

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



Радіоелектроніка  
Інформатика  
Управління

Radio Electronics  
Computer Science  
Control

Радиоэлектроника  
Информатика  
Управление



2021/4



Національний університет «Запорізька політехніка»

## **Радіоелектроніка, інформатика, управління**

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 4(59) 2021

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Національний університет «Запорізька політехніка».

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

Запоріжжя

НУ «Запорізька політехніка»

2021

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

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

The scientific journal

Published four times per year

№ 4(59) 2021

Founded in January 1999.

Founder and publisher – National University «Zaporizhzhia Polytechnic».

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

Zaporizhzhia

NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

2021

Национальный университет «Запорожская политехника»

## **Радиоэлектроника, информатика, управление**

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 4(59) 2021

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Национальный университет «Запорожская политехника».

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

Запорожье

НУ «Запорожская политехника»

2021

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованим статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

**Журнал входить до наукометричної бази Web of Science.**

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

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

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

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

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

## РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

### Члени редколегії:

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

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

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

Рекомендовано до видання Вченою радою НУ «Запорізька політехніка», протокол № 3 від 06.12.2021.

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;

**Левашенко 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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## РЕДАКЦІЙНО-КОНСУЛЬТАТИВНА РАДА

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is included into Web of Science.

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

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

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

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

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

## EDITORIAL BOARD

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

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

### Members of the Editorial Board:

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

**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., Associate Professor, Professor, Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Ukraine;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## EDITORIAL-ADVISORY COUNCIL

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

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

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

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

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

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

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

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

Recommended for publication by the Academic Council of NU «Zaporizhzhia Polytechnic», protocol № 3 dated 06.12.2021.

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», 2021

**Научный журнал «Радиоэлектроника, информатика, управление»** (сокращенное название – РИУ) издается национальным университетом «Запорожская политехника» (НУ «Запорожская политехника») с 1999 г. периодичностью четыре номера в год.

Зарегистрирован в Министерстве юстиции Украины 19.11.2019 г. (Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации серия КВ № 24220-14060 ПР).

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

Приказом Министерства образования и науки Украины № 409 от 17.03.2020 г. «Об утверждении решений Аттестационной коллегии Министерства относительно деятельности специализированных ученых советов от 06 марта 2020 года» журнал включен в перечень научных профессиональных изданий Украины в категории «А» (наивысший уровень), в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора наук и доктора философии (кандидата наук).

Журнал включен в польский Перечень научных журналов и рецензируемых материалов международных конференций с присвоенным числом баллов (приложение к объявлению Министра науки и высшего образования Республики Польша от 31 июля 2019 г.: № 16981).

В журнале бесплатно публикуются научные статьи на английском, русском и украинском языках.

**Правила оформления статей** представлены на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

Журнал обеспечивает **бесплатный открытый он-лайн доступ** к полнотекстовым публикациям. Журнал разрешает авторам иметь авторские права и сохранять права на издание без ограничений. Журнал разрешает пользователям читать, загружать, копировать, распространять, печатать, искать или ссылаться на полные тексты своих статей. Журнал разрешает повторное использование его содержания в соответствии Creative Commons лицензией CC BY-SA..

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

**Журнал входит в наукометрическую базу Web of Science.**

**Журнал реферирован и индексируется** в ведущих международных и национальных реферативных журналах и наукометрических базах данных, а также размещается в цифровых архивах и библиотеках с бесплатным доступом on-line, полный перечень которых представлен на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

**Журнал распространяется** по Каталогу периодических изданий Украины (подписной индекс – 22914).

**Тематика журнала:** телекоммуникации и радиоэлектроника, программная инженерия (включая теорию алгоритмов и программирования), компьютерные науки (математическое и компьютерное моделирование, оптимизация и исследование операций, управление в технических системах, межмашинное и человеко-машинное взаимодействие, искусственный интеллект, включая интеллектуальный анализ данных, распознавание образов, искусственные нейронные и нейро-нечеткие сети, нечеткую логику, коллективный интеллект и мультиагентные системы, гибридные системы), компьютерная инженерия (аппаратное обеспечение вычислительной техники, компьютерные сети), информационные системы и технологии (структуры и базы данных, системы, основанные на знаниях, и экспертные системы, обработка данных и сигналов).

Все статьи, предлагаемые к публикации, получают **объективное рассмотрение**, которое оценивается по существу без учета расы, пола, вероисповедания, этнического происхождения, гражданства или политической философии автора(ов).

Все статьи проходят двухступенчатое закрытое (анонимное для автора) **рецензирование** штатными редакторами и независимыми рецензентами – ведущими учеными по профилю журнала.

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

**Главный редактор – Субботин Сергей Александрович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой программных средств, Национальный университет «Запорожская политехника», Украина.

**Заместитель главного редактора – Пиза Дмитрий Макарович** – доктор технических наук, профессор, директор института информатики и радиоэлектроники, профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций, Национальный университет «Запорожская политехника», Украина.

