 248 p.
8. Pengcheng Li, Li-cao Dai, Xiao-Fang Li Study on operator's SA reliability in digital NPPs. Part 1: The analysis method of operator's errors of situation awareness, *Annals of Nuclear Energy*, 2016, Vol. 102, pp. 168–178. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.12.011
9. Havlikova M., Jirgl M., Bradac Z. Human Reliability in Man-Machine Systems, *Procedia Engineering*, 2015, Vol. 100, pp. 1207–1214. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.485
10. Pasko N., Viunenko O. Modeling Human-Machine Interaction in Information Processing and Management Systems, *European Science*, 2023, Vol. sge17-02, pp. 6–52. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-17-02-027
11. Alali M., Almogren A., Mehedi H., Rassan I., Bhuiyan A. Modeling Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system, *Computers & Security*, 2018, Vol. 74, pp. 323–339. DOI: 10.1016/j.cose.2017.09.011
12. Jain P., Pasman H., Waldram S., Pistikopoulos E., Mannan M. Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, Vol. 53, pp. 61–73. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.08.006
13. Mokhor V., Bakalynskiy O., Bohdanov O., Tsurkan V. Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry, *Information technology and security*, 2017, Vol. 5, № 1, pp. 71–82. DOI: 10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574
14. Mygal G., Mygal V. Interdisciplinary approach to the human factor problem, *Municipal economy of cities*, 2020, Vol. 3, pp. 149–157. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157
15. Perederyi V., Borchik Eu., Ohnieva O. Information Technology of Control and Support for Functional Sustainability of Distributed Man-Machine Systems of Critical Application, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020, Vol. 1020, pp. 461–477. DOI: 10.1007/978-3-030-26474-1\_33



16. Perederyi V., Borchik E. Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human-operator for the relevant decision-making in human-machine critical application systems, *Theoretical and practical aspects of the development of modern science: the experience of countries of Europe and prospects for Ukraine*. Riga, Latvia, "Baltija Publishing", 2019, pp. 490–509. DOI: 10.30525/978-9934-571-78-7\_57
17. Perederyi V. I., Borchik E. Y., Zosimov V. V., Bulgakova O. S. Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on the decision-making process in human-machine systems of critical application, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2024, № 1, pp. 77–84. DOI 10.15588/1607-3274-2024-1-7
18. Perederyi V., Borchik E., Ohnieva O. Information Technology for Decision Making Support and Monitoring in Man-Machine Systems for Managing Complex Technical Objects of Critical Application, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2021, Vol. 1246, pp. 448–466. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3
19. Perederyi V., Borchik E., Lytvynenko V., Ohnieva O. Information Technology for Performance Assessment of Complex Multilevel Systems in Managing Technogenic Objects problem, *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, Vol. 2805, pp. 175–188
20. Sharko O., Marasanov V., Stepanchikov D. Technique of System Operator Determination Based on Acoustic Emission Method, *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. Advances in Intelligent System of Computing*, 2020, Vol. 1246, pp. 3–22. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3
21. Howell W. Engineering psychology [Electronic resource]. Access mode: <https://www.sciencedirect.com/topics/psychology/engineering-psychology>
22. Elliott L. Engineering psychology, *Penn State University Libraries*, 2021, 294 p. DOI: 10.26209/engin-psych

Received 09.06.2024.

Accepted 26.08.2024.

УДК 004.93

### АДАПТАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРИ УПРАВЛІННІ ОБ'ЄКТОМ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

**Передерій В. І.** – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерних технологій і інформаційної безпеки, Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

**Борчик Є. Ю.** – канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій Миколаївського національного аграрного університету, Миколаїв, Україна.

**Зосімов В. В.** – д-р техн. наук, професор кафедри комп'ютерної інженерії Одеського національного технологічного університету, Одеса, Україна.

**Булгакова О. С.** – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Одеського національного технологічного університету, Одеса, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Проблема управління людським фактором у процесі прийняття релевантних рішень в управлінні об'єктами критичної інфраструктури (ОКІ) на сьогодні є дуже важливою і складною. Це питання стає все більш значущим через динамічний і непередбачуваний характер середовища, в якому працюють ці об'єкти. Ефективне управління ОКІ вимагає розробки нових моделей і методів, що базуються на принципах адаптивного управління. Ці моделі та методи повинні враховувати особисті емоційні та когнітивні можливості особи, яка приймає рішення (ОПР), яка часто діє під впливом дестабілізуючих невизначених факторів. Проблема ускладнюється необхідністю інтеграції цих адаптивних методів у існуючі людино-машинні системи, що забезпечить їх здатність реагувати в реальному часі на швидкозмінні умови, які можуть впливати на процес прийняття рішень. Складність і важливість цієї проблеми вимагають багатогранного підходу, що поєднує ймовірнісні методи, інтелектуальні технології та інформаційно-когнітивні технології. Ці технології повинні бути здатні забезпечувати адаптацію та оцінку емоційного і когнітивного стану ОПР в реальному часі, що є критично важливим для прийняття релевантних і своєчасних рішень. Невирішені проблеми в галузі створення адаптивних інформаційних технологій для підтримки прийняття рішень в управлінні ОКІ підкреслюють потребу у перспективному підході, який може ефективно та результативно вирішувати ці питання.

**Мета роботи** – запропонувати комплексний метод оцінки процесу прийняття релевантних рішень, що залежить від функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури та адаптації факторів, пов'язаних з емоційно-когнітивним станом особи, яка приймає рішення. Цей метод має на меті надати систематичний підхід до розуміння того, як різні фактори, включаючи психофункціональний стан ОПР, впливають на процес прийняття рішень. Додатково, мета включає розробку адаптивних інформаційних та інтелектуальних технологій, які можуть підтримувати оцінку та коригування емоційного та когнітивного станів ОПР в реальному часі. Цей підхід спрямований на забезпечення ефективного та результативного прийняття рішень, навіть під впливом дестабілізуючих невизначених факторів. Враховуючи ці аспекти, метод спрямований на підвищення загальної надійності та стійкості процесів управління ОКІ. Крім того, мета охоплює інтеграцію байєсівських мереж та комплексної бази знань для забезпечення системи підтримки прийняття рішень своєчасно та точною інформацією для прийняття рішень.

**Метод.** Для реалізації даного методу використовувалися ймовірнісні методи, інтелектуальні та інформаційно-когнітивні технології, що забезпечують прийнятну адаптацію та оцінку процесу прийняття релевантних рішень у реальному часі.

**Результати.** Запропонований метод, заснований на інтелектуальних та інформаційно-когнітивних технологіях, дозволяє в реальному часі оцінювати та адаптувати емоційний і когнітивний стан особи, яка приймає рішення, під час процесу прийняття релевантних рішень. Впровадження ймовірнісних методів та байєсівських мереж дозволило розробити надійну систему підтримки прийняття рішень, яка ефективно інтегрує принципи адаптивного управління. Ця система забезпечує стабільність і надійність процесу прийняття рішень навіть за наявності дестабілізуючих невизначених факторів. Можливості системи в реальному часі дозволяють оперативне коригувати психофункціональний стан ОПР, що є критично важливим для підтримки функціональної стабільності об'єктів критичної інфраструктури. Результати показують, що використання інтелектуальних технологій та комплексної бази знань значно підвищує здатність ОПР приймати обґрунтовані рішення. Експерименти показали, що цей метод покращує загальну ефективність та результативність управління ОКІ, пропонуючи перспективний підхід для майбутнього застосування в адаптивних процесах підтримки прийняття рішень. Отримані результати експериментів підтверджують потенціал запропонованого методу революціонізувати управління ОКІ, забезпечуючи своєчасне і відповідне прийняття рішень, що сприяє стійкості та надійності цих важливих об'єктів.

**Висновки.** Результати експериментів дозволяють рекомендувати використання запропонованого методу швидкої оцінки та адаптації емоційного та когнітивного стану особи, яка приймає рішення, для процесу прийняття релевантних рішень в реальному

часі. Інтеграція інтелектуальних та інформаційно-когнітивних технологій у систему підтримки прийняття рішень виявилася ефективною для підвищення стабільності та надійності процесу прийняття рішень в управлінні об'єктами критичної інфраструктури. Можливості системи в реальному часі сприяють оперативному коригуванню психофункціонального стану ОПР, забезпечуючи ефективне та результативне прийняття рішень навіть під впливом дестабілізуючих невизначених факторів. Експериментальні результати демонструють, що запропонований метод значно покращує загальну ефективність управління ОКІ, забезпечуючи надійну основу для адаптивної підтримки прийняття рішень. Отримані результати можуть бути використані при розробці адаптивних СППР в управлінні ОКІ, пропонуючи перспективний підхід для майбутніх застосувань. Цей метод не тільки підвищує здатність ОПР приймати рішення, але й сприяє стійкості та надійності ОКІ, забезпечуючи їх функціональну стабільність в динамічних та невизначених умовах.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** людино-машинні системи, прийняття рішення, адаптація, особа, яка приймає рішення, інформаційно-когнітивні технології, інтелектуальні технології, Байєсовські мережі довіри, інформаційна безпека, кібернетична безпека.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Lavrov E. Information technology for assessing the operators working environment as an element of the ensuring auto-mated systems ergonomics and reliability / E. Lavrov, N. Pasko, O. Siryk // TCSET-2020 Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: 15th International Conference, Lviv-Slavske: proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2020. – P. 570–575. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235497
2. Alvarenga M. A review of the cognitive basis for human reliability analysis / M. Alvarenga, P. Frutuoso // Progress in Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 117(103050). DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103050
3. Mathematical Models for Reducing Functional Networks to Ensure the Reliability and Cybersecurity of Ergatic Control Systems / [E. Lavrov, N. Pasko, O. Siryk et al.] // TCSET-2020 Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering: 15th International Conference, Lviv-Slavske: proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2020. – P. 179–184. DOI: 10.1109/TCSET49122.2020.235418
4. Mygal G. Interdisciplinary approach to the human factor problem / G. Mygal, V. Mygal // Municipal economy of cities. – 2020. – Vol. 3. – P. 149–157. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157
5. Tang H. Mission reliability analysis of Man-machine system / H. Tang, J. Guo, G. Zhou // ICRSE-2015 International Conference on Reliability Systems Engineering: 1th International Conference, Beijing, China : proceedings, 2015. – P. 1–5. DOI: 10.1109/ICRSE.2015.7366423
6. Zosimov V. Calculation the Measure of Expert Opinions Consistency Based on Social Profile Using Inductive Algorithms / V. Zosimov, O. Bulgakova // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1020. – P. 622–636. DOI: 10.1007/978-3-030-26474-1\_43
7. Matematicheskie osnovy jergonomicheskikh issledovanij: monografija / [P. G. Berdnik, G. A. Kuchuk, N. G. Kuchuk et al.]. – Kropivnickij : KLA NAU, 2016. – 248 p.
8. Pengcheng Li. Study on operator's SA reliability in digital NPPs. Part 1: The analysis method of operator's errors of situation awareness / Li Pengcheng, Dai Li-cao, Li Xiao-Fang // Annals of Nuclear Energy. – 2016. – Vol. 102. – P. 168–178. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.12.011
9. Havlikova M. Human Reliability in Man-Machine Systems / M. Havlikova, M. Jirgl, Z. Bradac // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 100. – P. 1207–1214. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.485
10. Pasko N. Modeling Human-Machine Interaction in Information Processing and Management Systems / N. Pasko, O. Viunenko // European Science. – 2023. – Vol. sge17-02. – P. 6–52. DOI: 10.30890/2709-2313.2023-17-02-027
11. Modeling Improving risk assessment model of cyber security using fuzzy logic inference system / [M. Alali, A. Almogren, H. Mehedi et al.] // Computers & Security. – 2018. – Vol. 74. – P. 323–339. DOI: 10.1016/j.cose.2017.09.011
12. Process Resilience Analysis Framework (PRAF): A systems approach for improved risk and safety management / [P. Jain, H. Pasman, S. Waldram et al.] // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. – 2018. – Vol. 53. – P. 61–73. DOI: 10.1016/j.jlp.2017.08.006
13. Interpretation of the simple risk level dependence of its implementation in the terms of analytic geometry / [V. Mokhor, O. Bakalynskiy, O. Bohdanov, V. Tsurkan] // Information technology and security. – 2017. – Vol. 5, № 1. – P. 71–82. DOI: 10.20535/2411-1031.2017.5.1.120574
14. Mygal G. Interdisciplinary approach to the human factor problem / G. Mygal, V. Mygal // Municipal economy of cities. – 2020. – Vol. 3. – P. 149–157. DOI: 10.33042/2522-1809-2020-3-156-149-157
15. Perederyi V. Information Technology of Control and Support for Functional Sustainability of Distributed Man-Machine Systems of Critical Application / V. Perederyi, Eu. Borchik, O. Ohnieva // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2020. – Vol. 1020. – P. 461–477. DOI: 10.1007/978-3-030-26474-1\_33
16. Perederyi V. Information technology for determination, assessment and correction of functional sustainability of the human-operator for the relevant decision-making in human-machine critical application systems / V. Perederyi, E. Borchik // Theoretical and practical aspects of the development of modern science: the experience of countries of Europe and prospects for Ukraine. – Riga, Latvia: "Baltija Publishing". – 2019. – P. 490–509. DOI: 10.30525/978-9934-571-78-7\_57
17. Evaluation of the influence of environmental factors and cognitive parameters on the decision-making process in human-machine systems of critical application / [V. I. Perederyi, E. Y. Borchik, V. V. Zosimov, O. S. Bulgakova] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2024. – № 1 – P. 77–84. DOI 10.15588/1607-3274-2024-1-7
18. Perederyi V. Information Technology for Decision Making Support and Monitoring in Man-Machine Systems for Managing Complex Technical Objects of Critical Application / V. Perederyi, Eu. Borchik, O. Ohnieva // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2021. – Vol. 1246. – P. 448–466. DOI: 10.1007/978-3/
19. Information Technology for Performance Assessment of Complex Multilevel Systems in Managing Technogenic Objects problem / [V. Perederyi, Eu. Borchik, V. Lytvynenko, O. Ohnieva] // CEUR Workshop Proceedings. – 2020. – Vol. 2805. – P. 175–188
20. Sharko O. Technique of System Operator Determination Based on Acoustic Emission Method / O. Sharko, V. Marasanov, D. Stepanchikov // Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. Advances in Intelligent System of Computing. – 2020. – Vol. 1246. – P. 3–22. DOI: 10.1007/978-3-030-54215-3
21. Howell W. Engineering psychology [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.sciencedirect.com/topics/psychology/engineering-psychology>
22. Elliott L. Engineering psychology / L. Jo. Elliott // Penn State University Libraries. – 2021. – 294 p. DOI: 10.26209/enginepsych

# НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 004.9

### OPTIMIZING AUTHENTICATION SECURITY IN INTELLIGENT SYSTEMS THROUGH VISUAL BIOMETRICS FOR ENHANCED EFFICIENCY

**Batiuk T.** – Postgraduate student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

**Dosyn D.** – Dr. Sc., Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** The primary objective of this article is to explore aspects related to ensuring security and enhancing the efficiency of authentication processes in intelligent systems through the application of visual biometrics. The focus is on advancing and refining authentication systems by employing sophisticated biometric identification methods.

**Objective.** A specialized intelligent system has been developed, utilizing a Siamese neural network to establish secure user authentication within the existing system. Beyond incorporating fundamental security measures such as hashing and secure storage of user credentials, the contemporary significance of implementing two-factor authentication is underscored. This approach significantly fortifies user data protection, thwarting most contemporary hacking methods and safeguarding against data breaches. The study acknowledges certain limitations in its approach, possibly affecting the generalizability of the findings. These limitations provide avenues for future research and exploration, contributing to the ongoing evolution of authentication methodologies in intelligent systems.

**Method.** The two-factor authentication system integrates facial recognition technology, employing visual biometrics for heightened security compared to alternative two-factor authentication methods. Various implementations of the Siamese neural network, utilizing Contrastive loss function and Triplet loss function, were evaluated. Subsequently, a neural network employing the Triplet loss function was implemented and trained.

**Results.** The article emphasizes the practical implications of the developed intelligent system, showcasing its effectiveness in minimizing the risk of unauthorized access to user accounts. The integration of contemporary authentication methodologies ensures a secure and robust user authentication process.

**Conclusions.** The implementation of facial recognition technology in authentication processes has broader social implications. It contributes to a more secure digital environment by preventing unauthorized access, ultimately safeguarding user privacy and data. The study's originality lies in its innovative approach to authentication, utilizing visual biometrics within a Siamese neural network framework. The developed intelligent system represents a valuable contribution to the field, offering an effective and contemporary solution to user authentication challenges.

**KEYWORDS:** 2FA authentication, Siamese network model, Triplet Loss algorithm, facial recognition systems.

#### ABBREVIATIONS

SNN is a Siamese neural network;  
TLA is a triplet Loss algorithm;  
2FA is a two factor authentication;  
CLA is a contrastive loss algorithm;  
BI is a biometric identification;  
DCM is a discrepancy classification matrix;  
AIM is an anchor image scheme;  
DF is a data frame;  
FRT is a facial recognition technology.

#### NOMENCLATURE

$D_w$  is an Euclidean distance;  
 $I$  is a set of identifiers;  
 $Y$  is a boolean image value;

$M$  is a function looking for higher image identifier value from inputs;

$m$  is a spare value that is less than 1;

$p$  is a spare value that is higher than 0;

$G_w$  are the coordinates of one point;

$X$  is an image initial value;

$N$  is a negative sample;

$P$  is a positive sample;

$A$  is an anchor sample;

$f^a$  is an anchor function;

$f^p$  is a positive function;

$f^n$  is a negative function;

$\oplus$  is a difference class operator;

$F_\gamma$  is an approach that describes vector representation;

$F\mu$  is an approach that describes the pure entities interaction;

$\alpha$  is a parameter that determines the minimum distance among the positive and negative values;

$C_l$  is a convolution layer;

$P_l$  is a pooling layer;

$D_l$  is a dropout layer;

$F_l$  is a fully loaded layer;

$H_\lambda$  is a hidden embedding;

$C_\alpha$  are convolution parameters;

$P_\beta$  are pooling parameters;

$D_k$  are dropout parameters;

$\chi_1$  are user login and password;

$\chi_2$  are generated cookies;

$\chi_3$  are authentication data logs;

$\chi_4$  is a user token;

$\chi_5$  are the storage requirements;

$\lambda_1$  is a user identification operator;

$\lambda_2$  is a first factor authentication operator;

$\lambda_3$  is a second factor authentication operator;

$\lambda_4$  is an authentication verification operator;

$\lambda_5$  is an access permission operator;

$\varphi_1$  are rules and configurations governing the authentication process;

$\varphi_2$  are previously saved or registered credentials associated with the user account.

## INTRODUCTION

In the context of the rapid evolution and integration of intelligent systems, the security and efficiency of authentication processes emerge as pivotal challenges. This article is dedicated to addressing these challenges by advancing authentication systems through the incorporation of sophisticated visual biometrics and contemporary machine learning methodologies. The primary objective is to develop an intelligent system utilizing a Siamese neural network to guarantee robust user authentication. Beyond the implementation of fundamental security measures like hashing and password storage, the adoption of two-factor authentication employing facial recognition technology is essential. This approach substantially elevates security levels, rendering many modern hacking techniques infeasible.

The primary aim of this research is to enhance authentication systems within intelligent frameworks by leveraging visual biometrics. The implementation of advanced authentication techniques is explored, specifically the adoption of a two-factor system employing facial recognition technology integrated with a Siamese neural network. The overarching goal is to establish a trustworthy, secure, and efficient intelligent system, mitigating the risk of unauthorized access and ensuring a high degree of user account protection. To systematically approach this objective, the main tasks are delineated. The foremost task involves creating and training a model for facial recognition using Siamese neural network technology. The rationale behind choosing a Siamese neural network is justified based on its efficacy

in comparing two objects and generating vector representations, particularly crucial for biometric identification.

Architecturally, the Siamese neural network comprises two branches that learn collaboratively, processing two input images and producing vector representations of the system user's face. The utilization of the Triplet Loss function in training ensures that vector representations for the same user are proximate, while those for different users are distant.

The role of training and optimization is crucial when utilizing a dataset comprising pairs of face images for both training and testing phases. This process must be fine-tuned to adapt the model weights during training. Following the acquisition of a trained model, a distinct dataset is essential to validate the model's efficacy, ascertain the accuracy of face recognition, and evaluate the quality of the generated vector representations.

In the successful implementation of two-factor authentication, particularly emphasizing the technology of searching, recognizing, and comparing users' faces, several pivotal steps and details demand consideration. Defining specific security and speed requirements for the system is paramount. The choice of face recognition technology for the second stage of two-factor authentication needs careful consideration. With an understanding of the chosen technology, developing a mechanism for searching, recognizing, and comparing faces and seamlessly integrating it with the Siamese neural network is imperative. The implementation of two-factor authentication, where the first factor is the login and password, and the second is facial recognition, constitutes a crucial part of the process. Once a functional model of two-factor authentication is established, optimizing existing biometric identification methods becomes necessary. This involves exploring the latest advancements in biometric identification and selecting optimal means of authentication to enhance accuracy and speed.

The final significant step involves integrating the neural network into the intelligent system. This encompasses creating an interface for seamless interaction between the neural network and the intelligent system, ensuring the automated operation of the system utilizing facial recognition for authentication and storing user data in the database. Consideration must be given to storing not only general user information but also a photo of the user's face and its factors, facilitating a subsequent comparison with the user's webcam image during logins. Once a fully functional system is in place, thorough evaluation and testing across diverse datasets and conditions become crucial. This process enables data collection on system performance, allowing for an assessment of accuracy and security, including potential vulnerabilities to attacks and challenges. Each stage is meticulously designed to culminate in the development of an effective and secure authentication system based on facial recognition and advanced biometric identification methods.



The scientific paper outlines an innovative approach in the development of an intelligent system, amalgamating advancements in biometric identification and machine learning. A notable innovation lies in the utilization of a Siamese neural network for facial recognition, a method designed to account for each user's unique features, thereby ensuring heightened identification accuracy. The implementation and training of this neural network using the Triplet Loss Function represent a groundbreaking step in enhancing biometric methods. Furthermore, the incorporation of face search, recognition, and comparison technology into the framework of two-factor authentication introduces an additional layer of innovation, elevating the security level by making visual biometrics a more dependable and secure authentication method.

The scientific endeavor also dedicates attention to optimizing biometric identification methods through the application of advanced algorithms and techniques, thereby contributing to the increased accuracy and efficiency of face recognition. The integration of various stages, including neural network development, two-factor authentication implementation, and biometric identification optimization, into a unified intelligent system exemplifies an innovative strategy in addressing security and authentication challenges within intelligent systems. This comprehensive scientific approach aims to create an effective and reliable system capable of minimizing the risk of unauthorized access and ensuring a high level of user security.

## 1 PROBLEM STATEMENT

The intelligent system of optimizing authentication security through visual biometrics is represented by a tuple simulation model:

$$N = \langle Dw, I, Y, M, Gw, X, F\gamma, F\mu \rangle,$$

where  $Y = \{y_1, y_2, y_3, y_4\}$ ,  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ ,  $\Lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4\}$ ,  $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4\}$ .

A SNN type of neural network architecture consisting of two identical subnetworks with shared parameters. It is designed for tasks involving the comparison of input patterns to determine their similarity or dissimilarity:

$$\begin{aligned} C_l &= f^a \circ f^p \circ f^a, \\ P_l &= m(p(\omega(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3), \chi_1, \chi_2), \lambda_1), \\ D_l &= F_l \circ H_\lambda \circ m, \end{aligned}$$

A TLA loss function train models for comparing objects in vector space:  $C_a = \omega \circ p \circ m$ , so

$$P_\beta = f^a (f^p (f^a (C_a, \chi_3, \chi_4, \chi_5), \lambda_4, \lambda_5), \varphi_2).$$

A security 2FA process that requires two forms of identification before granting access to an application:

$$\begin{aligned} D_k &= \alpha \circ \omega \circ p \circ H_\lambda, \\ M &= \lambda_1(\varphi_2(\lambda_2(\varphi_4(y_1, x_1), y_2), x_2), \varphi_1)). \end{aligned}$$

The DCM matrix is evaluating classified instances of the performance of classification models:

$$\begin{aligned} F\gamma &= C_l \circ P_l \circ D_l \circ F_l, \\ F\mu &= y_3(\lambda_3(y_4(\lambda_4(C_a, P_\beta), D_k), x_3), \varphi_4). \end{aligned}$$

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The publication [1] has significantly contributed to the field of cybersecurity and automated vulnerability detection. The authors advocate for the application of graph neural networks to automatically assign Common Weakness Enumeration identifiers to vulnerabilities. A notable strength of the article lies in the utilization of graph neural networks, enabling the model to effectively scrutinize the relationships among various vulnerabilities and their characteristics. Employing graph structures holds the potential to enhance the precision of vulnerability identification and classification. The authors showcase a well-articulated overview of existing methods for vulnerability detection and CWE identifier assignment, reflecting their profound understanding of the domain. While the proposition to employ graph neural networks in this context is original and promising, a more comprehensive discussion on the limitations and potential risks associated with this approach would be beneficial. Additional insights into specific parameters of graph neural networks, as well as details on training and validation methods, would enhance the reader's comprehension of model stability and robustness. The paper introduces an innovative perspective on vulnerability detection and automated CWE identifier assignment.

On a separate note, work [2] introduces a novel approach to developing an intelligent system for socialization, considering personal interests and leveraging SEO technologies and machine learning methods. The article's positive aspects include the incorporation of SEO technologies within a social platform for user interaction and the application of machine learning methods for analyzing and recommending personal interests, showcasing the authors' high level of technical competence. The structured and logically presented information enables readers to easily grasp the concepts discussed. However, to enrich the understanding of the technical implementation of the intelligent system, more specific details are warranted. These could encompass insights into the chosen machine learning algorithms, the rationale behind selecting SEO technologies, and their significance in this particular context.

In the publication [3], the authors delve into the application of Siamese Trackers based on deep features for visual tracking tasks. The article underscores crucial aspects of utilizing deep features and Siamese models to enhance the precision and efficiency of object tracking

within a video stream. The strengths of the article include a lucid problem formulation and the apt choice of Siamese Trackers for addressing visual tracking challenges. Notably, the rationale behind employing deep features, enabling high tracking accuracy in diverse conditions, deserves special attention. The authors provide a comprehensive review of various facets of Siamese Tracker implementation, encompassing deep network architectures, loss functions, and model updating methods. This renders the article valuable for both researchers and practitioners seeking advancements in visual object tracking technologies. Additionally, it's worth mentioning that the paper could further elevate its value through subsequent research that compares Siamese Trackers [4] with contemporary visual tracking methods, evaluating their effectiveness under different conditions. This work constitutes a significant contribution to the field of visual tracking, leveraging Siamese Trackers and deep features to enhance real-world object tracking outcomes.

In the context of the publication [5], the authors explore a crucial aspect of employing Siamese neural networks in regression and uncertainty quantification tasks. They introduce a novel approach to enhance Siamese neural network performance through similarity-based pairing. A key strength of this work lies in the successful integration of the similarity concept to bolster the accuracy and reliability of Siamese neural networks in regression tasks. The authors conduct a thorough analysis of the impact of various pairing methods on results, showcasing that similarity-based pairing contributes to enhanced neural network performance. An additional merit of the article is the exploration of Siamese neural networks for uncertainty quantification, a current research frontier. The presentation of compelling results and the indication of using similarity to enhance uncertainty estimation reliability in regression problems make this article a valuable addition to the methodology of employing Siamese neural networks in regression and uncertainty quantification. Similarity-based pairing emerges as an effective approach for enhancing their performance.

In their publication [6], the authors introduce an innovative method for detecting clones in Java code using a Siamese neural network based on bytecode. The article meticulously explores the challenge of identifying clones in software, a critical task in software development and maintenance. Notably, the use of bytecode to represent Java code and the application of a Siamese neural network for discerning similarities between code segments are key strengths. This approach allows consideration of both structural and semantic aspects of clones, potentially enhancing detection accuracy. An additional advantage lies in the implementation of a Siamese neural network method for bytecode comparison, facilitating the identification of more complex clone forms, including altered clones that traditional methods might struggle to detect. The work also provides a comprehensive overview of current clone detection

methods, comparing their advantages and disadvantages, making it valuable for readers familiar with the field. The clear and logical structure of the article aids in understanding the methodology and results. Well-defined experimental stages and obtained results substantiate the efficacy of the proposed method. This article [7] introduces an intriguing and promising approach to clone detection in Java code using Siamese neural networks based on bytecode, potentially contributing significantly to the field of software analysis.

In the case of the publication [8], the article addresses the challenge of object visual tracking and proposes an effective and resource-efficient method using the differentiated search of neuroarchitecture approach. The focus is on achieving high tracking efficiency with limited computing resources. A notable strength is the utilization of the DNAS method to autonomously identify the optimal neuroarchitecture for visual tracking tasks. This automated model selection process is crucial for achieving efficiency within resource constraints. The article [9] elaborates on the differentiated neuroarchitecture search and model lightness approaches in detail to ensure high real-time performance. The authors introduce effective mechanisms for reducing model volume and computational complexity, making it adaptable to variable conditions. The results achieved demonstrate a commendable level of efficiency and speed for the proposed method compared to other visual tracking approaches. Experimental findings further affirm the competitiveness of the developed model.

### 3 MATERIALS AND METHODS

During the course of this project, it is essential to delineate two primary objectives. Firstly, it involves the creation, training, and testing of a Siamese neural network tasked with two main functions: detecting a face in a user's photo and comparing two photos to ascertain the user's authenticity during login attempts. Secondly, the focus shifts to implementing the developed neural network within the intelligent system [10] and configuring its seamless operation as a two-factor authentication module for users.

The Siamese neural network belongs to a distinctive class of deep neural networks crafted specifically for tackling comparison tasks. Its nomenclature draws parallels with "Siamese twins", reflecting a shared origin but individual characteristics. The fundamental concept behind a Siamese neural network is to learn the similarity or dissimilarity between two input patterns. The architecture comprises two or more identical subnets that share parameters. Each subnet processes a distinct input sample, extracting its crucial features. The resulting representations are then compared to discern similarities or differences between the input data. A primary application of Siamese neural networks [11] lies in visual comparison tasks, encompassing activities like face recognition, object detection, and addressing tracking challenges. The architecture facilitates the study of neural representations to gauge the similarity degree between

two input samples, rendering it effective for comparison and classification tasks. For our implementation, we employ an input layer followed by a 2D convolutional layer and a 2D pooling layer [12]. The data undergoes smoothing, and a compression layer is introduced. Ensuring the optimal functioning of this layer involves normalizing its values. The object size is set at 128 units. Combining these two models involves utilizing the scalar product of objects. Given that the features are already normalized, their values fall within the 0 to 1 range, facilitating straightforward comparisons with the target labels.

The contrast loss function [13] exhibits certain drawbacks that necessitate consideration. Notably, it is sensitive to hyper-parameters, implying that its effectiveness hinges on factors such as the distance between positive and negative samples, demanding meticulous tuning. Achieving a balance between positive and negative pairs is essential for the effective training of the contrast loss function, a task that can prove challenging with real data. The computational burden escalates significantly when dealing with a large number of pairs, especially in scenarios involving extensive data volumes and intricate models. Furthermore, the quality of vector representations provided by the model markedly influences the outcomes of the contrast loss function; inadequate learning of useful features by the model can result in suboptimal results.

In the context of a large number of classes, the selection of effective pairs for comparison becomes challenging, potentially impeding the effectiveness of the learning process. Therefore, for optimal performance, it is advisable to consider a more contemporary function, such as the triplet loss function (Triplet loss function [14]). This type of loss function is frequently employed in Siamese neural networks to train models for comparing objects in vector space. The fundamental concept behind the triplet loss is to ensure that vector representations of similar objects are in close proximity, while vector representations of dissimilar objects are distinctly separated in space.

The triplet loss function takes into account three samples: a positive and a negative sample for a specific object, along with a negative sample for another object (trivially negative). The objective is to minimize the distance between the vector representations of the positive and anchor (trivially negative) patterns, simultaneously increasing the distance between the vector representations of the anchor and the complex negative pattern. Figure 1 provides a conceptual illustration of the triplet loss function, featuring a pivotal input [15] (anchor), as well as positive and negative objects at the input.

Figure 1 illustrates a diagram outlining the process of initializing two-factor authentication for users in the intelligent system. This involves capturing an image, conducting a facial recognition search, and subsequently storing the media key in the database.

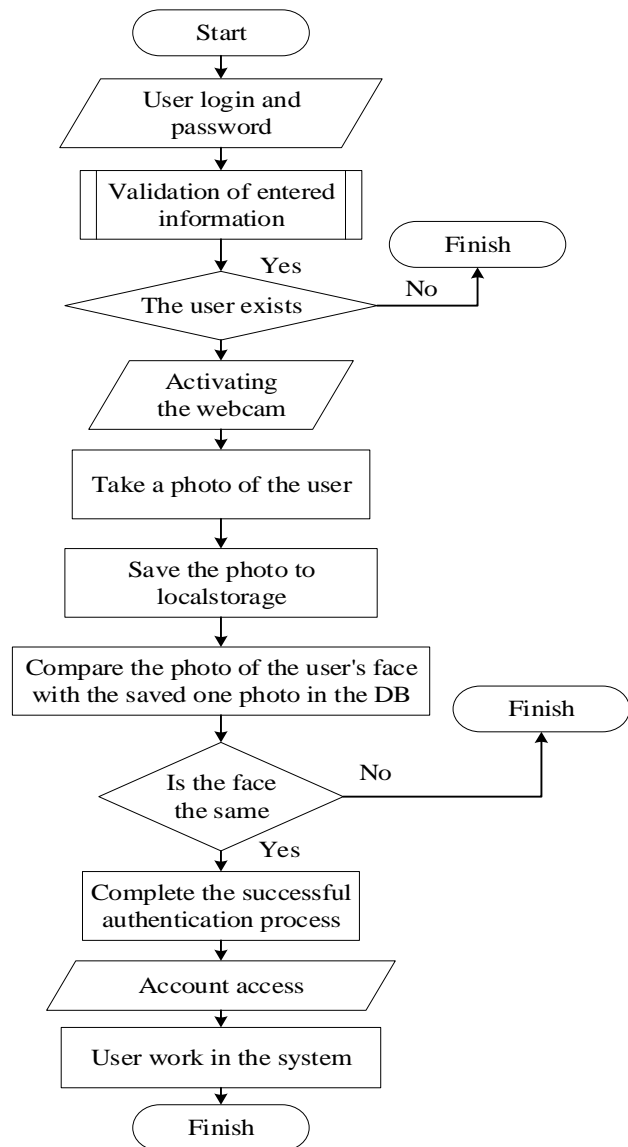


Figure 1 – Process of initializing two-factor authentication

Figure 2 depicts a diagram detailing the user authentication process. This process involves validating the entered login and password, saving the user's photo, captured using a web camera, in local storage, and comparing the current photo with the one already stored in the database [16] containing the user's facial information. In the event of a successful match, the user gains access to the available functionality within the intelligent system.

The Siamese neural network with a triplet loss function offers several advantages, particularly its efficacy in handling limited data by utilizing three images for training instead of pairs. This model [17] can effectively generalize features crucial for distinguishing various classes or instances in input data. The triplet loss function addresses the challenge of managing similarity and dissimilarity in the feature vector space by minimizing the distance between positive pairs and maximizing the distance between negative pairs. Its

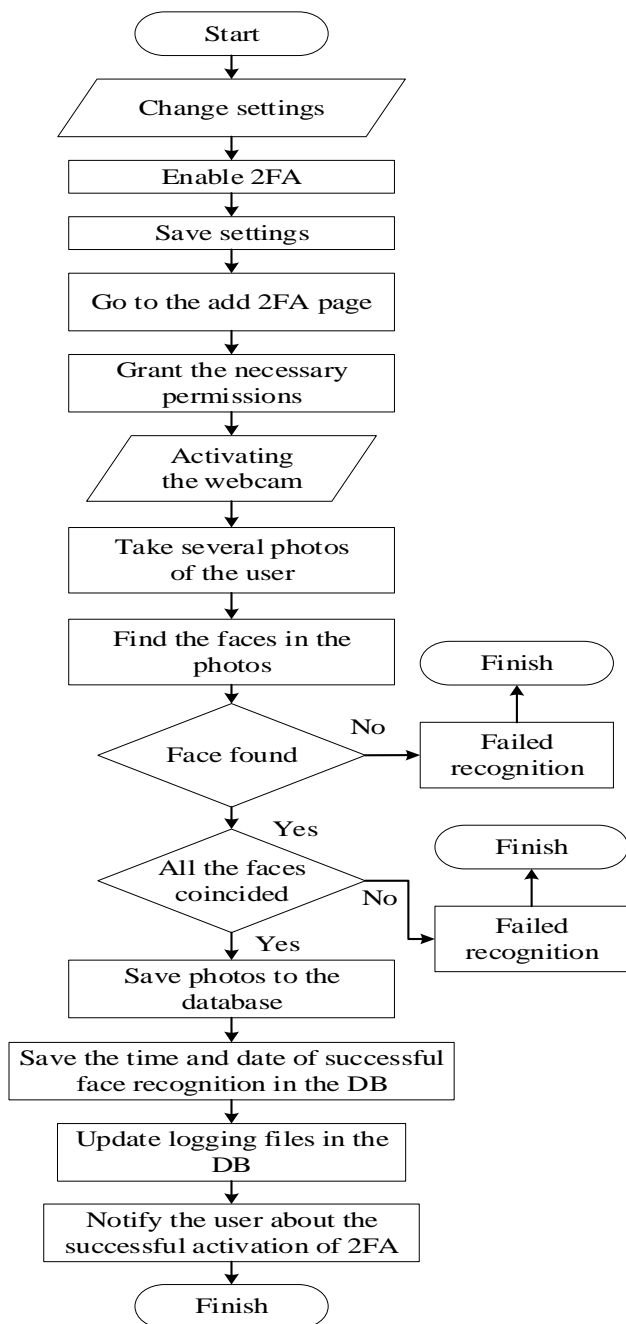


Figure 2 – The user authentication process

versatility makes the model suitable for various tasks, including face recognition, object extraction, or pattern recognition, aligning well with our requirement for a unified format [18] for processing user photos and extracting facial features.

However, there are certain drawbacks to the Siamese neural network with a triplet loss function. The model's sensitivity to hyper-parameter choices, such as triplet size and parameters of the triplet loss function, may necessitate additional tuning. While this is not critical within the scope of the intelligent system being developed, as it will process standardized photos, it should be initially configured. Dealing with a large amount of data [19] may pose challenges in selecting

effective triplets for learning, potentially leading to increased computational complexity. However, this is not a significant concern for the current system, as it processes only two photos at a time for each user—the current photo captured using a web camera and a photo saved in the database. In the case of improper triplet selection for training, the model may not be efficiently trained, and, conversely, like many other models, Siamese neural networks may be susceptible to overfitting [20], especially with limited data. This consideration is crucial when implementing the Siamese neural network and selecting datasets for model training.

#### 4 EXPERIMENTS

Throughout the project, a pivotal task involves the creation of a Siamese neural network, which, following testing, will be integrated into an intelligent system. The implementation will be carried out using the Python 3.10 programming language, and the PyCharm IDE has been selected for code development. The initial step encompasses downloading a dataset comprising photos and corresponding user labels essential for training and testing the neural network. The dataset encompasses a total of 5000 images featuring 50 unique elements [21], signifying 50 users with facial images captured from various angles and expressing different emotions. Each image measures 128 by 128 pixels and features a black background behind the user faces. Moreover, all images are presented in grayscale. The pixel values have been scaled to fit within the interval from 0 to 1, and each user in the dataset has been assigned a corresponding ID ranging from 0 to 49.

Following that, the data undergoes reformatting, wherein each image in the dataset is transformed into a one-dimensional array of size  $4096 * (128 * 128)$ . The training and test datasets are constructed by partitioning images [22] from the initial dataset. Additionally, a DataFrame is established, encompassing subject IDs for the training dataset. A DataFrame, a primary data structure in the pandas library for data processing and analysis, structures data in a two-dimensional array akin to a table, facilitating the organization of data into rows and columns. Each row in the DataFrame corresponds to a single sample in the training dataset, playing a crucial role in the subsequent exploration and analysis of dependencies between subject identifiers and properties and indicators in the neural network.

The subsequent step involves the generation of triplets for application in a Siamese neural network. A function is crafted, taking three arguments: the path to the image directory, a dictionary where keys represent folders (classes) and values signify the number of files in each folder, and the maximum number of files to consider for each folder. An empty list is initialized to store the triplets, and a list of all created folders [23] is formed based on the dictionary keys. Tuples for the anchor and positive image within the current folder at specified indices are implemented, and a variable for the negative image folder is assigned, initially equal to the current



folder. Tuples for positive and negative images are selected, and all triplets are appended to the collective list. Ultimately, the program function returns a list comprising all created triplets.

Figure 3 depicts a diagram illustrating the projection of people's faces onto a plane using the principal component analysis method. Each point on the diagram corresponds to an individual's face, with the two axes representing the first two principal components determining the primary directions of variation among the face images. The X-axis corresponds to the first principal component, and the Y-axis to the second principal component. Each point represents the face of a specific individual, and the placement of dots signifies facial variations within the sample. Proximity between points [24] indicates facial similarity, while distance signifies facial diversity. Different colors denote distinct individuals, distinguished by identifiers, providing a visually clear demarcation between different persons.

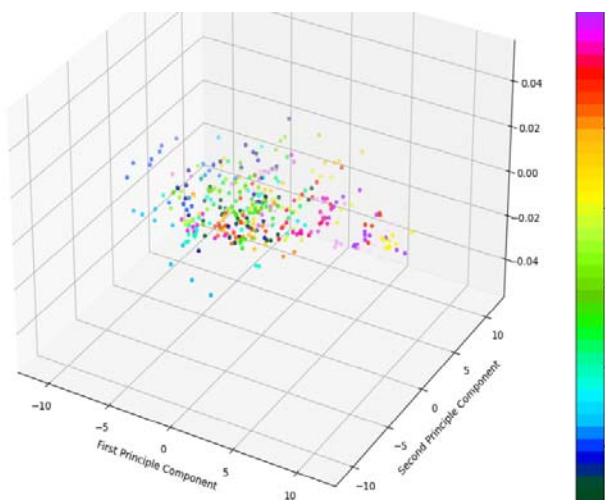


Figure 3 – Projection of people's faces using the principal component analysis method

Subsequently, it is imperative to define various functions and models for implementing a Siamese neural network with a triplet loss function. A function was crafted to retrieve a batch of image triplets, taking into account a list of triplets, the number of triplets in each batch, a boolean value indicating whether image preprocessing should occur. Calculations were made to determine the number of steps required to obtain all batches of triplets [25], and lists for the anchor, positive, and negative images in the current batch were initialized. The anchor, positive, and negative images for the current triplet were retrieved, and images for each category were added to their respective lists. This process yielded a batch of triplets in (128, 128, 3) format suitable for utilization in a neural network. Following the creation of a function to obtain an image coding model (feature extractor), a class was implemented to compute distances between coded images.

With the function in place for acquiring the image coding model, another function was introduced to obtain a

Siamese neural network based on the coding model and a specialized distance layer. This resulted in the acquisition and testing of a Siamese neural network model. Figure 4 depicts a diagram illustrating the discrepancy matrix for classification results using the feature extractor method based on distances between coded images. Along the horizontal and vertical axes are user face numbers [26] corresponding to different faces. Each matrix cell denotes the number of faces that were correctly classified (on the diagonal) or incorrectly classified (off the diagonal). The color of each cell signifies the number of faces classified for the corresponding image pair (anchor class, predicted class), with darker colors indicating a higher number of faces in the corresponding class. This matrix facilitates the evaluation of how effectively the model classifies faces for each individual.

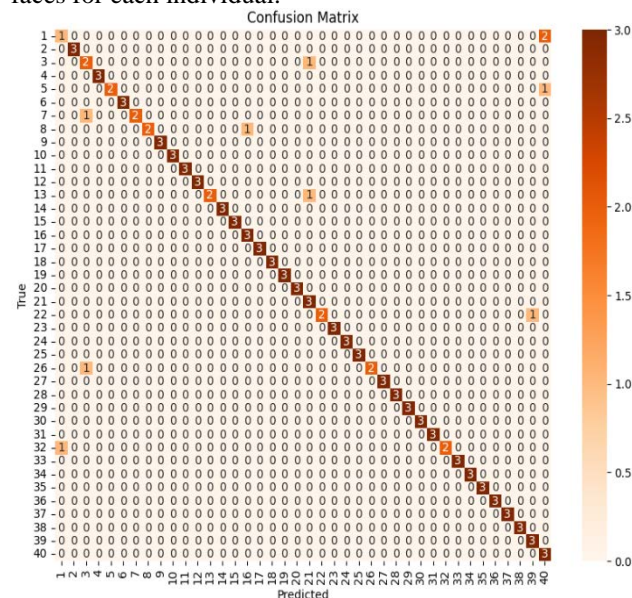


Figure 4 – Discrepancy matrix for classification results

The subsequent step involved declaring a Siamese neural network model class, creating a corresponding class that inherits from the general data model class of the TensorFlow library, and defining methods for training and testing the model, calculating losses, and initializing parameters. An object of the Siamese neural network model class was instantiated, and an optimizer with specific parameters was defined. With a completed model, a testing function for triplets was defined, evaluating the model's accuracy [27] on test triplets. This evaluation included accuracy on the test set of triplets and the average values of distances for correct and incorrect pairs. The training process was conducted for a specified number of epochs, specifically 512 epochs. For each epoch, calculations were performed on the derived value of the average loss of the training set of triplets.

## 5 RESULTS

The model underwent testing on a set of triplets, and various metrics such as accuracy, average distances, and standard deviations were computed. Model weights were

saved upon improvement in accuracy on the test set, and the final step in training involved saving the ultimate model weights after completing all epochs. The primary objective [28] was to train a Siamese neural network utilizing a triplet loss function to address the task of comparing a user's face in two photos and determining whether the response is positive or negative within a specified context. The model endeavors to minimize losses for correct pairs of user faces (anchor positive images) and maximize distances for incorrect pairs of user faces (anchor negative images).

Figure 5 illustrates a diagram depicting a curve, where the X-axis represents completeness, and the Y-axis represents accuracy. Each point on this curve corresponds to a specific decision threshold for the classification model. Accuracy indicates the fraction of positive cases correctly labeled by the model, while completeness denotes the fraction of positive cases actually detected by the model. The accuracy-completeness [29] curve elucidates how accuracy and completeness evolve at different thresholds for solving the problem. The area beneath this curve serves as an indicator of the model's quality, with a larger value signifying better performance. Additionally, the diagram highlights the area between the curve and the X-axis, colored purple, signifying the average accuracy score averaged across all classes.

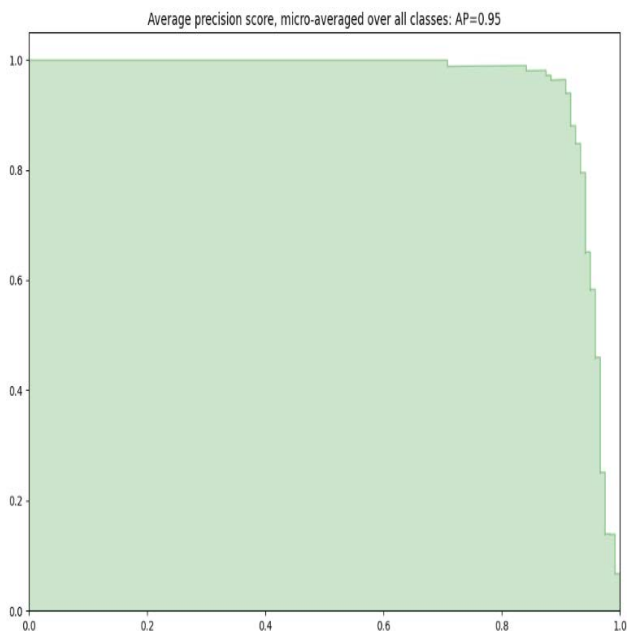
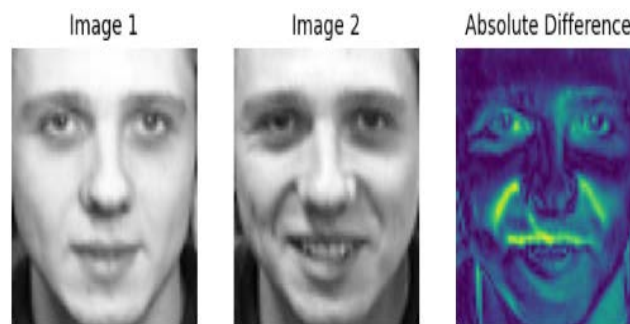


Figure 5 – Specific decision threshold for the classification model

Figure 6 illustrates an instance of a comparison between the anchor image and the input similarity check function. As evident from the figure, the two photos depict the same user, leading to a positive prediction. Within this display, each pixel is represented by a shade based on the magnitude of the difference between corresponding pixels in the first two images.

Darker areas signify less difference, while lighter areas indicate greater dissimilarity. Consequently, this analysis helps ascertain whether the photos represent the same person.



Same person: True

Figure 6 – Comparison between the anchor image and the input similarity check function

## 6 DISCUSSION

A novel encoding function was devised, building upon the architecture of the original encoding model. This process involved traversing the coding layers of the initial model and transferring their weights to equivalent layers in the new encoding structure. The weights of the resulting encoded model were saved, and a description of the encoding layer's architecture was generated. After obtaining embeddings for the provided sets of facial images, the squared distance between face embeddings was computed, and classification was carried out based on a threshold value, yielding an array with predictions of 0 or 1. Two lists of predictions [30] (positive and negative) were generated, corresponding to similar and dissimilar pairs of user faces. All available test triplet packages underwent testing, and an image classification function was implemented to derive predictions for positive (similar) and negative (dissimilar) pairs of user faces. The final step in assessing the Siamese neural network with triplet loss function involved invoking the metrics function to evaluate and visualize the model's performance.

The relationship between training losses and the number of iterations is a critical aspect of understanding the behavior and performance of machine learning models. In Figure 7, each data point represents the loss at a specific iteration, providing insight into the model's convergence and learning process. On the horizontal axis, we have the iterations or steps involved in the training process. These iterations typically correspond to epochs in the context of deep learning models, where one epoch refers to a complete pass through the entire training dataset. As training progresses, the model adjusts its parameters to minimize the loss function, aiming to improve its predictive capabilities. The vertical axis displays the corresponding loss values at each iteration. These losses represent the discrepancies between the model's predictions and the actual target values in the training data. Lower loss values indicate better alignment

between predictions and targets, reflecting improved model performance.

The depicted loss function undergoes a hyperbolic decline in the initial iterations, showcasing rapid improvement as the model learns from the training data. This phase of rapid reduction in loss signifies the model's ability to capture relevant patterns and features from the data. However, as training continues, the rate of decrease in loss gradually diminishes, eventually reaching a plateau. This plateau indicates that the model has learned most of the salient features present in the training data, and further adjustments to parameters yield diminishing returns in terms of reducing loss. The stabilization of losses on the plateau suggests that the model has converged to a stable solution, where further training iterations are unlikely to significantly improve performance on the training data. Analyzing this convergence behavior provides valuable insights into the training dynamics and helps assess the overall efficacy of the training process. In summary, the visualization of training losses over iterations serves as a powerful tool for monitoring model training, understanding convergence behavior, and evaluating the effectiveness of machine learning algorithms.

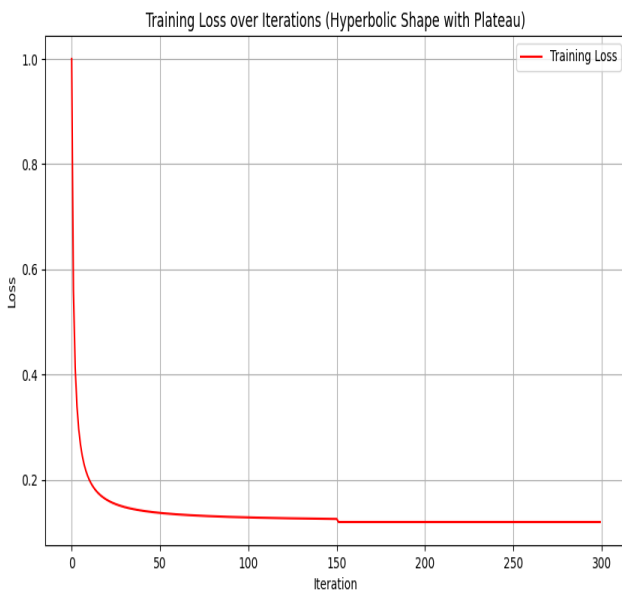


Figure 7 – Training Loss over iterations

In Figure 8 the ROC (Receiver operating characteristic curve) is used to evaluate the performance of a binary classification model across different thresholds. It plots the true positive rate (sensitivity) against the false positive rate ( $1 - \text{specificity}$ ) for various threshold values. It helps in visualizing the trade-off between sensitivity and specificity of a classifier across different threshold values. The ROC curve is particularly useful when you need to understand how well a classifier can distinguish between two classes. Imbalanced datasets are common in many real-world applications, including biometric recognition tasks addressed by Siamese networks. The ROC curve

remains a valuable tool for evaluating model performance in such scenarios. It allows practitioners to assess the classifier's ability to correctly classify both rare and abundant classes, ensuring robust performance across the entire spectrum of class distributions.

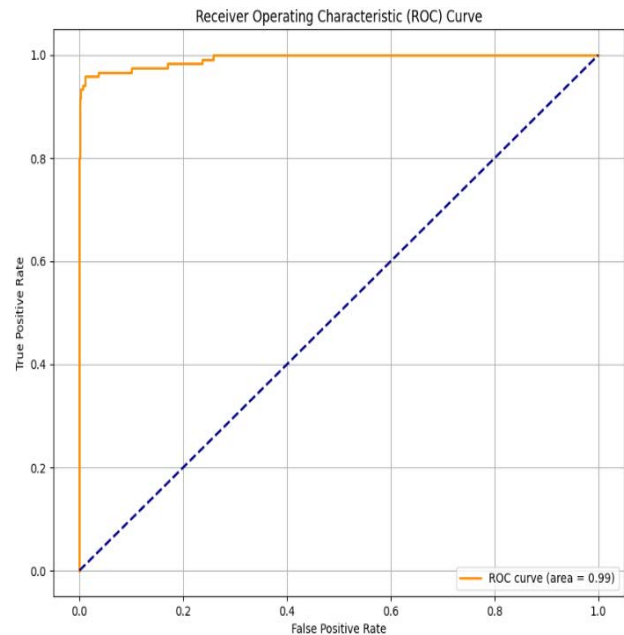


Figure 8 – The performance of a binary classification model across different thresholds

The precision-recall curve in Figure 9 illustrates the trade-off between precision and recall for different threshold values of a classifier. It provides insights into the classifier's performance, particularly in cases of class imbalance where the positive class is rare. The precision-recall curve is more informative when dealing with imbalanced datasets, as it focuses on the positive class prediction accuracy.

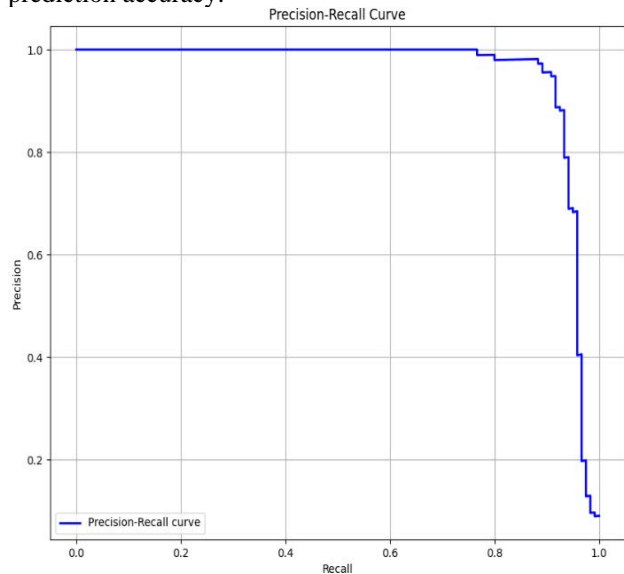


Figure 9 – Trade-off between precision and recall for different threshold values



Learning curves provide insights into how well a Siamese Neural Network is learning from the training data and how its performance generalizes to unseen validation data as the amount of training data increases. These curves help diagnose potential issues related to model bias or variance, which are crucial for optimizing the SNN's performance.

The blue line represents the average training accuracy of the SNN as a function of the number of training samples. It shows how well the model fits the training data. The green dashed line illustrates the average validation accuracy of the SNN across different training sample sizes. It indicates how well the model generalizes to unseen data.

The shaded regions around the mean lines (blue and green) represent the variability or uncertainty in the accuracy estimates. They are computed as the standard deviation of the accuracy scores across different cross-validation folds. If both the training and validation accuracies are low and converge to a similar value, it suggests that the model may have high bias. In the context of SNNs, this could mean that the network architecture or complexity is insufficient to capture the underlying patterns in the data.

A significant gap between the training and validation accuracies indicates potential overfitting. If the training accuracy is substantially higher than the validation accuracy, it suggests that the model is memorizing the training data and failing to generalize to new data points.

Learning curves help determine the optimal amount of training data required to achieve satisfactory performance. If the validation accuracy plateaus or starts decreasing with additional training data, collecting more data may not be beneficial. If the SNN exhibits high bias, increasing model complexity, adding more layers, or tuning hyper-parameters may help improve performance.

To address overfitting, techniques such as regularization, dropout, or reducing model complexity can be employed. Additionally, collecting more diverse training data or applying data augmentation techniques may also help. In Figure 10 X-axis label denotes the quantity of data used for training the SNN. Y-axis label represents the model's classification performance.

## CONCLUSIONS

Throughout the research and development of an authentication system utilizing visual biometrics with a Siamese neural network, a thorough analysis of security aspects and the effectiveness of the authentication process in intelligent systems was undertaken. A pivotal step in this research involved exploring and weighing alternatives to implementing the Siamese neural network, considering both the contrast loss function and the triplet loss function. Through an examination of existing scientific literature, the principal advantages and drawbacks of Siamese neural network loss functions were identified. It was crucial to discern the optimal method for integrating the neural network into an intelligent system. Consequently, the triplet loss function emerged as the

© Batiuk T., Dosyn D., 2024

DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-6

preferred choice for training the model, ensuring a high level of accuracy in user face recognition.

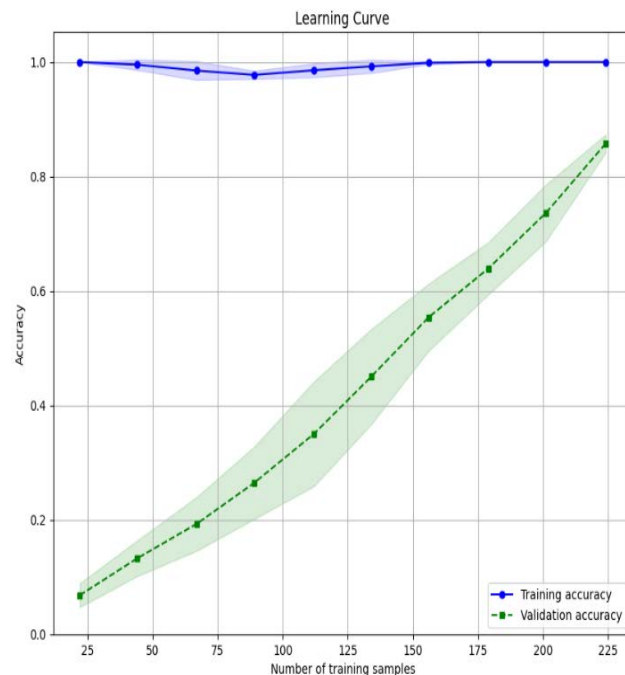


Figure 10 – Model's performance on the training and validation sets as a function of training instances

The essential characteristics of Siamese neural networks were elucidated using diagrams, outlining the operation of the neural network as both a monolithic element and a service within an intelligent system. Block diagrams and a sequence diagram were employed to illustrate the system's operational algorithm and the HTTP requests between its components. Following conceptual design, the programming code was crafted, and a Siamese neural network with a triplet loss function was trained and tested.

This network exhibited dual functionality, capable of both searching for a user's face in a single photo and comparing multiple photos to determine if they belong to the same user-an imperative requirement for the seamless integration of a neural network into an intelligent system. Moreover, the system's capabilities were expanded to include two-factor authentication, employing facial search, recognition, and comparison technologies. This expansion not only elevated security levels but also enhanced the efficiency and reliability of the authentication process.

The integration of the Siamese neural network into the intelligent system yielded an effective tool for user face recognition, along with the storage and comparison of data during authentication. This approach minimizes the risk of unauthorized access, ensuring the security of user accounts. Consequently, the developed system stands as an effective and secure instrument for user authentication, proficient in mitigating security threats within intelligent systems. This approach holds promise for enhancing the protection of confidential information and ensuring robust system access control.



## REFERENCES

1. Zhu Zhiliang et al. Video Object Segmentation Using Multi-Scale Attention-Based Siamese Network, *Electronics*, 2023, Vol. 12, No. 13, P. 2890. DOI: 10.3390/electronics12132890
2. Zhen Pan et al. A Radio Environment Map Updating Mechanism Based on an Attention Mechanism and Siamese Neural Networks, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 18, P. 6797. DOI: 10.3390/s22186797
3. Zhang Yumeng [et al.] Similarity-based pairing improves efficiency of siamese neural networks for regression tasks and uncertainty quantification, *Journal of Cheminformatics*, 2023, Vol. 15, No. 1. DOI: 10.1186/s13321-023-00744-6
4. He Xiangdong et al. An Uncalibrated Image-Based Visual Servo Strategy for Robust Navigation in Autonomous Intravitreal Injection, *Electronics*, 2022, Vol. 11, No. 24, P. 4184. DOI: 10.3390/electronics11244184
5. Ding Weiping et al. Brain age prediction based on resting-state functional MRI using similarity metric convolutional neural network, *IEEE Access*, 2023, P. 1. DOI: 10.1109/access.2023.3283148
6. Batiuk T., Vysotska V., Lytvyn V. Intelligent System for Socialization by Personal Interests on the Basis of SEO Technologies and Methods of Machine Learning, *CEUR Workshop Proceedings, 4th Intern. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems COLINS 2020*, 2020, Vol. 2604, pp. 1237–1250.
7. Batiuk T. et al. Intelligent System for Socialization of Individual's with Shared Interests based on NLP, Machine Learning and SEO Technologies, *CEUR Workshop Proceedings, 6th Intern. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems, COLINS 2022*, 2022, Vol. 3171, pp. 572–631.
8. Kumari Tulika et al. Generating popularity-aware reciprocal recommendations using Siamese Bi-Directional Gated Recurrent Units network, *Vietnam Journal of Computer Science*, 2023. DOI: 10.1142/s2196888823500045
9. Batiuk T., Dosyn D. Intelligent system for clustering users of social networks based on the message sentiment analysis, *Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks"*, 2023, Vol. 13, pp. 121–138. DOI: 10.23939/sisn2023.13.121
10. Batiuk T., Vysotska V. Technology for personalities socialization by common interests based on machine learning methods and seo-technologies, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2022, No. 53 (2), pp. 121–138. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-2-6
11. Lim S.-C., Huh J.-H., Kim J.-C. Siamese Trackers Based on Deep Features for Visual Tracking, *Electronics*, 2023, Vol. 12, No. 19, P. 4140. DOI: 10.3390/electronics12194140
12. Seydi S. T., Shah-Hosseini R., Amani M. A Multi-Dimensional Deep Siamese Network for Land Cover Change Detection in Bi-Temporal Hyperspectral Imagery, *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 19, P. 12597. DOI: 10.3390/su141912597
13. Roodsari S. M. et al. Shape Sensing of Optical Fiber Bragg Gratings Based on Deep Learning, *Machine Learning: Science and Technology*, 2023. DOI: 10.1088/2632-2153/acda10
14. Park S. K. et al. Binary Dense SIFT Flow Based Position-Information Added Two-Stream CNN for Pedestrian Action Recognition, *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, No. 20, P. 10445. DOI: 10.3390/app122010445
15. Zarębski Sebastian et al. Siamese Neural Networks on the Trail of Similarity in Bugs in 5G Mobile Network Base Stations, *Electronics*, 2022, Vol. 11, No. 22, P. 3664. DOI: 10.3390/electronics11223664
16. Karuppasamy R., Velusamy G., Soosaimarian R., Raj P. A Novel Approach of Dynamic Vision Reconstruction from fMRI Profiles Using Siamese Conditional Generative Adversarial Network, *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 2023, Vol. 66. DOI: 10.1590/1678-4324-2023220330
17. Liu Peng et al. Graph neural network based approach to automatically assigning common weakness enumeration identifiers for vulnerabilities, *Cybersecurity*, 2023, Vol. 6, No. 1. DOI: 10.1186/s42400-023-00160-1
18. Gao Peng et al. Efficient and Lightweight Visual Tracking with Differentiable Neural Architecture Search, *Electronics*, 2023, Vol. 12, No. 17, P. 3623. DOI: 10.3390/electronics12173623
19. Sharma Neha et al. Siamese Convolutional Neural Network-Based Twin Structure Model for Independent Offline Signature Verification, *Sustainability*, 2022, Vol. 14, No. 18, P. 11484. DOI: 10.3390/su141811484
20. Lis K., Niewiadomska-Szynkiewicz E., Dziewulska K. Siamese Neural Network for Keystroke Dynamics-Based Authentication on Partial Passwords, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 15, P. 6685. DOI: 10.3390/s23156685
21. Hong J.-W., Kim S.-H., Han G.-T. Detection of Multiple Respiration Patterns Based on 1D SNN from Continuous Human Breathing Signals and the Range Classification Method for Each Respiration Pattern, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 11, P. 5275. DOI: 10.3390/s23115275
22. Zhu Jinting et al. Task-Aware Meta Learning-Based Siamese Neural Network for Classifying Control Flow Obfuscated Malware, *Future Internet*, 2023, Vol. 15, No. 6. P. 214. DOI: 10.3390/fi15060214
23. Fan Jiwei et al. PSiamRML: Target Recognition and Matching Integrated Localization Algorithm Based on Pseudo-Siamese Network, *International Journal of Aerospace Engineering*, 2023, Vol. 2023, pp. 1–16. DOI: 10.1155/2023/1135946
24. Tchynetskyi S., Polishchuk B., Vysotska V. Sentiment analysis technology for user feedback support in e-commerce systems based on machine learning, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2023, No. 3, P. 104. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-11
25. Du Guocai et al. High-Performance Siamese Network for Real-Time Tracking, *Sensors*, 2022, Vol. 22, No. 22, P. 8953. DOI: 10.3390/s22228953
26. Marattukalam Felix et al. Deep Learning-Based Wrist Vascular Biometric Recognition, *Sensors*, 2023, Vol. 23, No. 6, P. 3132. DOI: 10.3390/s23063132
27. Vasconcellos Eduardo M. M. et al. Siamese Convolutional Neural Network for Heartbeat Classification Using Limited 12-lead ECG Datasets, *IEEE Access*, 2023, P. 1. DOI: 10.1109/access.2023.3236189
28. Liu Dali et al. Design of Siamese Network for Underwater Target Recognition with Small Sample Size, *Applied Sciences*, 2022, Vol. 12, No. 20, P. 10659. DOI: 10.3390/app122010659
29. Kummerow André et al. Siamese Sigmoid Networks for the open classification of grid disturbances in power transmission systems, *IET Smart Grid*, 2022. DOI: 10.1049/stg2.12083

Accepted 22.04.2024.  
Received 14.08.2024.

## ОПТИМІЗАЦІЯ АВТЕНТИФІКАЦІЇ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ВІЗУАЛЬНОЮ БІОМЕТРИКОЮ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗПЕКИ

**Батиук Т. М.** – аспірант кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

**Досин Д. Г.** – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, професор кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Основною метою цієї статті є дослідження аспектів, пов'язаних із забезпеченням безпеки та підвищенням ефективності процесів автентифікації в інтелектуальних системах шляхом застосування візуальної біометрії. Основна увага приділяється вдосконаленню та вдосконаленню систем автентифікації за допомогою складних методів біометричної ідентифікації.

**Метою дослідження** було створення спеціалізованої інтелектуальної системи, яка використовує сіамську нейронну мережу для встановлення безпечної автентифікації користувача в існуючій системі. Окрім впровадження основних заходів безпеки, таких як хешування та безпечне зберігання облікових даних користувача, підкреслюється сучасне значення впровадження двофакторної автентифікації. Такий підхід значно посилює захист даних користувачів, перешкоджаючи більшості сучасних методів злому та захищаючи від витоку даних. Дослідження визнає певні обмеження у своєму підході, що, можливо, впливає на можливість узагальнення результатів. Ці обмеження відкривають можливості для майбутніх досліджень і розвідок, сприяючи поточній еволюції методологій автентифікації в інтелектуальних системах.

**Метод.** Система двофакторної автентифікації інтегрує технологію розпізнавання обличчя, використовуючи візуальну біометрію для підвищення безпеки порівняно з альтернативними методами двофакторної автентифікації. Було оцінено різні реалізації сіамської нейронної мережі, що використовують контрастну функцію втрат і функцію триплетних втрат. Згодом була реалізована та навчена нейронна мережа, що використовує триплетну функцію втрат.

**Результати.** У статті наголошується на практичних наслідках розробленої інтелектуальної системи, демонструється її ефективність у мінімізації ризику несанкціонованого доступу до облікових записів користувачів. Інтеграція сучасних методологій автентифікації забезпечує безпечний і надійний процес автентифікації користувачів.

**Висновки.** Впровадження технології розпізнавання обличчя в процесах автентифікації має ширші соціальні наслідки. Це сприяє створенню більш безпечного цифрового середовища, запобігаючи несанкціонованому доступу, зрештою захищаючи конфіденційність користувачів і дані. Оригінальність дослідження полягає в інноваційному підході до автентифікації з використанням візуальної біометрії в рамках сіамської нейронної мережі. Розроблена інтелектуальна система є цінним внеском у цю сферу, пропонуючи ефективне та сучасне рішення проблем автентифікації користувачів.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** Аутентифікація 2FA, модель сіамської мережі, алгоритм Triplet Loss, системи розпізнавання лиць.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Video Object Segmentation Using Multi-Scale Attention-Based Siamese Network / Zhiliang Zhu [et al.] // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, No. 13. – P. 2890. DOI: 10.3390/electronics12132890
2. A Radio Environment Map Updating Mechanism Based on an Attention Mechanism and Siamese Neural Networks / Pan Zhen [et al.] // *Sensors*. – 2022. – Vol. 22, No. 18. – P. 6797. DOI: 10.3390/s22186797
3. Similarity-based pairing improves efficiency of siamese neural networks for regression tasks and uncertainty quantification / Yumeng Zhang [et al.] // *Journal of Cheminformatics*. – 2023. – Vol. 15, No. 1. DOI: 10.1186/s13321-023-00744-6
4. An Uncalibrated Image-Based Visual Servo Strategy for Robust Navigation in Autonomous Intravitreal Injection / Xiangdong He [et al.] // *Electronics*. – 2022. – Vol. 11, No. 24. – P. 4184. DOI: 10.3390/electronics11244184
5. Brain age prediction based on resting-state functional MRI using similarity metric convolutional neural network / Weiping Ding [et al.] // *IEEE Access*. – 2023. – P. 1. DOI: 10.1109/access.2023.3283148
6. Batiuk T. Intelligent System for Socialization by Personal Interests on the Basis of SEO Technologies and Methods of Machine Learning / T. Batiuk, V. Vysotska, V. Lytvyn // *CEUR Workshop Proceedings, 4th Intern. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems COLINS 2020*. – 2020. – Vol. 2604. – P. 1237–1250.
7. Intelligent System for Socialization of Individual's with Shared Interests based on NLP, Machine Learning and SEO Technologies / T. Batiuk [et al.] // *CEUR Workshop Proceedings, 6th Intern. Conf. on Computational Linguistics and Intelligent Systems, COLINS 2022*. – 2022. – Vol. 3171. – P. 572–631.
8. Generating popularity-aware reciprocal recommendations using Siamese Bi-Directional Gated Recurrent Units network / Tulika Kumari [et al.] // *Vietnam Journal of Computer Science*. – 2023. DOI: 10.1142/s2196888823500045
9. Batiuk T. Intelligent system for clustering users of social networks based on the message sentiment analysis / Taras Batiuk, Dmytro Dosyn // *Journal of Lviv Polytechnic National University "Information Systems and Networks"*. – 2023. – Vol. 13. – P. 121–138. DOI: 10.23939/sisn2023.13.121
10. Batiuk T. Technology for personalities socialization by common interests based on machine learning methods and seo-technologies / T. Batiuk, V. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2022. – No. 53 (2). – P. 121–138. DOI: 10.15588/1607-3274-2022-2-6
11. Lim S.-C. Siamese Trackers Based on Deep Features for Visual Tracking / Su-Chang Lim, Jun-Ho Huh, Jong-Chan Kim // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, No. 19. – P. 4140. DOI: 10.3390/electronics12194140
12. Seydi S. T. A Multi-Dimensional Deep Siamese Network for Land Cover Change Detection in Bi-Temporal Hyperspectral Imagery / Seyd Teymoor Seydi, Reza Shah-

- Hosseini, Meisam Amani // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14, No. 19. – P. 12597. DOI: 10.3390/su141912597
13. Shape Sensing of Optical Fiber Bragg Gratings Based on Deep Learning / Samaneh Manavi Roodsari [et al.] // *Machine Learning: Science and Technology.* – 2023. DOI: 10.1088/2632-2153/acda10
14. Binary Dense SIFT Flow Based Position-Information Added Two-Stream CNN for Pedestrian Action Recognition / Sang Kyoo Park [et al.] // *Applied Sciences.* – 2022. – Vol. 12, No. 20. – P. 10445. DOI: 10.3390/app122010445
15. Siamese Neural Networks on the Trail of Similarity in Bugs in 5G Mobile Network Base Stations / Sebastian Zarębski [et al.] // *Electronics.* – 2022. – Vol. 11, No. 22. – P. 3664. DOI: 10.3390/electronics11223664
16. Karuppasamy R. A Novel Approach of Dynamic Vision Reconstruction from fMRI Profiles Using Siamese Conditional Generative Adversarial Network / Rathi Karuppasamy, Gomathi Velusamy, Raja Soosaimarian Peter Raj // *Brazilian Archives of Biology and Technology.* – 2023. – Vol. 66. DOI: 10.1590/1678-4324-2023220330
17. Graph neural network based approach to automatically assigning common weakness enumeration identifiers for vulnerabilities / Peng Liu [et al.] // *Cybersecurity.* – 2023. – Vol. 6, No. 1. DOI: 10.1186/s42400-023-00160-1
18. Efficient and Lightweight Visual Tracking with Differentiable Neural Architecture Search / Peng Gao [et al.] // *Electronics.* – 2023. – Vol. 12, No. 17. – P. 3623. DOI: 10.3390/electronics12173623
19. Siamese Convolutional Neural Network-Based Twin Structure Model for Independent Offline Signature Verification / Neha Sharma [et al.] // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14, No. 18. – P. 11484. DOI: 10.3390/su141811484
20. Lis K. Siamese Neural Network for Keystroke Dynamics-Based Authentication on Partial Passwords / Kamila Lis, Ewa Niewiadomska-Szynkiewicz, Katarzyna Dziewulska // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23, No. 15. – P. 6685. DOI: 10.3390/s23156685
21. Hong J.-W. Detection of Multiple Respiration Patterns Based on 1D SNN from Continuous Human Breathing Signals and the Range Classification Method for Each Respiration Pattern / Jin-Woo Hong, Seong-Hoon Kim, Gi-Tae Han // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23, No. 11. – P. 5275. DOI: 10.3390/s23115275
22. Task-Aware Meta Learning-Based Siamese Neural Network for Classifying Control Flow Obfuscated Malware / Jinting Zhu [et al.] // *Future Internet.* – 2023. – Vol. 15, No. 6. – P. 214. DOI: 10.3390/fi15060214
23. PSiamRML: Target Recognition and Matching Integrated Localization Algorithm Based on Pseudo-Siamese Network / Jiwei Fan [et al.] // *International Journal of Aerospace Engineering.* – 2023. – Vol. 2023. – P. 1–16. DOI: 10.1155/2023/1135946
24. Tchynetskyi S. Sentiment analysis technology for user feedback support in e-commerce systems based on machine learning / S. Tchynetskyi, B. Polishchuk, V. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2023. – No. 3. – P. 104. DOI: 10.15588/1607-3274-2023-3-11
25. High-Performance Siamese Network for Real-Time Tracking / Guocai Du [et al.] // *Sensors.* – 2022. – Vol. 22, No. 22. – P. 8953. DOI: 10.3390/s22228953
26. Deep Learning-Based Wrist Vascular Biometric Recognition / Felix Marattukalam [et al.] // *Sensors.* – 2023. – Vol. 23, No. 6. – P. 3132. DOI: 10.3390/s23063132
27. Siamese Convolutional Neural Network for Heartbeat Classification Using Limited 12-lead ECG Datasets / Eduardo M. M. Vasconcellos [et al.] // *IEEE Access.* – 2023. – P. 1. DOI: 10.1109/access.2023.3236189
28. Design of Siamese Network for Underwater Target Recognition with Small Sample Size / Dali Liu [et al.] // *Applied Sciences.* – 2022. – Vol. 12, No. 20. – P. 10659. DOI: 10.3390/app122010659
29. Siamese Sigmoid Networks for the open classification of grid disturbances in power transmission systems / André Kummerow [et al.] // *IET Smart Grid.* – 2022. DOI: 10.1049/stg2.12083

## ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ВІДЕОПОТОКУ ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ЦІЛЕЙ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВОГНЕМ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Висоцька В. А.** – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

**Романчук Р. В.** – аспірант кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Розпізнавання цілей є пріоритетом у військовій справі. Це завдання ускладнюється тим, що необхідно розпізнавати рухомі об'єкти, різний рельєф і ландшафт створюють перешкоди для розпізнавання. Бойові дії можуть відбуватися в різний час доби, відповідно, необхідно враховувати ракурс освітлення та загальне освітлення. Необхідно виявити об'єкт на відео шляхом сегментації відеокадрів, розпізнати та класифікувати його.

**Мета** – розроблення технології аналізу розроблення технології розпізнавання цілей в реальному масштабі часу, як складової системи управління вогнем, за рахунок використання штучного інтелекту, YOLO та машинного навчання.

**Метод.** В статті розроблено технологію аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання. У роботі запропоновано розробку модуля розпізнавання цілей як складової системи управління вогнем в рамках запропонованої інформаційної технології з використанням штучного інтелекту. Сімейство моделей розпізнавання образів YOLOv8 використано для розробки модуля розпізнавання цілей. Методи, які використано під час дослідження сформованого датасету.

– Bounding Box: Noise – Up to 15% of pixels (обмежувальна рамка: додавання до зображення шуму «солі та перцю» – до 15% пікселів).

– Bounding Box: Blur – Up to 2.5px (обмежувальна рамка: додавання до зображення розмиття за Гаусом – до 2,5 пікселів).

– Cutout – 3 boxes with 10% size each (вирізати частину зображення – 3 коробки по 10% розміру кожна).

– Brightness – Between –25% and +25% (зміна яскравості зображення для збільшення стійкості моделі до зміни освітлення та налаштувань камери – від –25% до +25%).

– Rotation – Between –15° and +15° (обертання об'єкта зображення – за або проти годинникової стрілки на ступінь від –15° до +15°).

– Flip – Horizontal (перевертання об'єкта зображення горизонтально).

**Результати.** Дані зібрані з відкритих джерел, зокрема, з відеозаписів, розміщених у відкритих джерелах на платформі YouTube. Основним завданням попередньої обробки даних є класифікація трьох класів об'єктів на відео або в режимі реального часу – БТР, БМП і ТАНК. Набір даних формується за допомогою платформи Roboflow на основі інструментів маркування та, згодом, інструментів доповнення. Набір даних складається з 1193 унікальних зображень – приблизно порівну для кожного класу. Тренінг проводився з використанням ресурсів Google Colab. На навчання моделі пішло 100 epoch.

**Висновки.** Аналіз проводиться відповідно до показників mAP50 (середня точність 0,85), mAP50-95 (0,6), точності (0,89) і запам'ятовування (0,75). Великі втрати є через те, що під час дослідження не було враховано фон – навчання модуля на основі підтверджених даних (зображень) фону без техніки.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** розпізнавання рухомих об'єктів, безпека, конфіденційність, YOLO, ідентифікація цілей, машинне навчання, БТР, БМП, ТАНК.

### АБРЕВІАТУРА

БМП – бойова машина піхоти;

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

БТР – бронетранспортер;

ATRU – automatic target recognition unit;

YOLO – you only live once (нейронна мережа).

### НОМЕНКЛАТУРА

$M$  – модуль спостереження для автоматичного розпізнавання та ідентифікації цілей системи керування вогнем;

$I$  – множина вхідних даних у вигляді відеопотоку з відеокамери,  $I = \{i_1, i_2, i_3, i_4\}$ ;

$O$  – множина вихідних даних у вигляді розпізнавання та ідентифікації об'єктів військової техніки,  $O = \{o_1, o_2, o_3\}$ ;

$R$  – основні правила опрацювання вхідних даних відеопотоку,  $R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\}$ ;

$U$  – параметри опрацювання вхідних даних відеопотоку,  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ ;

$N$  – нейронна мережа навчання розпізнавання, ідентифікації та класифікації об'єктів військової техніки типу ТАНК/БМП/БТР;

$\alpha$  – оператор аналізу та розкадровки вхідних даних відеопотоку;

$\beta$  – оператор опрацювання зображень через сегментування та аналіз сегментованих об'єктів;

$\gamma$  – оператор розпізнавання, ідентифікації та класифікації об'єктів військової техніки типу ТАНК/БМП/БТР;



$\mu$  – оператор розпізнавання потенційних будь-яких об'єктів на зображенні (будівлі, мостів, військової техніки тощо);

$i_1$  – множина даних із відеопотоку та зображень оригіналу;

$i_2$  – множина зображень військової техніки;

$i_3$  – множина даних фонів пейзажів місцевості;

$i_4$  – словники валідованих зображень військової техніки;

$r_1$  – правила розкадрування відеопотоку на зображення;

$r_2$  – правила сегментування зображення;

$r_3$  – правила аналізу сегментів зображення;

$r_4$  – правила машинного навчання нейронної мережі ідентифікації військової техніки;

$r_5$  – правила класифікації військової техніки;

$u_1$  – множина умов формування зображень з відеопотоку;

$u_2$  – множина вимог аналізу зображень, в тому числі фільтрування від шуму;

$u_3$  – множина умов опрацювання зображень;

$u_4$  – множина умов розпізнавання та ідентифікації об'єктів військової техніки;

$u_5$  – множина вимог класифікації розпізнаних об'єктів військової техніки;

$\chi$  – оператор розпізнавання потенційних об'єктів військової техніки на зображенні;

$o_1$  – множина розпізнаних всіх об'єктів на зображенні;

$o_2$  – множина розпізнаних всіх об'єктів військової техніки на зображенні;

$o_3$  – множина ідентифікованих всіх об'єктів військової техніки на зображенні;

$\omega$  – оператор ідентифікації розпізнаного об'єкту військової техніки на множині розкадрованих з відеопотоку зображеннях;

$\lambda$  – оператор класифікації ідентифікованого об'єкту військової техніки на множині розкадрованих з відеопотоку зображеннях.

## ВСТУП

Сьогодні провідні армії світу прагнуть підвищити можливості своїх основних зразків техніки та озброєння за рахунок модернізації існуючого парку, або розроблення новітніх зразків. Автоматичне розпізнавання цілей ATRU полягає у здатності алгоритму або пристрою розпізнавати цілі або об'єкти на основі даних отриманих від сенсорів, в тому числі від відеоспостереження, наприклад від БПЛА, таких як дрони, або від відео-реєстраторів на бойових машинах. З іншого боку у зв'язку зі збільшенням використання БПЛА для розвідки ворогом безпека та конфіденційність багатьох критично важливих місць можуть бути скомпрометовані. Тому вони також є законною ціллю для розпізнавання системою керування вогнем.

Інформаційна технологія розпізнавання цілей є основним складовим в крилатих ракетах та БПЛА, а

також для розроблення бойових роботів або роботів-саперів. Автоматичне розпізнавання цілей застосовують не лише у військових справах, але наприклад в організації пошуку людей/об'єктів (в морі, в зоні стихійних лих, пожеж тощо).

Задача автоматичного розпізнавання цілей в умовах бойових дій ускладнюється декількома чинниками, зокрема:

– можливий рух об'єкта, який розпізнається;

– рух об'єкта (бойової машини або БПЛА), звідки йде відеоспостереження та подальше розпізнавання цілей;

– різні погодні умови;

– різний рельєф місцевості та ландшафт, в тому числі лісові смуги;

– присутність інших об'єктів, які потенційно не є цілями (будівлі, підбиті/знищені бойові машини, частини споруд як мости тощо);

– освітлення;

– потенційно об'єкт, який розпізнається, не є ворогом;

– частина об'єкту, який розпізнається, сховано за перешкодами;

– кут спостереження для різних об'єктів різний (для БПЛА зверху вниз, для бойових машин не лише вперед/навколо, але вгору для наприклад БПЛА).

Як бачимо, умови освітлення, різні розміри об'єктів, рухомий фон та різноманітні фонові контрасти значно впливають на якість, оперативність та швидкість розпізнавання об'єктів з відеоспостереження [1–2]. Необхідно не лише виявити об'єкт на відео, сегментувавши відео-кадри, а і розпізнати та класифікувати його (наприклад, дрон чи птах, машина чи будівля тощо), і це все зазвичай під час руху як об'єкта спостереження, так і об'єкта-спостерігача при несприятливих умовах у реальному часі. Виявлення літаючих об'єктів або об'єктів, які рухаються в несприятливих умовах, на відео відрізняється від стандартного виявлення об'єктів, оскільки розмір нерухомого/рухомого/літаючого і/або частково захованого об'єкта за іншим об'єктом постійно змінюється в кадрах залежно від його відстані та руху об'єкта-спостерігача. Він має такі проблеми, як низька роздільна здатність, зміни освітлення через день і ніч і нестабільний фон, різні погодні умови. Також точність розпізнавання залежить від якості камери спостереження, вибір якої під час бойових дій не контрольованим процесом. Складність спостереження збільшується при розпізнаванні від 2D (попереді перед камерою) до 3D (зверху з дна під різними кутами на різних висотах) рухомих об'єктів з врахуванням масштабування та пропорцій. Аналогічно зменшує точність розпізнавання об'єктів, які між собою візуально подібні та відрізняються малими ознаками або їх відсутності при спостереженні в різних ракурсах або при частково схованому корпусі за іншими природними об'єктами або будівлями (наприклад, деякі модифікації танків серії Т). Отже, виявлення та

розпізнавання нерухомих/рухомих/ літаючих/ рухливих і/або частково захованих об'єктів за іншими об'єктами в стані нерухомості/рухомості спостерігача в різних погодних умовах, ландшафтах, освітленні та на різній висоті мають великий обсяг спостереження та високу мобільність. Існує сильна потреба в таких програмах у реальному світі через відмінності їх розміру в межах одного типу об'єкта та просторової роздільної здатності датчика.

**Метою дослідження** є розроблення технології розпізнавання цілей в реальному масштабі часу, як складової системи управління вогнем, за рахунок використання штучного інтелекту. Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– визначити ефективний підхід інтелектуального аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання;

– провести експериментальне дослідження методів та інструментів інтелектуального аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання;

– розробити метод розрахунку вірогідності розпізнавання цілей системи керування вогнем;

– здійснити аналіз результатів експериментальної апробації запропонованої технології аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання.

Об'єкт дослідження – процеси аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем. Предмет дослідження – методи та засоби аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем.

## 1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

За останні роки під час повномасштабної війни в Україні з поступовим вдосконаленням технології керування дронами зображення та відео дистанційного зондування БПЛА стали важливим джерелом оперативних даних. Паралельно оснащення бойових машин відео-регістраторами для відео-спостереження з елементами штучного інтелекту та машинного навчання для розпізнавання об'єктів реальному часі дозволить збільшити рівень безпеки учасникам бойових дій при відповідному своєчасному реагуванні на результати розпізнавання цілей.

*Відео-кадри → сегментація відеокадру → виявлення потенційних об'єктів → виявлення об'єктів в русі → розпізнавання об'єктів як потенційно небезпечних → класифікація об'єктів → ідентифікація об'єкту.*

Модуль спостереження для автоматичного розпізнавання та ідентифікації цілей системи керування вогнем  $M$  подано імітаційною моделлю через кортеж:

$$M = \langle I, O, R, U, N, \alpha, \beta, \gamma \rangle.$$

Основними процесами моделі спостереження для автоматичного розпізнавання та ідентифікації цілей системи керування вогнем є «Опрацювання відеопотоку», «Опрацювання зображень», «Машинне навчання» та «Класифікація об'єктів».

Процес «Опрацювання відеопотоку» опишемо суперпозицією:

$$C_{AU} = \mu \circ \beta \circ \alpha, C_{AU} = \mu(\beta(\alpha(i_1, i_2, i_3), r_1, u_1), u_2).$$

Процес «Опрацювання зображень» опишемо суперпозицією:

$$C_{CU} = \chi \circ \beta \circ \alpha, \text{ тобто} \\ C_{CU} = \chi(\beta(\alpha(C_{AU}, i_2, i_3, i_4), o_1, r_2, u_3), r_3).$$

Процес «Машинне навчання» опишемо як:

$$C_{UL} = \omega \circ \gamma \circ \beta \circ \alpha, \\ C_{UL} = \omega(\gamma(\beta(\alpha(C_{CU}, i_1), o_2, i_4), u_4), r_4).$$

Процес «Класифікація об'єктів» опишемо як:

$$C_{US} = \lambda \circ \gamma \circ \beta \circ \alpha, \\ C_{US} = \lambda(\gamma(\beta(\alpha(C_{US}, i_1), o_3, i_4), u_5), r_5).$$

Аналіз здійснюється за допомогою класифікації чи кластеризації, що сегменти за певними критеріями. Хоч збір інформації й відбувається автоматично, проте все ще необхідна реалізація таких досліджень згідно розпізнавання, ідентифікації та класифікації об'єктів в несприятливих умовах в русі та при поганій якості зображення, та відповідна обробка результатів. Також суттєво впливає на результати дослідження ефективність опрацювання відповідного фону та об'єктів на ньому (наприклад зелене на фоні зеленому або частина об'єкта сховане за іншим об'єктом). Ще одним з найважливіших критеріїв подібної технології є можливість збору даних в залежності від періоду доби та пори року, та їх періодичність із-за зміни фону із-за результатів ведення активних бойових дій в певній місцевості.

## 2 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

Сьогодні зазвичай застосовують нейронні мережі та глибоке навчання для таких завдань, як сегментація зображень [3–5], виявлення об'єктів [6–8] і класифікація зображень [9–11]. Більшість застосовуваних на даний момент глибоких нейронних мережевих моделей, таких як PSPNET [4], U-NET [5], RESNET [10], VGG [11], розроблені на основі зібраних вручну наборів даних зображень (не відео) при сприятливих умовах, таких як MS-COCO [12], VOC2012 [13], VOC2007 [14].

Існує два загальні сценарії застосування методів виявлення об'єктів дистанційного зондування дронами

або на основі відео-спостереження з машини, зокрема опрацювання даних передбачається:

– після польоту/поїздки за допомогою стаціонарних комп'ютерів (потрібна висока точність виявлення та ідентифікації).

– в режимі реального часу під час польоту/поїздки, коли вбудований комп'ютер на дроні або в машині відповідно синхронно опрацьовує дані відео у режимі реального часу. Параметри моделі повинні бути в межах певного масштабу, щоб відповідати вимогам до роботи вбудованого обладнання. Після виконання робочих умов точність виявлення методу також повинна бути якомога вищою.

Тому застосовані методи виявлення об'єктів на основі нейронної мережі повинні відповідати різним вимогам для кожного сценарію.

Таким чином, методи нейронної мережі для виявлення об'єктів на відео дистанційного зондування безпілотників або при відео-спостереженні в бойових машинах повинні мати можливість адаптуватися до конкретних характеристик цих даних. Вони повинні бути розроблені відповідно до вимог опрацювання даних після польоту/поїздки, що може забезпечити високу точність і швидкість відкликання, або вони повинні бути розроблені як моделі з параметрами меншого масштабу, які можна розгортати у вбудованих апаратних середовищах для опрацювання в реальному часі на дрони/машини. У цій роботі ми пропонуємо застосування нейронної мережі на основі архітектури YOLOv8 для автоматичного розпізнавання об'єктів як потенційних цілей системи керування вогнем.

На сьогодні запропоновано численні методи виявлення об'єктів на основі нейронних мереж, зокрема за допомогою серії YOLO [15–22]. На відміну від двоетапних методів, одноетапний метод поєднує визначення розташування об'єкта та класифікацію в один крок, досягаючи виявлення об'єкта в реальному часі як на робочому столі, так і на вбудованому обладнанні. Ці методи не тільки досягають хороших результатів ідентифікації, але також пропонують низку вдосконалень у таких областях, як методи збільшення даних навчання, методи навчання мережі, функції втрат, функції активації та структури мережеских моделей.

В [18] запропоновано YOLOX, модель нейронної мережі з одноетапним виявленням об'єктів. В [19] автори запропонували модель нейронної мережі з одноетапним виявленням цілі. В роботі [20] автори дослідили оптимальну швидкість і точність виявлення об'єктів на основі YOLOv4. Автори в [23] описали CSPDarkNet як магістральну структуру мережі, покращуючи здатність до навчання згорткових нейронних мереж, дозволяючи мережі підтримувати точність вилучення карти ознак. У роботі [24] автори запропонували метод CrowdDet на основі нейронної мережі для виявлення щільних і взаємно закритих цілей на зображеннях. У шийній частині мережі введено модуль SPPF і модуль PAFPN [25]. Автор все © Висоцька В. А., Романчук Р. В., 2024  
DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-7

ще використовують CSPDarkNet [23] як магістральну мережу, але вводять SiLU як функцію активації, яка вирішує проблему градієнтної дисперсії, коли вхід функції ReLU негативний, а вихід дорівнює 0 [26–27].

Існує багато досліджень на основі різних версій YOLO, але досі залишається найбільш важливою проблема при ідентифікації об'єктів ефективне виявлення малих об'єктів та точність класифікації різних рухливих об'єктів при різних умовах навколишнього середовища (наприклад об'єкт в різних градаціях зеленого кольору забарвлення на фоні також різного спектру зеленого кольору) в відео потоці різної якості зображення при подальшому розкадровці та сегментуванні відповідних зображень для ідентифікації та класифікації.

Зображення дистанційного зондування часто мають великі розміри, складний фон і значну присутність дрібних об'єктів. Запропоноване рішення зосереджено на оптимізації точного виявлення малих об'єктів на відстані та об'єктів в русі при різних умовах навколишнього середовища. Перевага мереж серії YOLO полягає у використанні багаторівневих головок виявлення, що дозволяє виявляти об'єкти різного розміру з різних рівнів векторів ознак. Наш підхід головним чином зосереджений на виявленні маленьких об'єктів, а також рухливих об'єктів за допомогою векторів ознак із нижніх шарів, які мають вищу просторову роздільну здатність. Для досягнення цієї мети ми використовуємо модуль машинного навчання для оптимізації їхніх семантичних характеристик. Головки виявлення можуть отримувати вектори ознак як з високою просторовою роздільною здатністю, так і з точною семантичною інформацією, підвищуючи таким чином загальну точність ідентифікації.

Під час глибокого навчання методи вилучення ознак SIFT (масштабно-інваріантне перетворення ознак) і HOG (гістограми орієнтованих градієнтів) виконували це завдання, застосовуючи деякі алгоритми машинного навчання поверх класифікатора. Частина методів глибокого навчання застосовують для кольорових зображень, а інші – до ІЧ-зображень. Опрацювання ІЧ-зображень у режимі реального часу є простішою, оскільки вимагає менших обсягів пам'яті та обчислювальної потужності. Також не впливає на різні умови освітлення. Але зібрати навчальний датасет для деяких предметних областей (наприклад військові техніки під час війни) практично не можливо. Алгоритми сімейства YOLO, засновані на архітектурі CNN, є широко використовуваними і добре відомими алгоритмами для вирішення проблем виявлення об'єктів. YOLO v4 і YOLO v5 – це в основному вживані моделі. YOLO v4, будучи модифікованою версією YOLO3, використовує межетапну часткову мережу (CSPNet) у Darknet, створюючи нову магістраль екстрактора функцій під назвою CSPDarknet53. Щоб підвищити ефективність алгоритму, YOLOv4 використовує мішок



безкоштовних і мішок спеціальних пропозицій. Повна втрата IOU (CIOU), регуляризація блокування випадання та багато підходів до розширення. Активізація Mish, Diou-NMS і модифіковані мережі агрегації шляхів включені в пакет спеціальностей. Але YOLOv5 відрізняється від попередніх версій. Тут замість Darknet використовується PyTorch. Він використовує CSPDarknet53 як структурну підтримку. Ця магістраль усуває надлишкову інформацію про градієнт, яку можна побачити у великих магістралях, і включає зміну градієнта в карти функцій, що пришвидшує висновок, покращує точність і зменшує розмір моделі за рахунок зменшення кількості параметрів. Він посилює потік інформації, використовуючи мережу агрегації шляхів (PANet), що призводить до трьох різних виходів карти функцій для багатомасштабного прогнозування. Це покращує здатність моделі ефективно передбачати дрібні та великі предмети. Зображення надсилається до PANet для об'єднання функцій після введення в CSPDarknet53 для видалення функцій. Швидкість обробки YOLO v4 і v5 коливається від 45 до 150 кадрів в секунду. Однак, на відміну від швидшого R-CNN, він має меншу похибку запам'ятовування та вищу локалізацію. Оскільки кожна сітка може запропонувати лише дві обмежувальні рамки, вона також має проблеми з виявленням предметів поблизу та дрібних об'єктів. Останнім доповненням до сімейства засобів виявлення об'єктів YOLO є модель YOLO v8. Це найшвидший і найточніший на сьогодні детектор об'єктів у реальному часі. Всі інструменти на основі YOLOv8 перевершують попередні детектори об'єктів за швидкістю та точністю.

### 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У роботі обговорюється гібридний підхід із використанням CNN-LSTM для покращення продуктивності виявлення військової техніки рашки з рухомим фоном і різними відстанями, а також її ТАНК/БТР/БМП. Основні внески статті.

1. Збір зображень із відкритих джерел за платформи ютуб.

2. Гібридна модель CNN-LSTM з гіперпараметричним налаштуванням за допомогою байєсівської оптимізації для виявлення об'єктів.

3. Детальний аналіз моделі YOLOV8 на різних діапазонах зображень і визначення їх точності з певним значенням довіри.

Алгоритми виявлення об'єктів у глибокому навчанні в основному поділяються на регіональні та регресійні. Основним завданням виявлення об'єктів військової техніки рашки є виявлення об'єкта в кадрі, де присутні об'єкти різних цільових класів; отже, класифікація об'єктів є необхідною умовою для виявлення об'єктів за допомогою обмежувальної рамки.

1. Алгоритми на основі регресії використовуються переважно для виявлення об'єктів у реальному часі. Це одноетапні структури, засновані на глобальній © Висоцька В. А., Романчук Р. В., 2024  
DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-7

регресії/класифікації, які прямо відображають пікселі зображення на координати обмежувальної рамки, зменшуючи витрати часу. Однією з найшвидших моделей розпізнавання об'єктів є YOLO, яка може аналізувати кадри зі швидкістю до 150 FPS для невеликих мереж. Хоча YOLO не є найточнішою моделлю з точки зору середньої середньої точності (mAP), вона показала себе достатньо добре під час навчання.

У частині виявлення об'єктів військової техніки проводився експеримент з автоматичного розпізнавання та ідентифікації цілей системи керування вогнем. Це було реалізовано за допомогою різних моделей виявлення об'єктів. Експеримент зосереджений на реалізації алгоритму YOLO v8 для порівняння з іншими версіями.

2. Алгоритми на основі регіональних пропозицій. Після появи відповідності CNN запропонована регіональна згорткова нейронна мережа (R-CNN). У порівнянні з моделями без глибоких CNN, R-CNN значно підвищив ефективність виявлення щодо середньої середньої точності (mAP). Він має кілька недоліків, включаючи дороге навчання з точки зору грошей і часу, і, найгірше, високу затримку (час виявлення). Спираючись на роботу R-CNN, швидкий R-CNN підвищує точність, прискорюючи навчання та тестування. Швидкий R-CNN різко скорочує час навчання та тестування, однак регіональні пропозиції все ще створюються з використанням традиційних методів, які потребують багато часу для попередньої обробки. Швидкий R-CNN пропонується як вирішення проблеми вузького місця з пропозиціями регіонів, які роблять пропозиції регіонів через нейронну мережу. Швидкий/швидкий R-CNN та інші детектори об'єктів, які використовують мережі регіональних пропозицій, продемонстрували передову продуктивність у багатьох тестах. Однак вони не завжди успішно знаходять дрібні предмети. Поточні підходи гірші щодо повторюваності та узагальнення, коли обставини реального світу постійно змінюються, оскільки вони залежать від конкретних даних зображення.

3. Класифікація нерухомого/рухомого/літаючого і/або частково захованого об'єкта військової техніки за іншим об'єктом при несприятливих умовах у реальному часі. Виявлення літаючих об'єктів або об'єктів, які рухаються в несприятливих умовах, на відео відрізняється від стандартного виявлення об'єктів, оскільки розмір нерухомого/рухомого/літаючого і/або частково захованого об'єкта за іншим об'єктом постійно змінюється в кадрах залежно від його відстані та руху об'єкта-спостерігача. Він має такі проблеми, як низька роздільна здатність, зміни освітлення через день і ніч і нестабільний фон, різні погодні умови. Також точність розпізнавання залежить від якості камери спостереження, вибір якої під час бойових дій не контролюється процесом. Складність спостереження збільшується при розпізнаванні від 2D



(попереду перед камерою) до 3D (зверху з дна під різними кутами на різних висотах) рухомих об'єктів з врахуванням масштабування та пропорцій. Аналогічно зменшує точність розпізнавання об'єктів, які між собою візуально подібні та відрізняються малими ознаками або їх відсутності при спостереженні в різних ракурсах або при частково схованому корпусі за іншими природніми об'єктами або будівлями.

4. Методи виявлення об'єктів на основі глибокого навчання для різних задач, які включають виявлення смуги, інтелектуальні системи транспортних засобів, виявлення рухомих об'єктів, в тому числі військової техніки тощо.

Аналіз здійснюється за допомогою класифікації чи кластеризації, що сегменти за певними критеріями. Хоч збір інформації й відбувається автоматично, проте все ще необхідна реалізація таких досліджень згідно розпізнавання, ідентифікації та класифікації об'єктів в несприятливих умовах в русі та при поганій якості зображення, та відповідна обробка результатів. Також суттєво впливає на результати дослідження ефективність опрацювання відповідного фону та об'єктів на ньому (наприклад зелене на фоні зеленому або частина об'єкта сховане за іншим об'єктом). Ще одним з найважливіших критеріїв подібної технології є можливість збору даних в залежності від періоду доби та пори року, та їх періодичність із-за зміни фону із-за результатів ведення активних бойових дій в певній місцевості.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В роботі авторами пропонується розробка модуля розпізнавання цілей, як складової системи управління вогнем в рамках запропонованої інформаційної технології за рахунок використання штучного інтелекту.

Для розробки модуля розпізнавання цілей використано сімейство моделей для розпізнавання моделей YOLOv8. Це найновіша версія популярного продукту компанії Ultralytics для виявлення об'єктів та сегментації зображень у реальному часі. YOLOv8 поставляється в комплекті з такими попередньо підготовленими моделями:

– Моделі класифікації зображень, що попередньо навчаються на базі даних ImageNet з роздільною здатністю зображення 224.

– Контрольні точки сегментації екземпляра, навчені на наборі даних сегментації COCO з роздільною здатністю зображення 640.

– Контрольні точки виявлення об'єктів, що навчаються на основі набору даних COCO detection з роздільною здатністю зображення 640.

– Виведення виконується зі швидкістю майже 105 кадрів в секунду на графічному процесорі середньостатистичного сучасного ноутбука, а адвелька модель працює в середньому зі швидкістю 17 кадрів за секунду.

YOLOv8 використовує фреймворк PyTorch – фреймворк для розроблення глибоких нейронних мереж від компанії Facebook. YOLOv8 має ряд переваг у порівнянні з іншими засобами, зокрема:

– Підтримка більшістю сервісів надання обчислювальних потужностей.

– Велика кількість способів застосування і використання моделей.

– Великий рівень точності, що підтверджено тестам на наборах даних COCO та Roboflow 100.

Як зазначалось вище, YOLOv8 досягає високої точності на наборі даних COCO. Наприклад, модель YOLOv8m – досягає 50,2% mAP при вимірюванні на COCO. Під час порівняння з Roboflow 100, набором даних, який конкретно оцінює продуктивність моделі в різних областях, YOLOv8 отримав значно кращий результат, ніж YOLOv5. Крім того, YOLOv8 надає для розробників значний перелік функцій. На відміну від інших моделей, у яких завдання розподіляються між багатьма різними файлами Python, YOLOv8 постачається з CLI-інтерфейсом, який робить навчання моделі більш зрозумілим.

Для навчання використовувався сервіс Google Colaboratory, більш відомий як “Colab”. “Colab” – це хмарна версія Jupyter Notebook. Щоб використовувати Colab, не потрібно встановлювати та виконувати або оновлювати апаратне забезпечення комп'ютера, щоб відповідати вимогам Python до інтенсивного навантаження CPU/GPU. Крім того, Colab надає безкоштовний доступ до обчислювальної інфраструктури, як-от сховище, оперативна пам'ять, обчислювальні потужності, графічні процесори (GPU) і тензорні процесори (TPU).

Методи, які використано під час дослідження сформованого датасету.

– Flip – Horizontal (перевертання об'єкта зображення горизонтально).

– Rotation – Between  $-15^\circ$  and  $+15^\circ$  (обертання об'єкта зображення – за або проти годинникової стрілки на ступінь від  $-15^\circ$  до  $+15^\circ$ ).

– Brightness – Between  $-25\%$  and  $+25\%$  (зміна яскравості зображення для збільшення стійкості моделі до зміни освітлення та налаштувань камери – від  $-25\%$  до  $+25\%$ ).

– Cutout – 3 boxes with 10% size each (вирізати частину зображення – 3 коробки по 10% розміру кожна).

– Bounding Box: Blur – Up to 2.5px (обмежувальна рамка: додавання до зображення розмиття за Гаусом – до 2,5 пікселів).

– Bounding Box: Noise – Up to 15% of pixels (обмежувальна рамка: додавання до зображення шуму «солі та перцю» – до 15% пікселів).

Останні два пункти застосовують для розширення рівня обмежувальної рамки при формуванні/генеруванні нових навчальних даних, лише змінюючи вміст обмежувальних рамок вихідного зображення. Збільшення зображення – це

процес збільшення розміру набору даних шляхом маніпулювання наявними навчальними даними. Збільшення зображення допомагає моделі краще узагальнити для широкого спектру контекстів. Наприклад, можна змінити яскравість або темність об'єкта відносно його фону. Або, можливо, розмийте об'єкт відносно його фону для завдань, які часто включають зйомку об'єктів, що швидко рухаються. Модифікації лише обмежувальної рамки призводять до системних покращень, особливо для моделей, які були невеликими наборами даних (декілька тисяч фото). Можна також змінити кольори лише об'єктів на OCR-зображенні, запровадити розмиття лише для рухомих об'єктів, як-от військової техніки в різних спектрах зеленого, обертати об'єкти, як-от об'єкти у зоні спостереження згори, і перевернути орієнтацію об'єктів, щоб створити ефект дзеркального відображення, подібний до тих, що присутні в більшості ситуацій з камерою.

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Перед розробленням модуля автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем організовано робочий простір та визначені правила доступу до сховища даних та опрацювання відповідних даних з нього. Для навчання використовувався сервіс Google Colaboratory, більш відомий як "Colab". "Colab" – це хмарна версія Jupyter Notebook. Основною задачею препроцесінгу даних є класифікація трьох класів об'єктів на відео або у режимі реального часу – БТР, БМП, ТАНК. Далі проводилось створення та наповнення відповідного набору даних. Дані наповнювалися з відкритих джерел, зокрема з відеокліпів, розміщених у відкритих джерелах на YouTube платформі (відео з просування техніки рашки в перші дні війни по території України та з військових парадів російської техніки). Цей процес включав в себе пошук зображень та відео з вищеназваними об'єктами та розміткою відповідних об'єктів. Датасет сформований за допомогою Roboflow platform на основі засобів розмітки та в подальшому засобів аугментації. Набір даних складається з 1193 унікальних зображень – приблизно порівну для кожного класу. Після застосування попереднього опрацювання зображень та методів аргументації, набір даних має наступний вигляд (Таблиця 1):

Таблиця 1 – Розподіл даних в наборі даних

Тип набору	Абсолютне значення	Відносне значення
Train Set	2490	87%
Valid Set	225	8%
Test Set	138	5%

```
train: ../train/images  
val: ../valid/images  
test: ../test/images  
nc: 3  
names: ['bmp', 'btr', 'tank']
```

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Навчання проводилось із застосування ресурсів Google Colab. Було взято 100 епох для навчання моделі. Статистичні результати навчання нейронної мережі зображені на Рис. 1–2. Аналіз провадився за метриками mAP50 (mean Average Precision), mAP50-95, precision та recall (Рис. 1).

AP (Average precision) – це популярна метрика вимірювання точності детекторів таких об'єктів, як Faster R-CNN, SSD і т.д. Average Precision обчислює середню точність для recall в діапазоні від 0 до 1. Це показник точності моделі, що враховує лише "легкі" виявлення. mAP50-95: середнє значення середньої точності, розраховане при різних порогових значеннях IoU, що варіюються від 0,50 до 0,95. Воно дає повне уявлення про продуктивність моделі на різних рівнях складності виявлення.

Precision вимірює, наскільки точні ваші прогнози. Наприклад, який відсоток ваших прогнозів коректний. Recall вимірює, наскільки добре ви знаходите усі позитивні зразки. Наприклад, ми можемо знаходити 75% від усіх можливих позитивних випадків у наших кращих прогнозах. Як ми можемо бачити з рис. 1, метрика Precision дає більший коливання на початку та стає більш схожим на mAP50 наприкінці, коли кількість випробувань збільшується. mAP50-95 має погані значення (0,5–0,6) наприкінці, коли кількість проб збільшується. Метрика Recall має відносно сталі значення в межах 0,85–0,75 після половини проведених дослідів (епох). Це не є досить добрим результатом та потребує подальшого дослідження та навчання моделі на більшому датасеті актуальних даних. Метрика Precision дає трохи кращі результати – в межах 0,85–0,89.

## Metrics

Model accuracy measured on validation set

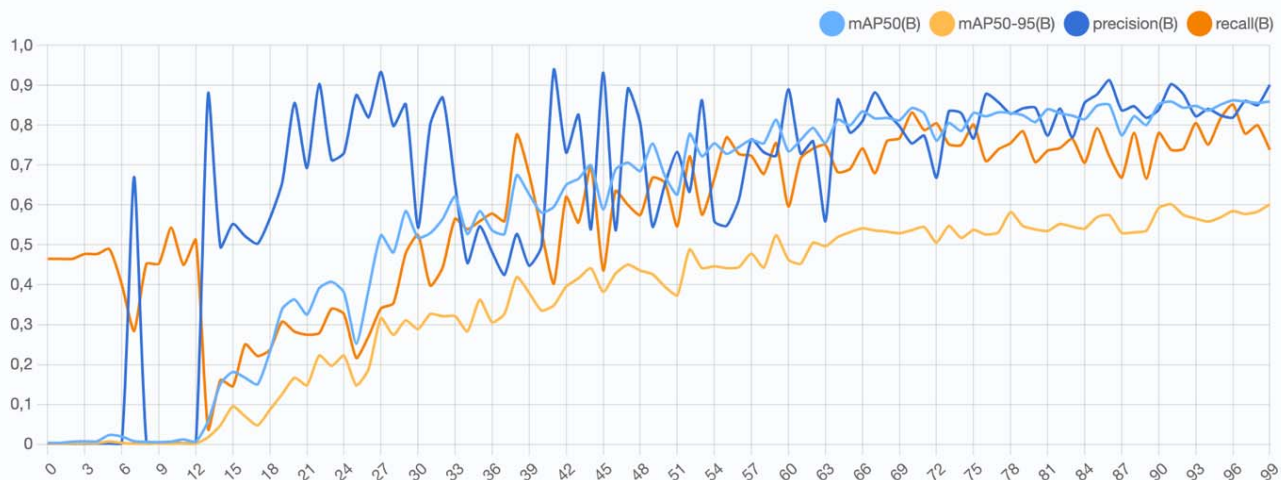


Рисунок 1 – Графік точності моделі

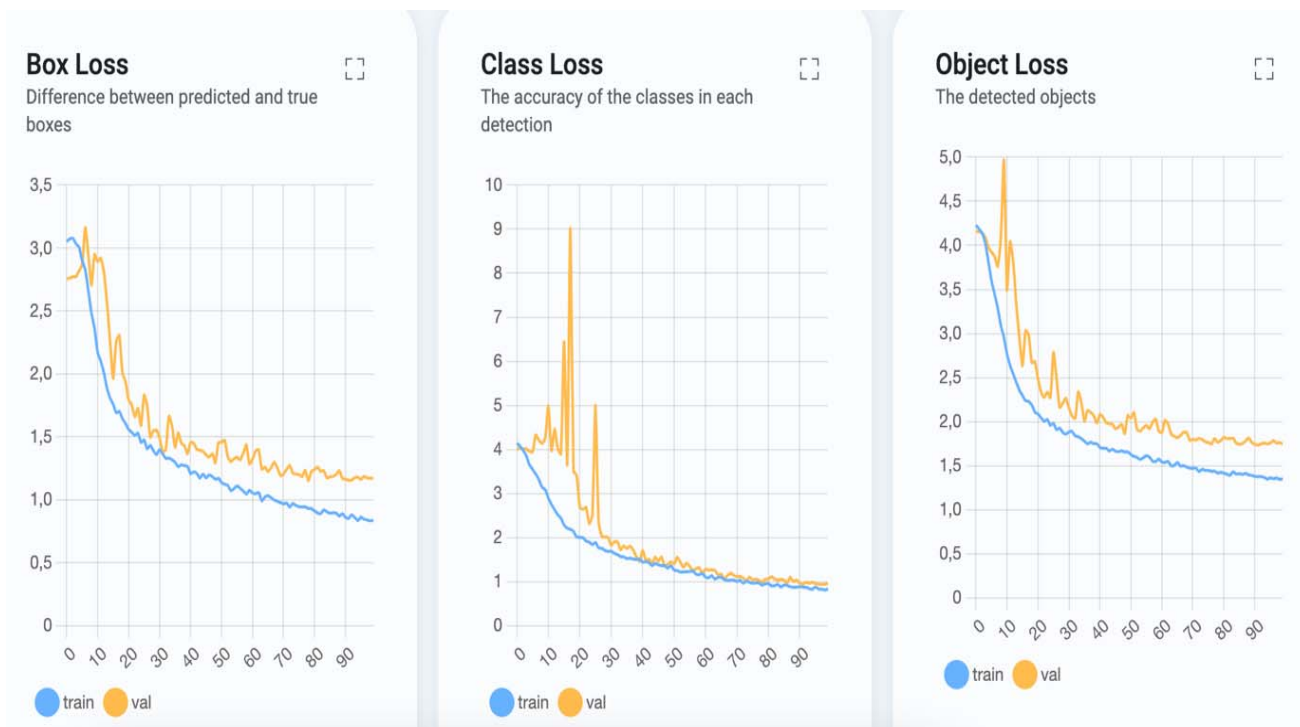


Рисунок 2 – Графіки втрат моделі

На рисунках 3–5 зображені приклади роботи системи. Великі втрати є через те, що під час дослідження не було враховано фон – навчання модуля на основі підтверджених даних (зображень)

фону без техніки. Це буде наступний крок. Також необхідно розширити класифікацію для об'єктів військової техніки – що саме Т-64, Е-72 чи Т-90.



Рисунок 3 – Приклад розпізнавання об'єкту класу БМП



Рисунок 4 – Приклад розпізнавання об'єкту класу ТАНК





Рисунок 5 – Приклад розпізнавання об'єкту класу БМП

Великі втрати присутні із-за того, що в дослідженні не враховується фон – навчання модуля на з врахування валідованих даних (зображень) фону без техніки. Це буде наступним кроком. Також необхідно розширити класифікацію для об'єктів військової техніки – який саме так Т-64, Е-72 чи Т-90.

### ВИСНОВКИ

Вирішено актуальне завдання в моделюванні процесів аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання. Розпізнавання цілей є пріоритетом у військовій справі. Це завдання ускладнюється тим, що треба розпізнавати рухомі об'єкти, різний рельєф і ландшафт створюють перешкоди для розпізнавання. Бойові дії відбуваються в різний час доби, відповідно, необхідно враховувати ракурс освітлення та загальне освітлення. Необхідно виявити об'єкт на відео шляхом сегментації відеокадрів, розпізнати та класифікувати його.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше запропоновано метод розпізнавання на класифікації для об'єктів військової техніки – який саме так Т-64, Е-72 чи Т-90.

Практична цінність полягає у тому, що вона є структурною складовою процесу аналізу відеопотоку для автоматичного розпізнавання цілей системи керування вогнем на основі машинного навчання.

В результаті проведених експериментів реалізовано та проаналізовано функціонування пайплайн із збору та опрацювання зображень відеоконтенту для автоматичного розпізнавання цілей

системи керування вогнем на основі машинного навчання.

Тренінг проводився з використанням ресурсів Google Colab. На навчання моделі пішло 100 епох. Аналіз проводився відповідно до mAP50 (середня точність), mAP50-95, точності та показників запам'ятовування. Запропонований спосіб може бути використаний для ідентифікації об'єктів військового характеру та розпізнавання цілей для створення (модернізації) сучасних систем управління вогнем сучасної військової техніки. метрика

Precision дає більший коливання на початку та стає більш схожим на mAP50 наприкінці, коли кількість випробувань збільшується. mAP50-95 має погані значення (0,5–0,6) наприкінці, коли кількість проб збільшується.

Метрика Recall має відносно стає значення в межах 0,85–0,75 після половини проведених дослідів (epoch). Це не є досить добрим результатом та потребує подальшого дослідження та навчання моделі на більшому датасеті актуальних даних.

Метрика Precision дає трохи кращі результати – в межах 0,85–0,89. Великі втрати є через те, що під час дослідження не було враховано фон – навчання модуля на основі підтверджених даних (зображень) фону без техніки. Це буде наступний крок. Також необхідно розширити класифікацію для об'єктів військової техніки – що саме Т-64, Е-72 чи Т-90.

Тому перспективи подальших досліджень полягають в дослідженні відопотоку з врахуванням навчання моделі на фонових зображень території України з відповідними природними ландшафтами.

## ПОДЯКИ

Дослідження виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України за проектом № 0124U000925 «Методи та засоби ідентифікації бойових машин на основі технологій глибинного навчання для автоматизованого керування цілерозподілом».

## ЛІТЕРАТУРА

1. An improved deep learning method for flying object detection and recognition / [S. S. Aote, N. Wankhade, A. Pardhi et al.] // *Signal, Image and Video Processing*. – 2023. – Vol. 18(1). – P. 143–152. DOI: 10.1007/s11760-023-02703-y.
2. Zhang Z. Drone-YOLO: An Efficient Neural Network Method for Target Detection in Drone Images / Z. Zhang // *Drones*. – 2023. – Vol. 7 (2023). – Art. 526. DOI:10.3390/drones7080526.
3. Mask R-CNN / [K. He, G. Gkioxari, P. Dollár, R. Girshick] // *Computer Vision : the IEEE International Conference, Venice, Italy, 22–29 October 2017 : proceedings*. – Venice: IEEE, 2017. – P. 2961–2969. – Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_ICCV\\_2017/papers/He\\_Mask\\_R-CNN\\_ICCV\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017/papers/He_Mask_R-CNN_ICCV_2017_paper.pdf).
4. Pyramid scene parsing network / [H. Zhao, J. Shi, X. Qi et al.] // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. – Honolulu: IEEE, 2017. – P. 2881–2890. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Zhao\\_Pyramid\\_Scene\\_Parsing\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Zhao_Pyramid_Scene_Parsing_CVPR_2017_paper.pdf).
5. Ronneberger O. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation / O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2015. – Vol. 9351. – P. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28.
6. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks / [S. Ren, K. He, R. Girshick, J. Sun] // *Advances in neural information processing systems*. – 2015. – Vol. 28. – P. 1–9. Access mode: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf).
7. Girshick R. Fast R-CNN / R. Girshick // *Computer Vision : the IEEE International Conference, Santiago, Chile, 7–13 December 2015 : proceedings*. – Chile: IEEE, 2015. – P. 1440–1448. – Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_iccv\\_2015/papers/Girshick\\_Fast\\_R-CNN\\_ICCV\\_2015\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_iccv_2015/papers/Girshick_Fast_R-CNN_ICCV_2015_paper.pdf).
8. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation / [R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, J. Malik] // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Columbus, OH, USA, 23–28 June 2014 : proceedings*. – Columbus: IEEE, 2014. – P. 580–587. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2014/papers/Girshick\\_Rich\\_Feature\\_Hierarchies\\_2014\\_CVPR\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2014/papers/Girshick_Rich_Feature_Hierarchies_2014_CVPR_paper.pdf).
9. Densely connected convolutional networks / [G. Huang, Z. Liu, L. Van Der Maaten, K. Q. Weinberger] // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. – Honolulu: IEEE, 2017. – P. 4700–4708. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Huang\\_Densely\\_Connected\\_Convolutional\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Huang_Densely_Connected_Convolutional_CVPR_2017_paper.pdf).
10. Deep residual learning for image recognition / [K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun] // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016 : proceedings*. – Las Vegas: IEEE, 2016. – P. 770–778. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/papers/He\\_Deep\\_Residual\\_Learning\\_CVPR\\_2016\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/papers/He_Deep_Residual_Learning_CVPR_2016_paper.pdf).
11. Simonyan K. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition / K. Simonyan, A. Zisserman // *arXiv*. –

Access mode: <https://arxiv.org/abs/1409.1556>. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.

12. Microsoft COCO: Common Objects in Context / [T. Lin, M. Maire, S. J. Belongie et al.] // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2014. – Vol. 8693. – P. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1\_48.
13. The PASCAL Visual Object Classes Challenge Results / [M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams et al.] // *Pascal-Network.org*. – Access mode: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2012/workshop/index.html>.
14. The PASCAL Visual Object Classes Challenge Results / [M. Everingham, L. Van Gool, C. K. I. Williams et al.] // *Pascal-Network.org*. – Access mode: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/workshop/index.html>.
15. Jocher G. YOLO by Ultralytics / G. Jocher, A. Chaurasia, J. Qiu // *GitHub*. – Access mode: <https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/CITATION.cff>.
16. Wang C. Y. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors / C. Y. Wang, A. Bochkovskiy, H. Y. M. Liao // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE/CVF Conference, Vancouver, BC, Canada, 18–22 June 2023 : proceedings*. – Vancouver: IEEE, 2023. – P. 7464–7475. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023/papers/Wang\\_YOLOv7\\_Trainable\\_Bag-of-Freebies\\_Sets\\_New\\_State-of-the-Art\\_for\\_Real-Time\\_Object\\_Detectors\\_CVPR\\_2023\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023/papers/Wang_YOLOv7_Trainable_Bag-of-Freebies_Sets_New_State-of-the-Art_for_Real-Time_Object_Detectors_CVPR_2023_paper.pdf).
17. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications / [C. Li, L. Li, H. Jiang et al.] // *arXiv*. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2209.02976>. DOI: 10.48550/arXiv.2209.02976.
18. Yolox: Exceeding yolo series in 2021 / [Z. Ge, S. Liu, F. Wang et al.] // *arXiv*. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2107.08430>. DOI: 10.48550/arXiv.2107.08430.
19. Ultralytics/Yolov5: V6.0 – YOLOv5n 'Nano' Models, Roboflow Integration, TensorFlow Export, OpenCV DNN Support / [G. Jocher, A. Stoken, A. Chaurasia et al.] // *Zenodo*. – 2021. – Access mode: <https://zenodo.org/record/5563715>, <https://github.com/ultralytics/yolov5/releases>.
20. Bochkovskiy A. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection / A. Bochkovskiy, C. Y. Wang, H. Y. M. Liao // *arXiv*. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>. DOI: 10.48550/arXiv.2004.10934
21. Redmon J. YOLO9000: Better, faster, stronger / J. Redmon, A. Farhadi // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. – Honolulu: IEEE, 2017. – P. 7263–7271. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Redmon\\_YOLO9000\\_Better\\_Faster\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Redmon_YOLO9000_Better_Faster_CVPR_2017_paper.pdf).
22. You only look once: Unified, real-time object detection / [J. Redmon, S. Divvala, R. Girshick, A. Farhadi] // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016 : proceedings*. – Las Vegas: IEEE, 2016. – P. 779–788. Access mode: [https://www.cv-foundation.org/openaccess/content\\_cvpr\\_2016/papers/Redmon\\_You\\_Only\\_Look\\_CVPR\\_2016\\_paper.pdf](https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/papers/Redmon_You_Only_Look_CVPR_2016_paper.pdf).
23. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN / [C. Y. Wang, H. Y. M. Liao, Y. H. Wu, P. Y. Chen, J.W. Hsieh, I.H. Yeh] // *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops: the IEEE/CVF Conference, Seattle, WA, USA, 14–19 June 2020 : proceedings*. – Seattle: IEEE, 2020. – P. 390–391. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPRW\\_2020/papers/w28/Wang\\_CSPNet\\_A\\_New\\_Backbone\\_That\\_Can\\_Enhance\\_Learning\\_Capability\\_of\\_CVPRW\\_2020\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2020/papers/w28/Wang_CSPNet_A_New_Backbone_That_Can_Enhance_Learning_Capability_of_CVPRW_2020_paper.pdf).
24. Detection in crowded scenes: One proposal, multiple predictions / [X. Chu, A. Zheng, X. Zhang, J. Sun] // *Computer*

- Vision and Pattern Recognition : the IEEE/CVF Conference, Seattle, WA, USA, 14–19 June 2020 : proceedings. – Seattle: IEEE, 2020. – P. 12214–12223. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPR\\_2020/papers/Chu\\_Detection\\_in\\_Crowded\\_Scenes\\_One\\_Proposal\\_Multiple\\_Predictions\\_CVPR\\_2020\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/papers/Chu_Detection_in_Crowded_Scenes_One_Proposal_Multiple_Predictions_CVPR_2020_paper.pdf)
25. Path aggregation network for instance segmentation / [S. Liu, L. Qi, H. Qin et al.] // Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Salt Lake City, UT, USA, 18–23 June 2018 : proceedings. – Salt Lake City: IEEE, 2018. – P. 8759–8768. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2018/papers/Liu\\_Path\\_Aggregation\\_Network\\_CVPR\\_2018\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/papers/Liu_Path_Aggregation_Network_CVPR_2018_paper.pdf)
26. Glorot X. Deep sparse rectifier neural networks / X. Glorot, A. Bordes, Y. Bengi // Artificial Intelligence and Statistics (Proceedings of Machine Learning Research): the Fourteenth International Conference, Ft. Lauderdale, FL, USA, 11–13 April 2011 : proceedings. – Ft. Lauderdale: MLResearchPress, 2011. – P. 313–326. Access mode: <https://proceedings.mlr.press/v15/glorot11a/glorot11a.pdf>
27. Elyzing S. Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning / S. Elyzing, E. Uchibe, K. Doya // Neural Netw. – 2018. – Vol. 107 (2018). – P. 3–11. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.012.
- Accepted 30.06.2024.  
Received 29.08.2024.

UDC 004.9

## INTELLIGENT VIDEO ANALYSIS TECHNOLOGY FOR AUTOMATIC FIRE CONTROL TARGET RECOGNITION BASED ON MACHINE LEARNING

**Vysotska V.** – PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

**Romanchuk R.** – Post-graduate student of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** Target recognition is a priority in military affairs. This task is complicated by the fact that it is necessary to recognize moving objects, different terrain and landscape create obstacles for recognition. Combat actions can take place at different times of the day, accordingly, it is necessary to take into account the perspective of lighting and general lighting. It is necessary to detect the object in the video by segmenting the video frames, recognize and classify.

**Objective** of the study is to develop a technology for the analysis of the development of a technology for recognizing targets in real time as a component of the fire control system, due to the use of artificial intelligence, YOLO and machine learning.

**Method.** The article develops a video stream analysis technology for automatic target recognition of the fire control system based on machine learning. The paper proposes the development of a target recognition module as a component of the fire control system within the framework of the proposed information technology using artificial intelligence. The YOLOv8 pattern recognition model family was used to develop the target recognition module. The methods used during the study of the formed dataset.

- Bounding Box: Noise – Up to 15% of pixels (limiting frame: adding salt and pepper noise to the image – up to 15% of pixels).
- Bounding Box: Blur – Up to 2.5px (bounding box: adding Gaussian blur to the image – up to 2.5 pixels).
- Cutout – 3 boxes with 10% size each (cut out a part of the image – 3 boxes of 10% size each).
- Brightness Between –25% and +25% (changing the brightness of the image to increase the resistance of the model to changes in lighting and camera settings – from –25% to +25%).
- Rotation – Between –15° and +15° (rotation of the image object – clockwise or counterclockwise by degrees from –15° to +15°).
- Flip – Horizontal (flip the image object horizontally).

**Results.** The data is collected from open sources, in particular, from videos posted in open sources on the YouTube platform. The main task of data preprocessing is the classification of three classes of objects on video or in real time – APC, BMP and TANK. The dataset is formed using the Roboflow platform based on the labeling tools and subsequently the augmentation tools. The dataset consists of 1193 unique images – approximately equally for each class. The training was conducted using Google Colab resources. It took 100 epochs to train the model.

**Conclusions.** Analysis is performed according to mAP50 (average precision as 0.85), mAP50-95 (0.6), precision (0.89) and recall (0.75). Big losses are due to the fact that the background was not taken into account during the research – training the module on the basis of confirmed data (images) of the background without technology

**KEYWORDS:** moving object recognition, security, privacy, YOLO, target identification, machine learning, APC, BMP, TANK.

### REFERENCES

1. Aote S. S., Wankhade N., Pardhi A., Misra N., Agrawal H., Potnurwar A. An improved deep learning method for flying object detection and recognition, *Signal, Image and Video Processing*, 2023, Vol. 18(1), pp. 143–152. DOI:10.1007/s11760-023-02703-y.
2. Zhang Z. Drone-YOLO: An Efficient Neural Network Method for Target Detection in Drone Images, *Drones*, 2023, Vol. 7 (2023), Art. 526. DOI:10.3390/drones7080526.
3. He K., Gkioxari G., Dollár P., Girshick R. Mask R-CNN, *Computer Vision : the IEEE International Conference, Venice, Italy, 22–29 October 2017 : proceedings*. Venice, IEEE, 2017, pp. 2961–2969. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_ICCV\\_2017/papers/He\\_Mask\\_R-CNN\\_ICCV\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_ICCV_2017/papers/He_Mask_R-CNN_ICCV_2017_paper.pdf).
4. Zhao H., Shi J., Qi X., Wang X., Jia J. Pyramid scene parsing network, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. Honolulu, IEEE, 2017, pp. 2881–2890. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Zhao\\_Pyramid\\_Scene\\_Parsing\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Zhao_Pyramid_Scene_Parsing_CVPR_2017_paper.pdf).
5. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, *Lecture Notes in Computer Science*, 2015, Vol. 9351, pp. 234–241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28.



6. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks, *Advances in neural information processing systems*, 2015, Vol. 28, pp. 1–9. Access mode: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2015/file/14bfa6bb14875e45bba028a21ed38046-Paper.pdf).
7. Girshick R. Fast R-CNN, *Computer Vision : the IEEE International Conference, Santiago, Chile, 7–13 December 2015 : proceedings*. Chile, IEEE, 2015, pp. 1440–1448. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_iccv\\_2015/papers/Girshick\\_Fast\\_R-CNN\\_ICCV\\_2015\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_iccv_2015/papers/Girshick_Fast_R-CNN_ICCV_2015_paper.pdf).
8. Girshick R., Donahue J., Darrell, T. Malik J. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Columbus, OH, USA, 23–28 June 2014 : proceedings*. Columbus, IEEE, 2014, pp. 580–587. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2014/papers/Girshick\\_Rich\\_Feature\\_Hierarchies\\_2014\\_CVPR\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2014/papers/Girshick_Rich_Feature_Hierarchies_2014_CVPR_paper.pdf).
9. Huang G., Liu Z., Van Der Maaten L., Weinberger K. Q. Densely connected convolutional networks, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. Honolulu, IEEE, 2017, pp. 4700–4708. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Huang\\_Densely\\_Connected\\_Convolutional\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Huang_Densely_Connected_Convolutional_CVPR_2017_paper.pdf).
10. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016 : proceedings*. Las Vegas: IEEE, 2016, pp. 770–778. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2016/papers/He\\_Deep\\_Residual\\_Learning\\_CVPR\\_2016\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2016/papers/He_Deep_Residual_Learning_CVPR_2016_paper.pdf).
11. Simonyan K., Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *arXiv*. Access mode: <https://arxiv.org/abs/1409.1556>. DOI: 10.48550/arXiv.1409.1556.
12. Lin T., Maire M., Belongie S. J., Bourdev L. D., Girshick R. B., Hays J., Perona P., Ramanan D., Doll'ar P., Zitnick C. L. Microsoft COCO: Common Objects in Context, *Lecture Notes in Computer Science*, 2014, Vol. 8693, pp. 740–755. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1\_48.
13. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes Challenge Results, *Pascal-Network.org*. Access mode: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2012/workshop/index.html>.
14. Everingham M., Van Gool L., Williams C. K. I., Winn J., Zisserman A. The PASCAL Visual Object Classes Challenge Results, *Pascal-Network.org*. Access mode: <http://www.pascal-network.org/challenges/VOC/voc2007/workshop/index.html>.
15. Jocher G., Chaurasia A., Qiu J. YOLO by Ultralytics, *GitHub*. Access mode: <https://github.com/ultralytics/ultralytics/blob/main/CITATION.cff>.
16. Wang C. Y., Bochkovskiy A., Liao H. Y. M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE/CVF Conference, Vancouver, BC, Canada, 18–22 June 2023 : proceedings*. Vancouver: IEEE, 2023, pp. 7464–7475. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023/papers/Wang\\_YOLOv7\\_Trainable\\_Bag-of-Freebies\\_Sets\\_New\\_State-of-the-Art\\_for\\_Real-Time\\_Object\\_Detectors\\_CVPR\\_2023\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content/CVPR2023/papers/Wang_YOLOv7_Trainable_Bag-of-Freebies_Sets_New_State-of-the-Art_for_Real-Time_Object_Detectors_CVPR_2023_paper.pdf).
17. Li C., Li L., Jiang H., Weng K., Geng Y., Li L., Ke Z., Li Q., Cheng M., Nie W., Li Y., Zhang B., Liang Y., Zhou L., Xu X., Chu X., Wei X., Wei X. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications, *arXiv*. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2209.02976>. DOI: 10.48550/arXiv.2209.02976.
18. Ge Z., Liu S., Wang F., Li Z., Sun J. Yolox: Exceeding yolo series in 2021, *arXiv*. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/2107.08430>. DOI: 10.48550/arXiv.2107.08430.
19. Jocher G., Stoken A., Chaurasia A., Borovec J., NanoCode012, TaoXie, Kwon Y., Michael K., Changyu L., Fang J., Abhiram V., Laughing, Tkianai, yxNONG, Skalski P., Hogan A., Nadar J., Imyhxy, Mammana L., Wang Alex, Fati C., Montes D., Hajek J., Diaconu L., Minh M. T., Marc, Albinxavi, Fatih, Oleg, Wanghaoyang Ultralytics/Yolov5: V6.0 – YOLOv5n 'Nano' Models, Roboflow Integration, TensorFlow Export, OpenCV DNN Support, *Zenodo*, 2021. Access mode: <https://zenodo.org/record/5563715>, <https://github.com/ultralytics/yolov5/releases>.
20. Bochkovskiy A., Wang C. Y., Liao H. Y. M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection, *arXiv*. Access mode: <https://arxiv.org/abs/2004.10934>. DOI: 10.48550/arXiv.2004.10934
21. Redmon J., Farhadi A. YOLO9000: Better, faster, stronger, // *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017 : proceedings*. Honolulu, IEEE, 2017, pp. 7263–7271. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Redmon\\_YOLO9000\\_Better\\_Faster\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Redmon_YOLO9000_Better_Faster_CVPR_2017_paper.pdf).
22. Redmon J., Divvala S., Girshick R., Farhadi A. You only look once: Unified, real-time object detection, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016 : proceedings*. Las Vegas, IEEE, 2016, pp. 779–788. Access mode: [https://www.cv-foundation.org/openaccess/content\\_cvpr\\_2016/papers/Redmon\\_You\\_Only\\_Look\\_CVPR\\_2016\\_paper.pdf](https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/papers/Redmon_You_Only_Look_CVPR_2016_paper.pdf).
23. Wang C. Y., Liao H. Y. M., Wu Y. H., Chen P. Y., Hsieh J. W., Yeh I. H. CSPNet: A new backbone that can enhance learning capability of CNN, *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops: the IEEE/CVF Conference, Seattle, WA, USA, 14–19 June 2020 : proceedings*. Seattle, IEEE, 2020, pp. 390–391. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPRW\\_2020/papers/w28/Wang\\_CSPNet\\_A\\_New\\_Backbone\\_That\\_Can\\_Enhance\\_Learning\\_Capability\\_of\\_CVPRW\\_2020\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPRW_2020/papers/w28/Wang_CSPNet_A_New_Backbone_That_Can_Enhance_Learning_Capability_of_CVPRW_2020_paper.pdf).
24. Chu X., Zheng A., Zhang X., Sun J. Detection in crowded scenes: One proposal, multiple predictions, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE/CVF Conference, Seattle, WA, USA, 14–19 June 2020 : proceedings*. Seattle, IEEE, 2020, pp. 12214–12223. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPR\\_2020/papers/Chu\\_Detection\\_in\\_Crowded\\_Scenes\\_One\\_Proposal\\_Multiple\\_Predictions\\_CVPR\\_2020\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/papers/Chu_Detection_in_Crowded_Scenes_One_Proposal_Multiple_Predictions_CVPR_2020_paper.pdf).
25. Liu S., Qi L., Qin H., Shi J., Jia J. Path aggregation network for instance segmentation, *Computer Vision and Pattern Recognition : the IEEE Conference, Salt Lake City, UT, USA, 18–23 June 2018 : proceedings*. Salt Lake City: IEEE, 2018, pp. 8759–8768. Access mode: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2018/papers/Liu\\_Path\\_Aggregation\\_Network\\_CVPR\\_2018\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2018/papers/Liu_Path_Aggregation_Network_CVPR_2018_paper.pdf).
26. Glorot X., Bordes A., Bengi Y. Deep sparse rectifier neural networks, *Artificial Intelligence and Statistics (Proceedings of Machine Learning Research): the Fourteenth International Conference, Ft. Lauderdale, FL, USA, 11–13 April 2011 : proceedings*. Ft. Lauderdale, MLResearchPress, 2011, pp. 313–326. Access mode: <https://proceedings.mlr.press/v15/glorot11a/glorot11a.pdf>.
27. Elfving S., Uchibe E., Doya K. Sigmoid-weighted linear units for neural network function approximation in reinforcement learning, *Neural Netw.*, 2018, Vol. 107 (2018), pp. 3–11. DOI: 10.1016/j.neunet.2017.12.012.



## МОДЕЛЬ ЗВОРОТНИХ ЛАНЦЮЖКІВ МАКСИМАЛЬНИХ ВАГ ДЛЯ АНАЛІЗУ ФАКТОРІВ ВПЛИВУ ПІДТРИМКИ ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ

**Пукач А. І.** – канд. техн. наук, асистент кафедри Автоматизованих Систем Управління Інституту Комп'ютерних Наук та Інформаційних Технологій Національного Університету «Львівська Політехніка», Львів, Україна.

**Теслюк В. М.** – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри Автоматизованих Систем Управління Інституту Комп'ютерних Наук та Інформаційних Технологій Національного Університету «Львівська Політехніка», Львів, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Розглянуто задачу розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг, необхідної для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів.

Об'єктом дослідження є процес розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг.

Предметом дослідження є методи та засоби розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг.

**Метою роботи** є розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів.

**Метод.** Запропоновано розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів, що дає змогу виявити та сформулювати відповідні зворотні ланцюжки максимальних ваг для ідентифікації та подальшого аналізу факторів впливу, які впливають на результати сприйняття об'єкта – підтримуваного програмного комплексу чи процесів його підтримки, відповідними суб'єктами взаємодії, що напряму чи опосередковано взаємодіють з ним.

**Результати.** Результатами роботи розроблених моделей, відповідно, є отримані сформовані зворотні ланцюжки максимальних ваг, які в подальшому використано для розв'язання науково-прикладної задачі ідентифікації, формування та відновлення границь факторів впливу, втрачених в результаті впровадження відповідних моделей багатoshарового перцептрона в моделі суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки програмних комплексів. Розроблена модель забезпечує можливість здійснення аналізу перетворення вхідних характеристик об'єкта підтримки у вихідні результуючі характеристики його суб'єктивного сприйняття шляхом відновлення границь факторів впливу цього перетворення. Наведено результати розв'язаної прикладної практичної задачі первинного моніторингу частотного прояву заданого суб'єктивного фактора впливу в режимі постреального часу, в якості прикладу практичного застосування розробленої моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг.

**Висновки.** Розроблена модель вирішує поставлену задачу ідентифікації, формування та відновлення границь факторів впливу, втрачених в результаті впровадження відповідних моделей багатoshарового перцептрона в моделі суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки програмних комплексів. Водночас, розроблена модель покращує класичне розуміння штучних нейронних мереж типу багатoshарового перцептрона, оскільки вводить додаткове значення для нейронів прихованих шарів, які з впровадженням розроблених моделей здатні виконувати абсолютно нову функціональну роль (маркерів факторів впливу), тоді як у класичному розумінні вони не виконували жодних функцій, окрім арифметичних для забезпечення коректності навчання та функціонування штучних нейронних мереж типу багатoshарового перцептрона в ході їх експлуатації у вирішенні найрізноманітніших задач.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** програмний комплекс, підтримка, фактор впливу, автоматизація, нейронні мережі, багатoshаровий перцептрон.

### АБРЕВІАТУРИ

AAR – After Action Review (аналіз після дій);  
BSA – Brain Strom Optimization;  
DevOps – Development and Operations;  
GenCode – generic code;  
GML – Generalized Markup Language;  
HTML – HyperText Markup Language;  
NofHL – Neuron of Hidden Layer (нейрон прихованого шару);  
OL – Output Layer (вихідний шар);  
RC – Reverse Chain (зворотний ланцюжок);  
SGML – Standard Generalized Markup Language;  
XML – EXtensible Markup Language;  
ШНМ – штучні нейронні мережі;  
БП – багатoshаровий перцептрон.

### НОМЕНКЛАТУРА

$Fobj[1..p][1..q]$  – матриця розмірності  $p \times q$ , що представляє нелінійну функціональну залежність та складається із функцій перетворення вхідних характеристик об'єкта підтримки у відповідні вихідні характеристики його результуючого суб'єктивного сприйняття;

$Fobj[i][j]$  – елемент матриці функцій перетворення вхідних характеристик об'єкта підтримки у вихідні характеристики його результуючого суб'єктивного сприйняття;

$IL[1ofMaxInflToNofHL[prev][1]]$  – нейрон вхідного шару БП;

$I[i]$  –  $i$ -ий нейрон вхідного шару БП;

$Iobj[i]$  –  $i$ -ий вхідний параметр об'єкта підтримки;

*List()* – список з елементів, перелічених в дужках;

*MatrixModel* – модель зворотних ланцюжків максимальних ваг, подана у матричній формі представлення;

*Model* – модель зворотних ланцюжків максимальних ваг в математичній формі представлення;

*NofHL[IofMaxInflToOL[a]][m]* – нейрон останнього прихованого шару БП, вклад якого в активацію нейрона *OL[a]* був максимальним;

*NofHL[IofMaxInflToPrev][j]* ( $j \in [m-1;1]$ ) – перебір нейронів усіх прихованих шарів БП від передостаннього до першого (саме в такому, спадаючому, порядку), кожного разу з додаванням у ланцюжок тих нейронів, вклад яких у активацію попередньо вже доданого у ланцюжок нейрона – був максимальним;

*NofHL[j][i]* – *i*-ий нейрон *j*-ого прихованого шару БП;

*O[i]* – *i*-ий нейрон вихідного шару БП;

*OL[a]* – активний нейрон вихідного шару БП;

*Oobj[j]* – *j*-а вихідна характеристика результуючого суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки;

*Union* – об'єднання (множина).

## ВСТУП

На сьогодні продовжуємо спостерігати явище автоматизації найрізноманітніших процесів, в тому числі і процесів щодо розробки, тестування, впровадження, використання, комплексної підтримки програмних комплексів, забезпечення, засобів, систем, тощо.

Щодо теми автоматизації підтримки програмних комплексів – вона продовжує залишатися недостатньо розкритою, актуальною, комплексною, та нетривіальною науково-прикладною проблемою, що включає надзвичайно велику кількість різноманітних похідних та суміжних науково-прикладних задач, однією з яких є необхідність аналізу факторів впливу, що впливають на результати сприйняття об'єкта – підтримуваного програмного комплексу чи процесів його підтримки, відповідними суб'єктами взаємодії, що напряду чи опосередковано взаємодіють з ним (об'єктом). В свою чергу, для представлення цих факторів впливу запропонований відповідний розроблений підхід з використанням штучних нейронних мереж типу багатошарового перцептрона в моделях суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки, де приховані шари, власне, репрезентують фактори впливу. Проте, сама природа багатошарового перцептрона не передбачає наявність будь-яких функціонально-сміслових ідентичностей нейронів прихованих шарів, що призводить до втрати (розмиття) границь факторів впливу в таких моделях з інкапсульованими штучними нейронними мережами типу багатошарового перцептрона.

**Об'єктом дослідження** є процес розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг. **Предметом дослідження** є методи та засоби розроблення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг.

**Мета дослідження** полягає в розробленні моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг, що дає змогу досліджувати фактори впливу на об'єкти підтримки, в якості яких можуть виступати як безпосередньо самі підтримувані програмні комплекси, так і процеси щодо їх підтримки.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо формалізацію задачі аналізу факторів впливу на об'єкт підтримки у вигляді задачі нелінійної мультифункціональної залежності.

В такому разі вхідними змінними задачі є об'єктивні параметри досліджуваного об'єкта (або процесу) підтримки: *Iobj[i]* ( $i=[1..n]$ ), де *n* – кількість вхідних параметрів об'єкта.

Вихідними змінними задачі є вихідні характеристики результуючого сприйняття об'єкта підтримки відповідним суб'єктом взаємодії з ним: *Oobj[j]* ( $j=[1..m]$ ), де *m* – кількість вихідних характеристик результуючого сприйняття об'єкта деяким суб'єктом взаємодії з ним.

Нехай задано перелік факторів впливу, що впливають на перетворення комбінацій вхідних характеристик об'єкта підтримки у відповідні комбінації вихідних результуючих суб'єктивних характеристик представлення цього об'єкта підтримки відповідним суб'єктом взаємодії з ним:

$$Oobj[1..m]=Fobj[1..p][1..q](Iobj[1..n]), \quad (1)$$

Основним необхідним критерієм задачі є скінченність множини визначених факторів впливу, що передбачає можливість оперування в задачі лише визначеною сталою кількістю детермінованих факторів впливу.

Обмеження задачі:

1. Значення вхідних параметрів досліджуваного об'єкта підтримки *Iobj[1..n]* повинні бути поданими у вигляді дійсних чисел в нормалізованій формі представлення (тобто в діапазоні значень між 0.0 та 1.0):  $Iobj[1..n] \in [0..1]$ .

Формула (1) дає можливість інтерпретації задачі з допомогою штучної нейронної мережі типу багатошарового перцептрона, де:

– *Iobj[1..n]* – представляє вхідний шар нейронів;

– *Fobj[1..p][1..q]* – відображає нейрони прихованих шарів;

– *Oobj[1..m]* – репрезентує вихідний шар нейронів.

Проте, така інтерпретація призводить до «розмиття» границь факторів впливу, адже нейрони прихованих шарів ШНМ типу БП не несуть жодного функціонального-сміслового навантаження, а натомість призначені для коректності навчання та функціонування ШНМ БП.

Таким чином, виникає відповідна науково-прикладна задача можливості(-ей) ідентифікації відповідних факторів впливу серед нейронів прихованого шару відповідної інкапсульованої моделі багатошарового перцептрона. Саме для розв'язання цієї на-

уково-прикладної задачі і була розроблена та представлена в цій роботі модель зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів.

Метою статті є висвітлення розробленої моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів, а також відповідного розробленого алгоритму побудови цих зворотних ланцюжків максимальних ваг, що в сукупності дають змогу розв'язати науково-прикладну задачу ідентифікації, аналізу та відновлення границь факторів впливу підтримки програмних комплексів в моделях суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки з інкапсульованими ШНМ типу БП.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз досліджень та публікацій був здійснений в двох напрямках: в напрямку автоматизації програмних комплексів, а також в напрямку застосування штучного інтелекту, а саме – штучних нейронних мереж типу багатошарового перцептрона. Нижче представлена інформація по кожному з напрямків.

До прикладу, ще не так давно, згідно даних представлених у роботі [3]: лише 26% усіх тест-кейсів проектів досліджуваних компаній були покриті за допомогою автоматичного тестування. А наприклад всього лиш 10 років по тому, згідно інформації представленої в роботі [1]: 88% компаній автоматизують 50% або більше своїх тестів, що призводить до значного пришвидшення циклів тестування, на 71% більшого охоплення тестуванням і на 68% кращого виявлення проблем, а за даними журналу для розробників програмного забезпечення, за останні два роки автоматизація тестування зросла на 85%.

Окремим напрямком автоматизації є напрямок DevOps. Відповідно до даних, представлених в роботі [5] – практики DevOps зазвичай поділяються на дві категорії: практики співпраці між членами команди проекту, та процедурні практики, які здебільшого автоматизовані, зокрема у процедурних практиках весь процес активностей довкола програмного забезпечення автоматизовано від запитів на зміну вимог до вже готових змін, які розгортається на середовищах клієнтів. У відповідності з даними, представленими в роботі [9]: 80% опитуваних практиків розробки та підтримки програмного забезпечення, які брали участь у дослідженні, стверджують, що найпростіше автоматизувати саме збірки програмного забезпечення, а вже за ними йдуть етапи пакування та розгортання програмного забезпечення (51,2% і 43,9% відповідно). Крім того, питання автоматизації з використанням DevOps в напрямках кібербезпеки активно розкриваються в роботі [4].

Багатошаровий перцептрон (БП) є надзвичайно універсальним інструментом для досліджень в області штучних нейронних мереж та автоматизації, та представлений в багатьох напрямках. Зокрема, в роботі [10] комплексно описані теорія та застосування бага-

тошарового перцептрона. Робота [6] є також надзвичайно комплексною працею в напрямку обчислювального інтелекту, в тому числі і багатошарового перцептрона.

Прикладів постійного розширення сфер застосування багатошарового перцептрона є безліч, зокрема, наприклад, в роботі [2] наведене використання багатошарового перцептрона для ідентифікації типів мережевих атак, таких як зокрема, наприклад WebAttack, DoS або BruteForce. В той же час йде постійна та невинна робота багатьох як теоретиків, так і практиків, над дослідженням та покращенням характеристик і способів використання багатошарового перцептрона, зокрема, наприклад, згідно поданих даних дослідження проведеного в роботі [7]: зменшення ступеня складності штучної нейронної мережі шляхом побудови штучної нейронної мережі із проведенням та застосуванням додаткового аналізу факторів у моделі прихованого шару дає позитивний ефект, в результаті чого час побудови та навчання було скорочено на 75% від вихідної моделі зі збереженням точності класифікації. Також, в роботі [8], наприклад, запропонований розширений алгоритм оптимізації мозкового штурму (Brain Storm Optimization – BSA) для оптимізації значень ваг зв'язків та зміщень, а також для навчання моделей багатошарового перцептрона.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розпочнемо більш детальне ознайомлення з проблематикою конкретної задачі, представленої в роботі, із означення поняття моделі суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки програмних комплексів, що представляє (модель) собою модель у будь-якій існуючій чи новій довільній формі (математичній, структурній, програмній, аналітичній, концептуальній, сутнісній, тощо), проте обов'язково з визначенням:

– усіх вхідних характеристик об'єкта дослідження (підтримуваного програмного комплексу, чи процесів його підтримки);

– вихідних результуючих характеристик – результатів суб'єктивного сприйняття об'єкта відповідними суб'єктами, що з ним взаємодіють (напрямку, чи опосередковано);

– а також усіх наявних, визначених, та чітко окреслених конкретних факторів впливу, що впливають на результати суб'єктивного сприйняття об'єкта відповідними суб'єктами взаємодії з ним.

Після побудови моделі суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки програмних комплексів здійснюється інкапсуляція в цю побудовану модель – додаткової моделі штучної нейронної мережі типу багатошарового перцептрона (хоча згідно запропонованої розробленої концепції – може бути й будь-який інший тип нейронної мережі, проте в даному випадку в якості прикладу використаний саме багатошаровий перцептрон).

Проте в нашому конкретному випадку розроблений новий підхід використання моделей багатошаро-



вого перцептрона шляхом інкапсуляції їх в узагальнені моделі суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки відповідними суб'єктами взаємодії із цим об'єктом. В результаті такої інкапсуляції моделі багатшарового перцептрона – нейрони прихованих шарів набувають нового функціонального змісту, оскільки репрезентують вплив факторів впливу на результати суб'єктивного сприйняття входних характеристик досліджуваного об'єкта та поетапне перетворення їх у відповідні вихідні результати цього суб'єктивного сприйняття.

Наступним етапом є розгляд самої моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів.

Фактично, входними даними для розробленої моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів є повні (із проміжними значеннями усіх нейронів усіх прихованих шарів, а не лише нейронів входних і вихідних шарів) результати тестування навченої інкапсульованої моделі багатшарового перцептрона.

При цьому, одразу ж варто зауважити, що при постановці подальших задач, які будуть розв'язані за допомогою результатів, отриманих на виході функціонування розробленої моделі зворотних ланцюжків, кон'юнктура вимог була сформована саме таким чином, що першочергово цікавитимуть виключно дані позитивних результатів тестування відповідних навчених інкапсульованих моделей багатшарового перцептрона.

Або іншими словами – в даному конкретному випадку при розв'язанні задач, що стосуються науково-прикладної проблематики автоматизації підтримки програмних комплексів, на вхід розробленої моделі зворотних ланцюжків подаватимемо лише та виключно позитивні результати тестування відповідних навчених інкапсульованих моделей БП (де актуальний результат кожного окремого тесту відповідає очікуваному).

Проте, беручи до уваги той факт, що розроблена модель зворотних ланцюжків максимальних ваг є надзвичайно гнучким та універсальним інструментом, в глобальному розумінні представлення концепції розробленої моделі – на вхід моделі можуть поступати будь-які результати тестування моделей БП: як позитивні, так і негативні. Тобто, глобальна концепція розробленої моделі зворотних ланцюжків не передбачає обмежень в даному аспекті.

На рисунку 1 подано приклад реальної навченої моделі БП інкапсульованої в одну з реальних дослідницьких моделей суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки, отриманих в результаті суміжних досліджень в цій області.

Побудова та функціонування моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів відбувається згідно алгоритму, блок-схема якого представлена на рисунку 2.

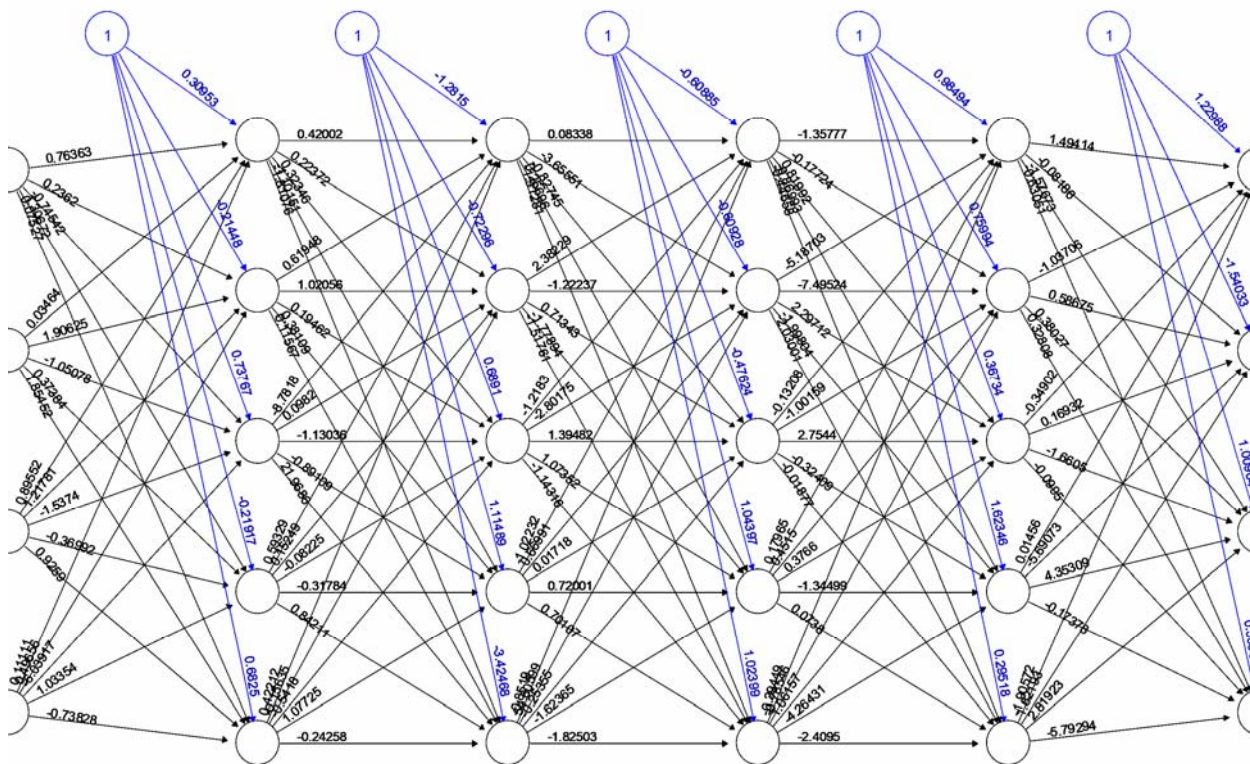


Рисунок 1 – Приклад інкапсульованої навченої моделі багатшарового перцептрона



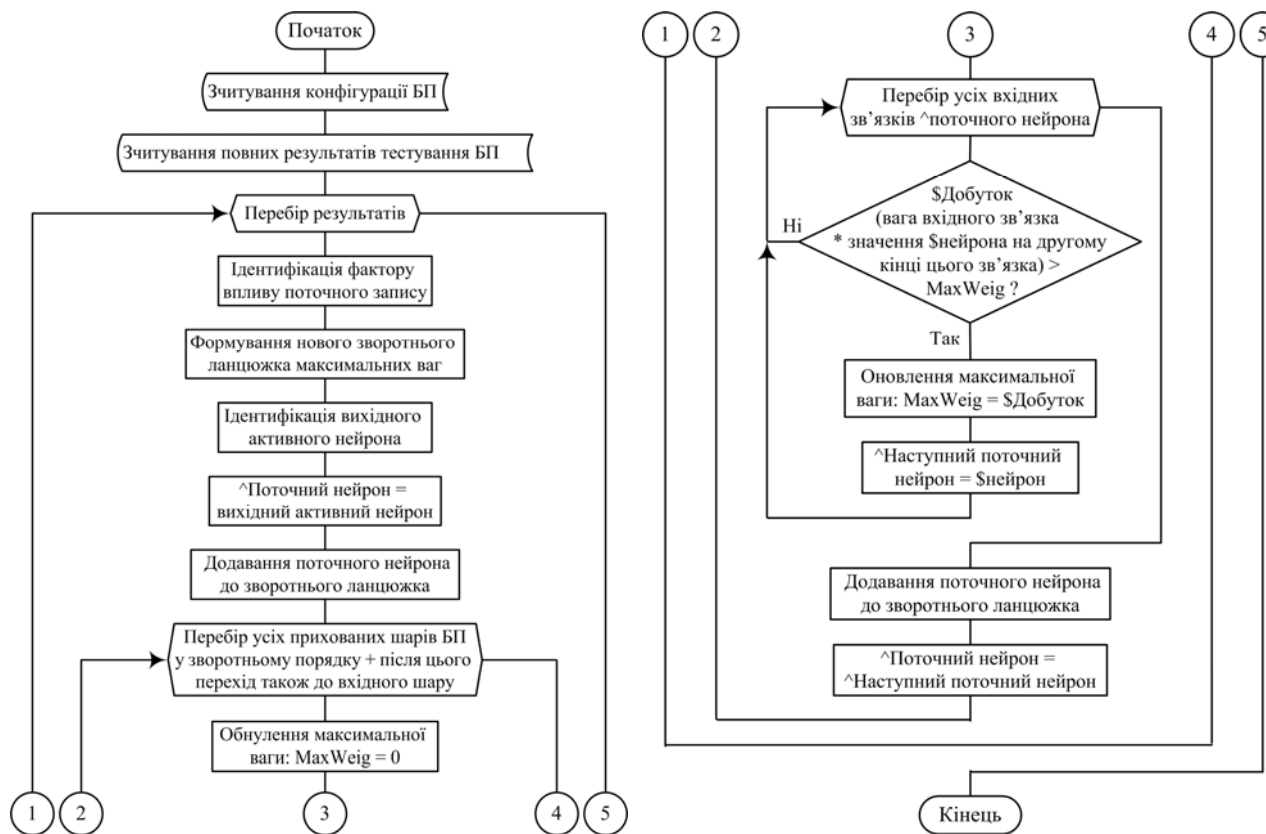


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритму побудова та функціонування моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів

Відповідно до розробленого та представленого алгоритму – побудова та функціонування моделей зворотних ланцюжків розпочинається із зчитування конфігурації конкретної досліджуваної моделі багатшарового перцептрона. Після чого відбувається зчитування повних результатів тестування досліджуваної моделі багатшарового перцептрона (у випадку коли моделювання здійснюється «оф-лайн» і немає можливості проводити моделювання синхронно з тестуванням БП), проте передбачений також варіант моделювання «он-лайн», коли побудова моделі зворотних ланцюжків здійснюється паралельно (синхронно) з тестуванням досліджуваної моделі багатшарового перцептрона (в такому випадку формуємо модель зворотних ланцюжків на основі кожного із тест-кейсів БП). Наступним кроком здійснюється перебір усіх результатів тестування БП: у випадку розв'язання задач аналізу факторів впливу – обов'язково з відповідною ідентифікацією конкретного домінуючого фактору впливу; проте в загальному випадку будь-яких інших досліджень – цей крок є необов'язковим і, фактично, неактуальним.

Наступним етапом розпочинається формування нового ланцюжка зворотнього зв'язку, яке, фактично, полягає в тому, що, починаючи із активного вихідного нейрона (на котрий наводимо вказівник «поточного нейрона») – проходимо/перебираємо усі шари БП у зворотньому порядку (від останнього прихованого

шару, через усі попередні приховані шари, аж до вхідного шару), і додаємо у формований зворотний ланцюжок максимальних ваг ті нейрони (з попереднього шару відносно «поточного нейрона»), внесок яких у активацію «поточного нейрона» був максимальним, після чого такий нейрон автоматично стає новим «поточним нейроном», і вже переходимо до опрацювання попереднього шару БП (аж доки не опрацюємо вхідний шар).

Таким чином, модель зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів являє собою набір окремих незалежних ланцюжків нейронів та зв'язків між ними, кожен з яких (ланцюжок):

- обов'язково розпочинається із вихідного активного нейрона БП;
- обов'язково містить по одному нейрону з кожного прихованого шару (в зворотньому порядку проходження цих прихованих шарів БП);
- і завершується певним вхідним нейроном БП.

Розглянемо також розроблені форми представлення моделей.

Представлення моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів не передбачає обмежень, та можливе в будь-якій зручній, доцільній, чи довільній формі представлення.

Розглянемо, для прикладу, кілька базових форм цього представлення, серед яких, зокрема, наприклад: математична; матрична; лексикографічна; та графічна.

Математична форма представлення описує модель як скінчену множину зворотних ланцюжків максимальних ваг. Розмірність цієї множини рівна величині  $n$ , де  $n$  – кількість отриманих зворотних ланцюжків. Особливістю цієї форми представлення є її лаконічність та можливість подальшої інтеграції в математичні вирази. Математична форма подана відповідною розробленою формулою нижче:

$$\begin{aligned} Model = Union ( RC [i \in [1..n]] = List ( OL[a]; \\ NofHL[IofMaxInfToOL[a]][m]; \\ NofHL[IofMaxInfToPrev][j] (j \in [m-1;1]); \\ IL[IofMaxInfToNofHL[prev][1]] ) ), \end{aligned} \quad (1)$$

де, власне, сама модель – це, фактично, множина ( $n$  одиниць) отриманих зворотних зв'язків (Reverse Chains – RC), а кожен зворотний зв'язок RC – це список із наступних складових елементів:

- $OL[a]$ ;
- $NofHL[IofMaxInfToOL[a]][m]$ ;
- $NofHL[IofMaxInfToPrev][j] (j \in [m-1;1])$ ;
- $IL[IofMaxInfToNofHL[prev][1]]$ .

Матрична форма представлення моделі має вигляд тривимірної матриці – як одновимірного масиву двовимірних матриць, кожна з яких (з цих двовимірних матриць) містить бінарне значення:

- 1 в позиції нейрона БП у випадку якщо цей нейрон входить в поточний ланцюжок;
- або 0 – якщо цей нейрон не включений до поточного ланцюжка.

Нижче, в якості прикладу, наведена матрична форма представлення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг, отриманої в результаті одного з численних експериментальних досліджень, з набором кількох зворотних ланцюжків (для компактності відображення).

$$\begin{aligned} MatrixModel = [ [ 1 0 0 1 0 1 \\ 0 0 0 1 0 \\ 0 1 0 0 0 0 \\ 0 0 1 0 0 0 \\ - 0 0 0 0 - ] \\ [ 0 0 0 0 0 0 \\ 1 0 1 0 1 1 \\ 0 0 0 0 0 0 \\ 0 1 0 0 0 0 \\ - 0 0 1 0 - ] \\ [ 0 0 0 0 0 0 \\ 1 0 0 0 0 0 \\ 0 0 0 1 0 1 \\ 0 1 0 0 1 0 \\ - 0 1 0 0 - ] \\ [ 0 0 0 0 0 0 \\ 0 1 0 0 0 0 \\ 1 0 0 1 0 0 \\ 0 0 0 1 1 \end{aligned} \quad (3)$$

– 0 1 0 0 – ] ],

Особливістю розробленої матричної форми представлення моделей є забезпечення максимальної швидкості опрацювання даних за допомогою низькорівневих (в тому числі – апаратних) комп'ютерних методів опрацювання, адже ця форма представлення є класичною дво-бітною формою представлення інформації, тобто являється максимально наближеною до низькорівневої апаратної форми представлення інформації.

Крім того, така форма представлення розроблених моделей забезпечує можливість максимального стиснення (архівації) інформації у випадку необхідності опрацювання значних об'ємів інформації.

Ще однією розробленою формою представлення моделі є лексикографічна форма, що має вигляд набору лексикографічних інтерпретацій побудованих зворотних ланцюжків максимальних ваг.

Нижче поданий приклад лексикографічної форми представлення конкретної моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг, розробленої в ході аналізу одного з наборів досліджуваних факторів впливу (до слова, це той же дослідний кейс, що був наведений вище на рисунку 1).

$$\begin{aligned} O[0] <- NofHL[3][1] <- NofHL[2][0] <- \\ NofHL[1][3] <- NofHL[0][2] <- I[0] \\ O[1] <- NofHL[3][1] <- NofHL[2][4] <- \\ NofHL[1][1] <- NofHL[0][3] <- I[1] \\ O[2] <- NofHL[3][3] <- NofHL[2][2] <- \\ NofHL[1][4] <- NofHL[0][3] <- I[1] \\ O[3] <- NofHL[3][3] <- NofHL[2][2] <- \\ NofHL[1][4] <- NofHL[0][1] <- I[2] , \end{aligned} \quad (4)$$

Особливістю розробленої та репрезентованої лексикографічної форми представлення моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг є:

- як забезпечення можливості представлення даних за допомогою різноманітних популярних форматів та мов розміток (зокрема, наприклад, таких як: GenCode, TeX, Scribe, GML та SGML, HTML, XML чи будь-яких інших);

– так і подальша можливість опрацювання даних в цій формі представлення відповідними існуючими методами, алгоритмами, засобами чи інструментами опрацювання лексикографічної чи лексичної інформації.

Наступною формою представлення моделі є графічна форма, що відображає модель за допомогою будь-якої (довільної) графічної візуалізації.

Нижче, на рисунку 3, зображений приклад графічної форми представлення все тієї ж експериментальної моделі, яку розглядали і в попередніх формах представлення, а також вище на рисунку 1.

Особливістю запропонованої графічної форми представлення моделі є, насамперед, зручність її візуального сприйняття людиною (проектантом, користувачем, тощо).

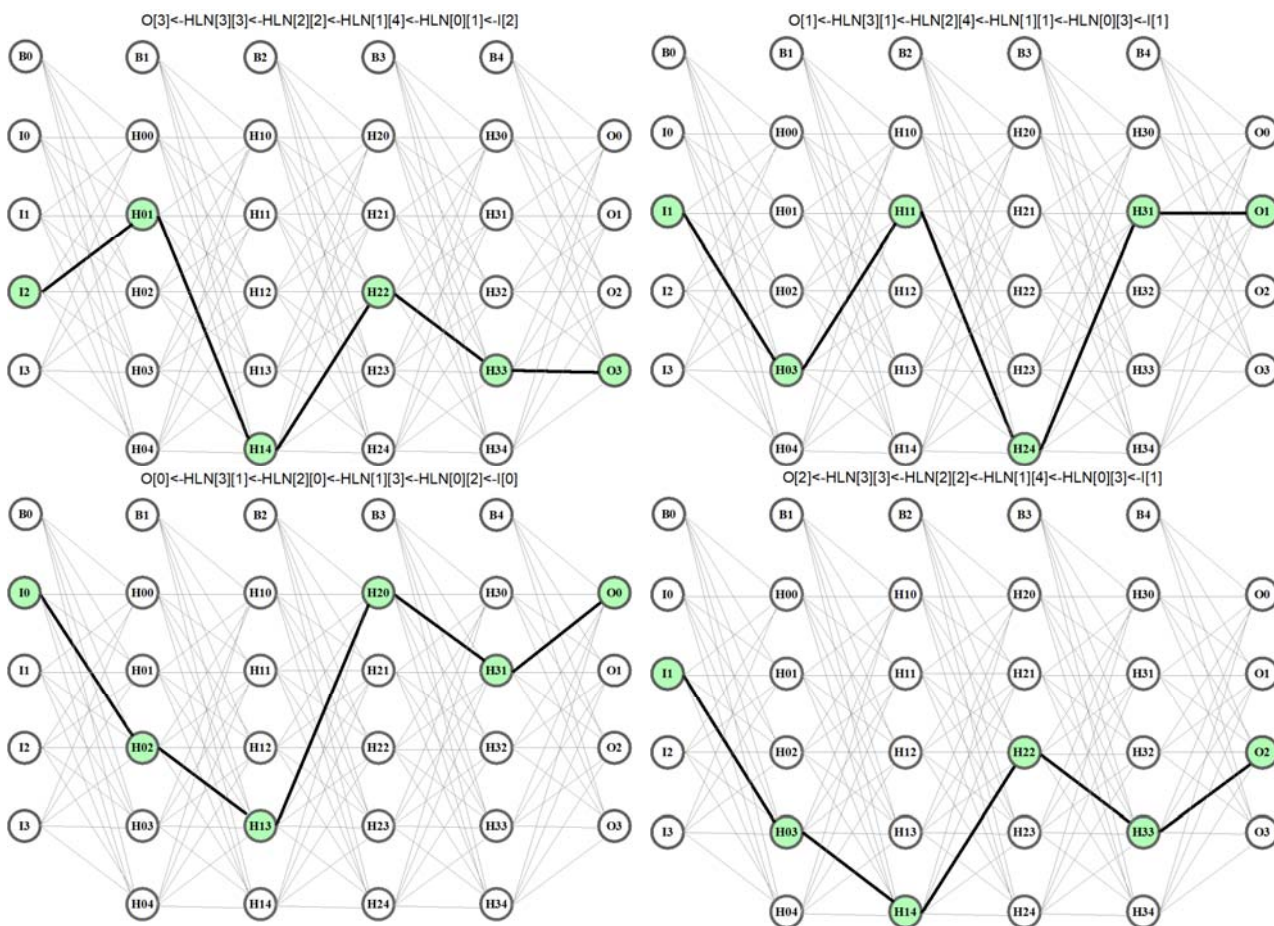


Рисунок 3 – Приклад графічної форми представлення моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експеримент полягає у покроковому виконанні всіх етапів описаних в роботі, а саме: виборі досліджуваного об'єкта, суб'єкта взаємодії, затвердженні вхідних характеристик об'єкта, визначених факторів впливу, та вихідних результатів суб'єктивного сприйняття об'єкта, побудові моделі суб'єктивного сприйняття, побудові та інкапсуляції відповідної ШНМ БП, підготовці дата-сетів для навчання та тестування цієї ШНМ БП, побудові зворотних ланцюжків максимальних ваг для кожного з визначених факторів впливу, а також фінальному тестуванні моделі з метою ідентифікації досліджуваного(-них) фактору(-ів) впливу, та представленні отриманих результатів ідентифікації в довільній формі.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Як вже було згадано в анотації до цієї роботи – основними результатами роботи розроблених моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів є, відповідно, сформовані зворотні ланцюжки максимальних ваг штучних нейронних мереж типу багатошарового перцептрона інкапсульованих в моделі

суб'єктивного сприйняття підтримуваних програмних комплексів.

Варто зауважити, що в цій роботі паралельно з викладенням теоретичного матеріалу, також вже були частково представлені деякі відповідні практичні результати, отримані в ході моделювання експериментальних досліджень. Відповідно, на конкретному прикладі одного з таких досліджень була отримана, в тому числі, реальна навчена інкапсульована штучна нейронна мережа типу багатошарового перцептрона, представлена на рисунку 1. Далі, на основі тестувань цієї навченої БП на відповідній вибірці даних – були отримані результати тестувань БП. А вже, в свою чергу, на основі цих результатів та за допомогою представленого алгоритму побудова та функціонування моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів – була отримана відповідна модель, лексикографічна форма представлення якої подана нижче у таблиці 1. Модель відображає всі унікальні зворотні ланцюжки максимальних ваг, отримані в ході аналізу розглянутого конкретного прикладу експериментального дослідження та на основі даних тестування навченої інкапсульованої БП, що була подана на рисунку 1.



Таблиця 1 – Отримані унікальні зворотні ланцюжки максимальних ваг

Унікальний зворотний ланцюжок в лексикографічній формі представлення
<i>NofHL</i> [3][0]<- <i>NofHL</i> [2][1]<- <i>NofHL</i> [1][1]<- <i>NofHL</i> [0][1]
<i>NofHL</i> [3][0]<- <i>NofHL</i> [2][1]<- <i>NofHL</i> [1][1]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][1]<- <i>NofHL</i> [2][0]<- <i>NofHL</i> [1][3]<- <i>NofHL</i> [0][2]
<i>NofHL</i> [3][1]<- <i>NofHL</i> [2][1]<- <i>NofHL</i> [1][1]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][1]<- <i>NofHL</i> [2][4]<- <i>NofHL</i> [1][1]<- <i>NofHL</i> [0][1]
<i>NofHL</i> [3][1]<- <i>NofHL</i> [2][4]<- <i>NofHL</i> [1][1]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][1]<- <i>NofHL</i> [2][4]<- <i>NofHL</i> [1][4]<- <i>NofHL</i> [0][1]
<i>NofHL</i> [3][2]<- <i>NofHL</i> [2][0]<- <i>NofHL</i> [1][0]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][2]<- <i>NofHL</i> [2][2]<- <i>NofHL</i> [1][4]<- <i>NofHL</i> [0][1]
<i>NofHL</i> [3][2]<- <i>NofHL</i> [2][2]<- <i>NofHL</i> [1][4]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][3]<- <i>NofHL</i> [2][0]<- <i>NofHL</i> [1][0]<- <i>NofHL</i> [0][3]
<i>NofHL</i> [3][3]<- <i>NofHL</i> [2][2]<- <i>NofHL</i> [1][4]<- <i>NofHL</i> [0][1]
<i>NofHL</i> [3][3]<- <i>NofHL</i> [2][2]<- <i>NofHL</i> [1][4]<- <i>NofHL</i> [0][3]

Кожен з отриманих унікальних зворотних ланцюжків належить до одного або більше факторів впливу. Зокрема:

1) фактор впливу 1 включає ланцюжки:

*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][0]<-*NofHL*[1][3]<-*NofHL*[0][2]  
*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][1]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][3]  
*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][4]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][1]

2) фактор впливу 2 містить ланцюжки:

*NofHL*[3][0]<-*NofHL*[2][1]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][1]  
*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][4]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][3]  
*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][4]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][1]  
*NofHL*[3][0]<-*NofHL*[2][1]<-*NofHL*[1][1]<-*NofHL*[0][3]

3) фактор впливу 3 охоплює ланцюжки:

*NofHL*[3][3]<-*NofHL*[2][0]<-*NofHL*[1][0]<-*NofHL*[0][3]

*NofHL*[3][3]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][3]

*NofHL*[3][2]<-*NofHL*[2][0]<-*NofHL*[1][0]<-*NofHL*[0][3]

*NofHL*[3][3]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][1]

*NofHL*[3][2]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][1]

*NofHL*[3][2]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][3]

4) фактор впливу 4 передбачає ланцюжки:

*NofHL*[3][3]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][1]

*NofHL*[3][3]<-*NofHL*[2][2]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][3]

*NofHL*[3][1]<-*NofHL*[2][4]<-*NofHL*[1][4]<-*NofHL*[0][1]

Нижче на рисунку подана візуалізація відновлених границь факторів впливу на основі отриманих зворотних ланцюжків.

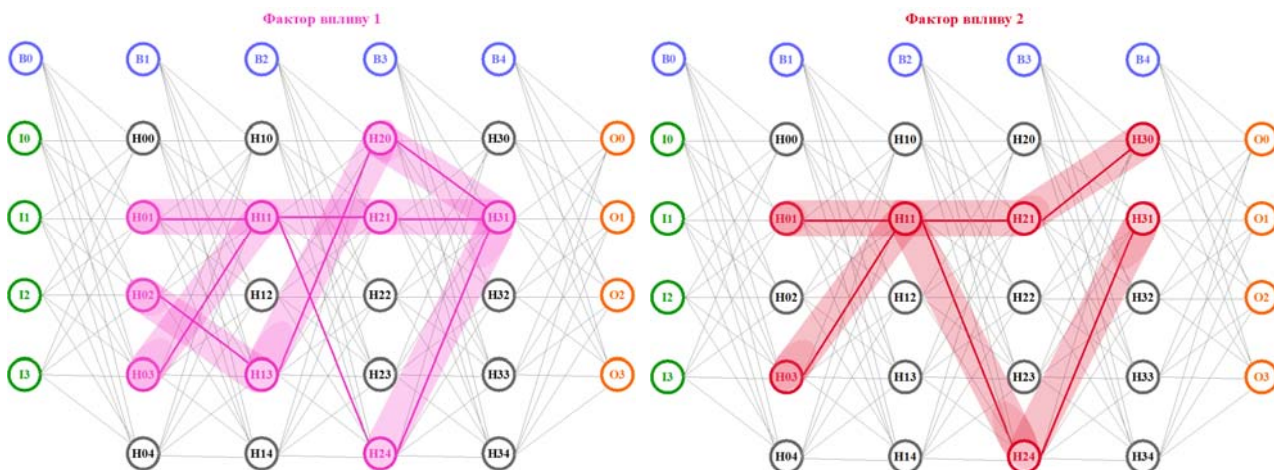


Рисунок 4 – Візуалізація відновлених границь факторів впливу на основі зворотних ланцюжків



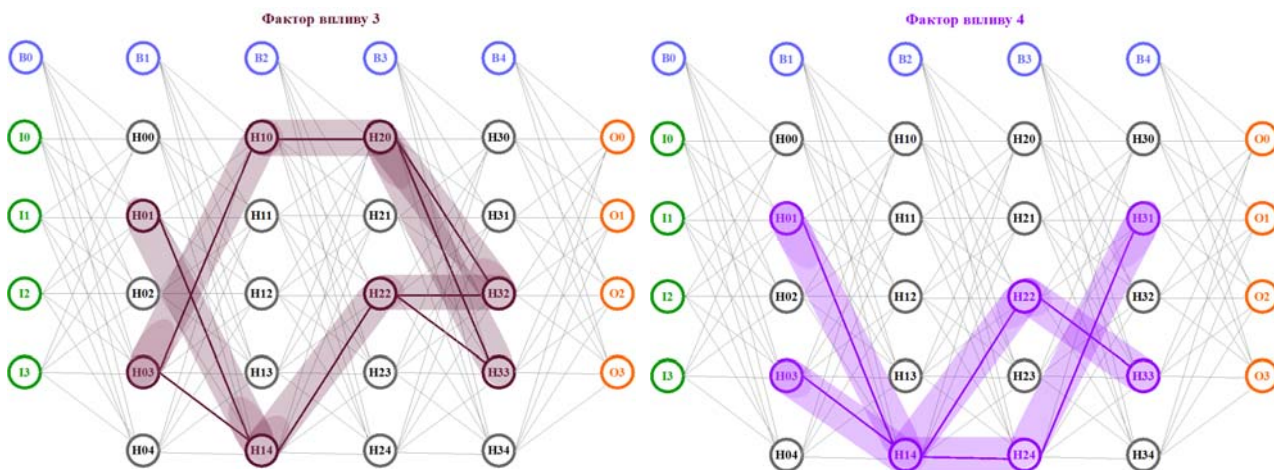


Рисунок 4 – Візуалізація відновлених границь факторів впливу на основі зворотних ланцюжків. (Продовження)

Також на рисунку нижче зображена візуалізація інтерференції відновлених границь факторів впливу.

Таким чином, побудовані з допомогою розробленої моделі зворотні ланцюжки максимальних ваг дають змогу ідентифікувати (відновити) границі факторів впливу, втрачені в результаті інкапсуляції ШНМ БП.

Завдяки цьому стає можливою ідентифікація фактора(-ів) впливу для будь-якого перетворення будь-

якої вхідної характеристики у будь-який вихідний результат її суб'єктивного сприйняття в моделях суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки, що дає змогу отримати якісний аналіз відповідного перетворення.

Тобто, завдяки отриманим результатам, для будь-якого перетворення можемо, за необхідності, однозначно ідентифікувати всі залучені фактори впливу.

### Інтерференція факторів впливу

Фактор впливу 1    Фактор впливу 2    Фактор впливу 3    Фактор впливу 4

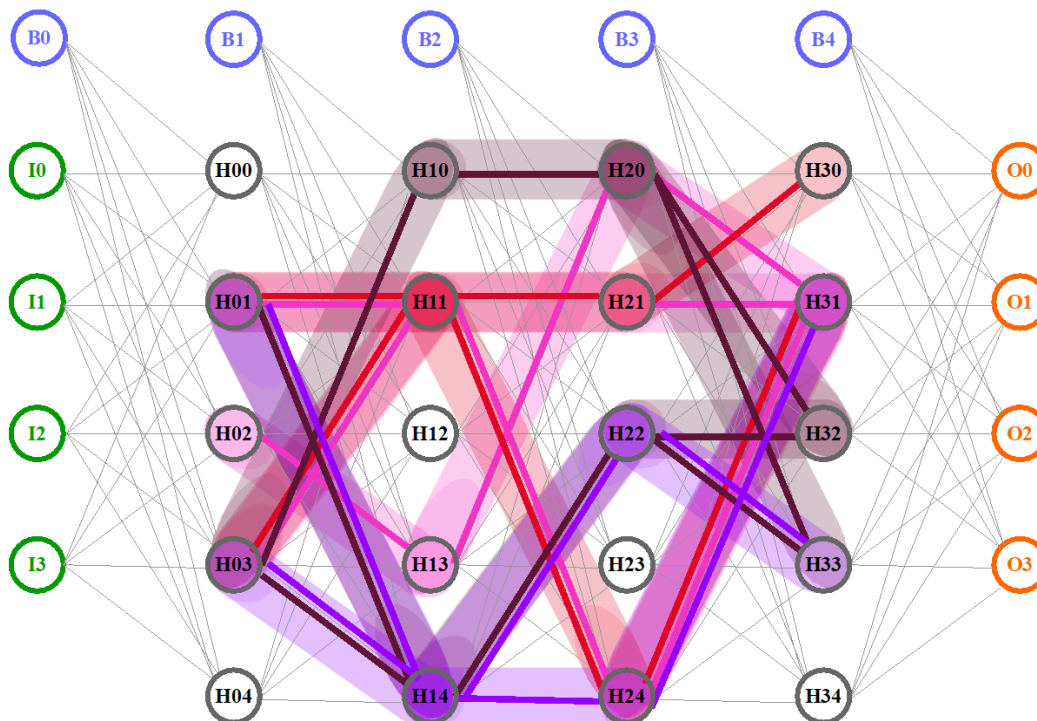


Рисунок 5 – Інтерференції відновлених границь факторів впливу

В свою чергу, розроблена модель також неабияк вдосконалює інструмент ШНМ БП, адже класичні ШНМ БП не передбачають жодного функціонально-смыслового навантаження для нейронів прихованих шарів, в той час як розроблена модель передбачає та однозначно ідентифікує їх приналежність до факторів впливу.

Також розроблена модель дає змогу здійснювати моделювання при розв'язанні широкого спектру практичних задач.

Однією з таких прикладних практичних задач є задача первинного аналізу (моніторингу) частоти прояву заданого фактору (або факторів) впливу в режимі пост-реального часу з використанням підходу AAR (After Action Review). Режим пост-реального часу – це режим максимально оперативного аналізу результатів дій досліджуваного суб'єкта (в той час як, до порівняння, класичний режим реального часу – це максимально оперативний аналіз дій досліджуваного суб'єкта).

Тобто, відмінність режиму пост-реального часу у порівнянні з класичним режимом реального часу полягає в тому, що останній передбачає можливість моніторингу дій, в той час як перший – можливість моніторингу лише результатів цих дій, що повністю відповідає підходу AAR (аналіз дій вже після їх здійснення). Обґрунтування вибору саме такої конфігурації зумовлено тим, що однозначно ідентифікувати заданий фактор впливу можливо лише після того, як цей заданий фактор впливу вже проявив себе, що підтверджується відповідними аналізом результатів отриманих на виході моделі суб'єктивного сприйняття.

Зокрема, розроблену модель використано для розв'язання прикладної практичної задачі первинного аналізу прояву психоемоційного перенавантаження членів команди підтримки програмного комплексу.

В досліджуваному кейсі фактор 4 відповідає за приховану психоемоційну роздратованість (маркерами проявів такої роздратованості є відповідні лінгвістичні, аудіальні, візуальні, та інші відомі форми). На основі результатів сприйняття набору вхідних характеристик досліджуваним суб'єктом побудована відповідна модель зворотних ланцюжків максимальних ваг. На рисунку нижче представлена наявність (значення «1») або відсутність (значення «0») фактору впливу 4 в кожному зворотньому ланцюжку побудованої моделі.

Отже, як бачимо з представленої на попередньому рисунку гістограми – присутність досліджуваного фактору 4 була виявлена в ряді кейсів. Також відслідковуються моменти сплеску частоти прояву заданого фактору. В подальшому отримані дані можна більш детально досліджувати для визначення конкретних дат і моментів часу, а також ймовірних причин виявлених сплесків. Проте на даному етапі цієї інформації вже більш ніж достатньо для розв'язання поставленої задачі первинного моніторингу частоти прояву заданого фактору впливу в режимі пост-реального часу з використанням підходу AAR.

Таким чином, розроблена модель дає змогу розв'язувати ряд прикладних практичних задач, серед яких, зокрема, і представлена у цій роботі, в якості наочного прикладу, задача первинного аналізу частоти прояву заданого фактору впливу суб'єктивного сприйняття.

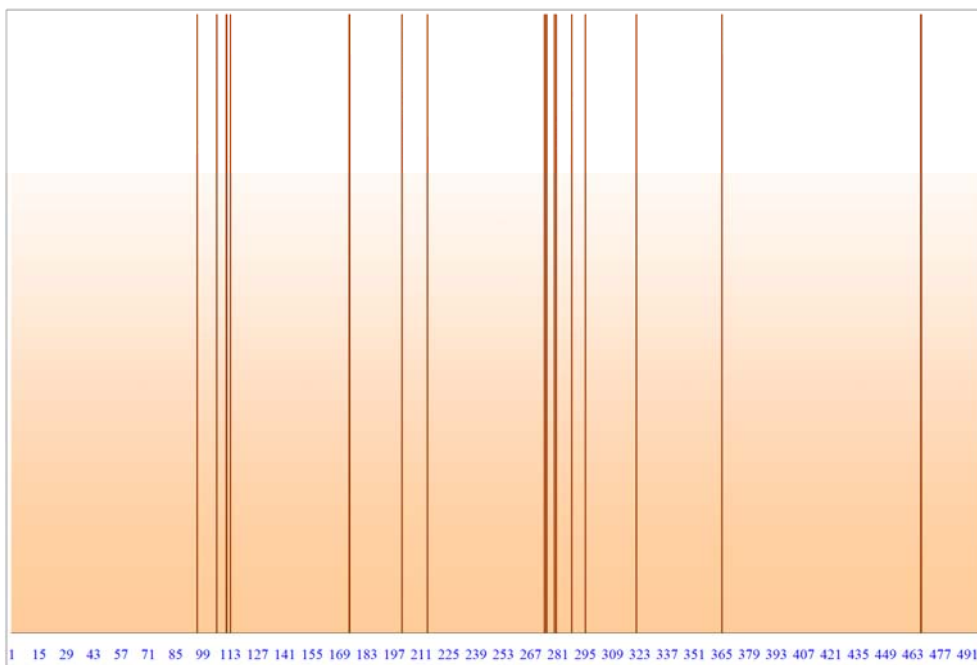


Рисунок 6 – Первинний аналіз частоти прояву заданого фактору

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

В роботі [11] розглядається застосування ШНМ БП для автоматизації в галузі електротехніки, з короткостроковим прогнозуванням навантаження енергосистеми як об'єкта дослідження, із додатковим застосуванням картографічної бази даних факторів, що впливають на короткочасне навантаження енергосистеми, які поділяються на три категорії: тип робочого дня, метеорологічні фактори та температурні фактори. Причому, відповідно до представленого у цій роботі дослідження – чим повніша картографічна база даних відображення факторів впливу, тим вища точність прогнозування навантаження енергосистеми за допомогою нейронної мережі. В іншій роботі [12] в якості об'єкта дослідження розглянуто процес прогнозування цін акцій за допомогою ШНМ БП. Відповідно до результатів, поданих у цій роботі, за допомогою використання факторів впливу втілено кращу точність прогнозування для моделі нейронної мережі БП, створеної за допомогою основного фактора, визначеного факторним аналізом як незалежної змінної, і цін акцій як залежної змінної.

Тобто, в обох розглянутих випадках підтверджено, що використання факторів впливу в моделях ШНМ БП дає кращу результативність функціонування цих моделей. Проте, в жодному з випадків фактори впливу не розглядаються як частина внутрішньої структури моделей ШНМ БП, натомість вони виступають виключно в ролі зовнішніх додаткових параметрів для навчання та подальшого тестування побудованих моделей ШНМ БП.

В той час як розроблена та представлена в даній статті модель зворотних ланцюжків максимальних ваг суттєво вдосконалює як є класичне розуміння так і можливості щодо відповідного подальшого застосування ШНМ БП, оскільки вводить додаткове значення для нейронів прихованих шарів, які тепер зможуть виконувати абсолютно нову функцію маркерів факторів впливу, в той час як в класичному розумінні ШНМ БП нейрони прихованих шарів не виконували жодних функцій окрім арифметичних для забезпечення можливості коректного навчання та функціонування ШНМ БП.

На виході моделі отримуємо повний перелік усіх зворотних ланцюжків максимальних ваг результатів тестування БП, що в подальшому дає можливість використати їх для ідентифікації, встановлення (відновлення), аналізу, а також інших досліджень як щодо границь факторів впливу, так і щодо самих факторів впливу, моделей суб'єктивного сприйняття об'єкта підтримки, що є частковою науково-прикладною задачею більш комплексної та глобальної науково-прикладної проблеми автоматизації підтримки програмних комплексів.

В якості подальшого застосування розроблених моделей бачимо можливість щодо розв'язання багатьох інших прикладних практичних задач, включаючи (але не обмежуючись), до прикладу, такі задачі як:

– формування «портретів» членів команд підтримки програмних комплексів; (\*портрет – набір числових показників кожного з множини факторів впливу, що вказує на вагомість впливу кожного з них, формуючи відповідну ієрархію факторів від найбільш вагомих до найменш вагомих)

– формування узагальнених портретів команд підтримки програмних комплексів;

– формування команд та під-команд на основі сумісності портретів їх членів;

– виявлення гіпертрофованих (вплив яких занадто вагомий у порівнянні з рештою факторів) чи гіпотрофованих (вплив яких практично відсутній у порівнянні з рештою факторів) факторів впливу;

– пошук напрямків розвитку як окремих членів команд, так і команд цілому, на основі їх портретів та виявлених як гіпертрофованих так і гіпотрофованих факторів впливу.

Таким чином, враховуючи широкий спектр прикладних задач, доцільність подальших досліджень в цьому напрямку є цілком обґрунтованою.

Крім того, розроблена модель може бути використана також і для цілком інших областей науки та практики, не обмежуючись лише сферою інформаційних технологій, а розповсюджуючись також в області, зокрема, психології та соціології, де дослідження сприйняття об'єктів є, фактично, ключовим поняттям та базисом.

## ВИСНОВКИ

Розроблено модель зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів. Основною науково-прикладною задачею, яку вирішує розроблена модель, є виявлення та формування зворотних ланцюжків максимальних ваг з метою ідентифікації та подальшого аналізу факторів впливу, які впливають на результати сприйняття досліджуваного об'єкта – підтримуваного програмного комплексу чи процесів його підтримки, відповідними суб'єктами взаємодії, що напряду чи опосередковано взаємодіють з досліджуванним об'єктом підтримки. Вхідними даними розробленої моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів є повні (із проміжними значеннями усіх нейронів усіх прихованих шарів, а не лише нейронів вхідних і вихідних шарів) результати тестування навченої інкапсульованої моделі БП.

Запропоновано два варіанти побудови моделей на основі результатів тестування відповідного багатозарового перцептрона: варіант «офф-лайн» (коли немає можливості проводити моделювання синхронно з тестуванням БП), а також варіант «он-лайн» (коли побудова моделі зворотних ланцюжків здійснюється паралельно (синхронно) з тестуванням досліджуваної моделі багатозарового перцептрона).

Представлено відповідний розроблений алгоритм побудови та функціонування моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу

ву підтримки програмних комплексів, що відображає покровоке формування моделі.

Подано базові форми представлення моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг, а саме: математична, матрична, лексикографічна та графічна форми представлення, з наведеними реальними прикладами результатів моделювання.

Розроблена модель забезпечує можливість здійснення якісного аналізу перетворення вхідних характеристик об'єкта підтримки у вихідні результуючі характеристики його суб'єктивного сприйняття в моделях суб'єктивного сприйняття об'єктів підтримки.

**Наукова новизна** полягає в розробленні моделі зворотних ланцюжків максимальних ваг, що дає змогу досліджувати фактори впливу підтримки програмних комплексів.

**Практичне значення** полягає в розробленні алгоритму побудова та функціонування моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг для аналізу факторів впливу підтримки програмних комплексів, а також в розробленні базових форм представлення моделей зворотних ланцюжків максимальних ваг, таких як: математична; матрична; лексикографічна; та графічна форми представлення.

**Перспективи подальших досліджень** полягають в розробленні відповідного додаткового спеціалізованого алгоритмічного та програмного забезпечення для моделювання зворотних ланцюжків максимальних ваг, а також в подальшому застосуванні розроблених моделей для вивчення факторів впливу та їх границь як у напрямку автоматизації підтримки програмних комплексів, так і в інших науково-прикладних напрямках досліджень.

## ПОДЯКИ

Робота є ініціативною. Дослідження проводились в рамках наукової діяльності авторів поза робочим часом за основними посадами.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Battina D. S. Artificial intelligence in software test automation: A systematic literature review [Electronic resource] / D. S. Battina // *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. – 2019. – Vol. 6, Iss. 12. – P. 1329–1332. – Access mode: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1912176.pdf>
2. Fang Y. Validation of Decisions of a Multilayer Perceptron Learning Algorithm for the Identification of Net Attacks with the Aid of Bayesian Classifiers [Electronic resource] / Y. Fang, M. Kempf, A. Sauer // *Proceedings of the 9th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering*. – SISE Virtual Conference, September 17–18. – 2020. – P. 050–054. – Access mode:

[https://ieworldconference.org/content/SISE2020/Papers/Fan\\_g.pdf](https://ieworldconference.org/content/SISE2020/Papers/Fan_g.pdf)

3. Kasurinen J. Software Test Automation in Practice: Empirical Observations / J. Kasurinen, O. Taipale, K. Smolander // *Advances in Software Engineering*. – 2010. – P. 1–18. DOI: 10.1155/2010/620836.
4. Neupane K. Continuous Automation with DevOps practices for Threat Detection [Electronic resource] / K. Neupane // 2023. – 99 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.33472.92169. – Access mode: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33472.92169>
5. Al Zahran S. How DevOps practices support digital transformation / S. Al Zahran, B. Fakieh // *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 9, No. 3. – P. 2780–2788. DOI: 10.30534/ijatcse/2020/46932020.
6. Introduction to Computational Intelligence: An IEEE Computational Intelligence Society Open Book [Electronic resource] / [L. Minku, G. Cabral, M. Martins, M. Wagner] // – Published by Zenodo. – 2023, 23 Jan. – 280 p. DOI: 10.5281/zenodo.7537827. – Access mode: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7537827>
7. Dahhan M.L. Reducing the Complexity of the Multilayer Perceptron Network using the Loading Matrix / M. L. Dahhan, Y. Almuoussa // *International Journal of Computer Applications*. – 2020. – Vol. 175, No. 10. – P. 40–48. DOI: 10.5120/ijca2020920568.
8. Training Multi-Layer Perceptron with Enhanced Brain Storm Optimization Metaheuristics / [N. Bacanin, K. Alhazmi, M. Zivkovic et al.] // *Computers, Materials & Continua Tech Science Press*. – 2022. – Vol. 70, No. 2. – P. 4199–4215. DOI: 10.32604/cmc.2022.020449.
9. Hanadi S. The impact of DevOps automation, controls, and visibility practices on software continuous deployment and delivery [Electronic resource] / S. Hanadi // *Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Management and Economics*. – Rome, Italy. – 2019, 12–14 September. – P. 22–46. – Access mode: <https://www.dpublication.com/wp-content/uploads/2019/09/IME-F793.pdf>
10. Vang-Mata R. Multilayer Perceptrons: Theory and Applications [Electronic resource] / R. Vang-Mata. – Hauppauge, New York : Nova Science Publishers, 2020. – 153 p. – Access mode: <https://novapublishers.com/shop/multilayer-perceptrons-theory-and-applications/>
11. Han Z. Application of a BP neural network in electrical automations / Z. Han // *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*. – 2021. – Vol. 1, No. 10. – P. 119–128. DOI: 10.17683/ijomam/issue10/v2.14.
12. Liu B. Research on Stock Price Prediction of BP Neural Network Based on Factor Analysis / B. Liu, C. Xu // *Academic Journal of Business & Management*. – 2023. – Vol. 5, Iss. 10. – P. 140–145. DOI: 10.25236/AJBM.2023.051021.

Received 26.05.2024.  
Accepted 22.08.2024.

UDC 004.8

## MODEL OF MAXIMAL WEIGHTS INVERSE CHAINS FOR THE ANALYSIS OF THE INFLUENCE FACTORS OF THE SOFTWARE COMPLEXES SUPPORT

**Pukach A. I.** – PhD, Assistant of ACS Department, Institute of Computer Sciences and Informational Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

© Пукач А. І., Теслюк В. М., 2024  
DOI 10.15588/1607-3274-2024-3-8





**Teslyuk V. M.** – Dr. Sc., Professor, Head of ACS Department, Institute of Computer Sciences and Informational Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** The problem of identification, formation and restoration of the boundaries of influencing factors, lost as a result of the implementation of multi-layer perceptron models into the models of subjective perception of the object of software complexes support, as well as the applied practical problem of primary monitoring of the frequency manifestation of a given influencing factor in the post-real-time mode, is considered. The object of research is the influencing factors of support of software complexes.

**Objective** – the goal of the work is to develop a model of inverse chains of maximum weights for the analysis of influencing factors of the software complexes support.

**Method.** A model of maximal weights inverse chains for the analysis of the influence factors of the software complexes support was developed for the analysis of the influencing factors of the software complexes support. The developed model provides possibility to identify and form feedback chains of maximum weights for the identification and further analysis of influencing factors that are reflected into the results of the object perception (the supported software complex or its support processes), by the relevant subjects of interaction which directly or indirectly interact with it.

**Results.** Results of the resolved applied practical problem of primary monitoring of the frequency manifestation of a given influencing factor in the post-real-time mode have been provided as an example of the applied practical use of the developed model. The output results of the developed models functioning – are the reverse chains of maximum weights. In the future, the results obtained by the developed model are used to solve the applied-scientific problem of identification, formation and restoration of the boundaries of influencing factors, lost as a result of the implementation of the appropriate models of multilayer perceptron inside the models of subjective perception of the software complexes support. So the developed model of maximal weights inverse chains for the analysis of the influence factors of the software complexes support resolves this applied-scientific problem, initially caused by the implementation of the corresponding multilayer perceptron models inside the model of the subjective perception of the object of software complexes support. The developed model provides the possibility of carrying out a qualitative analysis of the transformation of the input characteristics of the object of support into the output resulting characteristics of its subjective perception.

**Conclusions.** Developed model allows to resolve the described problems. At the same time, the developed model improves the classical understanding of multilayer perceptron artificial neural networks, as it introduces an additional value to the neurons of hidden layers, which (starting from now) are able to perform a completely new role of influencing factors markers, while in the classical understanding of multilayer perceptron artificial neural networks they did not perform any functions other than arithmetic to ensure the possibility of correct learning and functioning of a multilayer perceptron artificial neural networks.

**KEYWORDS:** software complex, support, influence factor, automation, neural networks, multilayer perceptron.

#### REFERENCES

1. Battina D. S. Artificial intelligence in software test automation: A systematic literature review [Electronic resource], *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2019, Vol. 6, Iss. 12, pp. 1329–1332. Access mode: <https://www.jetir.org/papers/JETIR1912176.pdf>
2. Fang Y., Kempf M., Sauer A. Validation of Decisions of a Multilayer Perceptron Learning Algorithm for the Identification of Net Attacks with the Aid of Bayesian Classifiers [Electronic resource], *Proceedings of the 9th Annual World Conference of the Society for Industrial and Systems Engineering, SISE Virtual Conference*, 2020, September 17–18, pp. 050–054. Access mode: <https://ieworldconference.org/content/SISE2020/Papers/Fang.pdf>
3. Kasurinen J., Taipale O., Smolander K. Software Test Automation in Practice: Empirical Observations, *Advances in Software Engineering*, 2010, pp. 1–18. DOI: 10.1155/2010/620836.
4. Neupane K. Continuous Automation with DevOps practices for Threat Detection [Electronic resource], 2023, 99 p. DOI: 10.13140/RG.2.2.33472.92169. Access mode: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33472.92169>
5. Al Zahran S., Fakieh B. How DevOps practices support digital transformation, *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 2020, Vol. 9, No. 3, pp. 2780–2788. DOI: 10.30534/ijatcse/2020/46932020.
6. Minku L., Cabral G., Martins M., Wagner M. Introduction to Computational Intelligence: An IEEE Computational Intelligence Society Open Book [Electronic resource], *Published by Zenodo*, 2023, 23 Jan, 280 p. DOI: 10.5281/zenodo.7537827. Access mode: <https://doi.org/10.5281/zenodo.7537827>
7. Dahhan M. L., Almoussa Y. Reducing the Complexity of the Multilayer Perceptron Network using the Loading Matrix, *International Journal of Computer Applications*, 2020, Vol. 175, No. 10, pp. 40–48. DOI: 10.5120/ijca2020920568.
8. Bacanin N., Alhazmi K., Zivkovic M., Venkatachalam K., Bezdán T., Nebhen J. Training Multi-Layer Perceptron with Enhanced Brain Storm Optimization Metaheuristics, *Computers, Materials & Continua Tech Science Press*, 2022, Vol. 70, No. 2, pp. 4199–4215. DOI: 10.32604/cmc.2022.020449.
9. Hanadi S. The impact of DevOps automation, controls, and visibility practices on software continuous deployment and delivery [Electronic resource], *Proceedings of the 2nd International Conference on Research in Management and Economics*. Rome, Italy, 2019, 12–14 September, pp. 22–46. Access mode: <https://www.dpublication.com/wp-content/uploads/2019/09/IME-F793.pdf>
10. Vang-Mata R. Multilayer Perceptrons: Theory and Applications [Electronic resource]. Hauppauge, New York, Nova Science Publishers, 2020, 153 p. Access mode: <https://novapublishers.com/shop/multilayer-perceptrons-theory-and-applications/>
11. Han Z. Application of a BP neural network in electrical automations, *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*, 2021, Vol. 1, No. 10, pp. 119–128. DOI: 10.17683/ijomam/issue10/v2.14.
12. Liu B., Xu C. Research on Stock Price Prediction of BP Neural Network Based on Factor Analysis, *Academic Journal of Business & Management*, 2023, Vol. 5, Iss. 10, pp. 140–145. DOI: 10.25236/AJBM.2023.051021.