### **Члены редколлегии:**

**Андрюлидакис Иосиф** – доктор философии, глава департамента телефонии Центра обслуживания сетей, Университет Янины, Греция;

**Бодянский Евгений Владимирович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры искусственного интеллекта, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина;

**Венисенс Юст** – доктор философии, доцент факультета инженерных технологий (кампус де Наир), Католический университет Левена, Бельгия;

**Вольф Карстен** – доктор философии, профессор, профессор кафедры технической информатики, Дортмундский университет прикладных наук и искусств, Германия;

**Вуттке Ганс-Дитрих** – доктор философии, доцент, ведущий научный сотрудник института технической информатики, Технический университет Ильменау, Германия;

**Горбань Александр Николаевич** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор факультета математики, Университет Лестера, Великобритания;

**Городничий Дмитрий Олегович** – доктор философии, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Дирекции науки и инженерии, Канадское агентство пограничной службы, Канада;

**Дробахин Олег Олегович** – доктор физико-математических наук, профессор, первый проректор, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, Украина;

**Зайцева Елена Николаевна** – кандидат физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информатики, Жилинский университет в Жилине, Словакия;

**Камеяма Мичитака** – доктор наук, профессор, профессор факультета науки и инженерии, Университет Ишиномаки Сеншу, Япония;

**Карташов Владимир Михайлович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой медиаинженерии и информационных радиоэлектронных систем, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Украина;

**Левашенко Виталий Григорьевич** – кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, Жилинский университет в Жилине, Словакия;

**Луэнго Давид** – доктор философии, профессор, заведующий кафедрой теории сигналов и коммуникации, Мадридский политехнический университет, Испания;

**Марковска-Качмар Урсла** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры вычислительного интеллекта, Вроцлавская политехника, Польша;

**Олейник Андрей Александрович** – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры программных средств, Национальный университет «Запорожская политехника», Украина;

**Павликов Владимир Владимирович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, проректор по научной работе, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Э. Жуковского «ХАИ», Украина;

**Панищкий Марцин** – доктор наук, профессор, профессор отдела интеллектуальных систем, Исследовательский институт систем Польской академии наук, г. Варшава, Польша;

**Скруцкий Степан Юрьевич** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Национальный университет «Запорожская политехника», Украина;

**Табунщик Галина Владимировна** – кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры программных средств, Национальный университет «Запорожская политехника», Украина;

**Тригано Томас** – доктор философии, старший преподаватель кафедры электрической и электронной инженерии, Инженерный колледж им. С. Шамоу, г. Ашдод, Израиль;

**Хенке Карстен** – доктор технических наук, профессор, научный сотрудник факультета информатики и автоматизации Технический университет Ильменау, Германия;

**Шарпаньских Алексей Альбертович** – доктор философии, доцент факультета аэрокосмической инженерии, Делфтский технический университет, Нидерланды.

## РЕДАКЦИОННО-КОНСУЛЬТАТИВНЫЙ СОВЕТ

**Аррас Питер** – доктор философии, доцент факультета инженерных технологий (кампус де Наир), Католический университет Левена, Бельгия;

**Лиснянский Анатолий** – кандидат физико-математических наук, главный научный эксперт, Израильская электрическая корпорация, Хайфа, Израиль;

**Мадритц Христиан** – доктор философии, профессор факультета инженерии и информационных технологий, Университет прикладных наук Каринфии, Австрия;

**Маркосан Мгер Вардкесович** – доктор технических наук, профессор, директор Ереванского научно-исследовательского института средств связи, профессор кафедры телекоммуникаций, Российско-армянский университет, Ереван, Армения;

**Рубель Олег Владимирович** – кандидат технических наук, доцент факультета инженерии, Университет МакМастер, Гамильтон, Канада;

**Тавхелидзе Автандил** – кандидат физико-математических наук, профессор, профессор школы бизнеса, технологии и образования, Государственный университет им. Ильи Чавчавадзе, Тбилиси, Грузия;

**Урсутью Дору** – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электроники и вычислительной техники, Трансильванский университет в Брашове, Румыния;

**Шульца Питер** – доктор технических наук, профессор, профессор факультета инженерии и компьютерных наук, Гамбургский университет прикладных наук (HAW Hamburg), Гамбург, Германия.

Рекомендовано к изданию Ученым советом НУ «Запорожская политехника», протокол № 3 от 06.12.2021.

Журнал сверстан редакционно-издательским отделом НУ «Запорожская политехника».

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

**Адрес редакции:** Редакция журнала «РИУ», Национальный университет «Запорожская политехника», ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина.

Тел.: +38-061-769-82-96 – редакционно-издательский отдел

Факс: +38-061-764-46-62

E-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

© Национальный университет «Запорожская политехника», 2021

# ЗМІСТ

<b>РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....</b>	<b>7</b>
<i>Bezruk V.V., Kaliuzhnyi M. M., Semenets V. V., Guo Qiang, Zheng Yu</i> RECOGNITION METHOD OF SPECIFIED TYPES OF SIGNAL MODULATION BASED ON A PROBABILISTIC MODEL IN THE FORM OF A MIXTURE OF DISTRIBUTIONS.....	7
<i>Kvasnikov V. P., Yehorov S. V., Shkvarnytska T. Yu., Ornatskyi D. P., Kataieva M. A.</i> MODELING COMMUNICATION SYSTEMS TO STUDY THE EFFECT OF INTERFERENCE IN THE TRANSMISSION MEDIUM.....	15
<i>Луза Д. М., Романенко С. Н.</i> УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЙ МЕТОД ГРАМА-ШМИДТА ДЛЯ ОБРОБОТКИ РАДІОЛОКАЦІОННИХ СИГНАЛІВ.....	26
<i>Пильтяй С. И., Булашенко А. В., Быковский А. В., Булашенко А. В.</i> ОЦЕНКА МЕТОДОВ FEM И FDTD ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ДИАФРАГМАМИ.....	34
<b>МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....</b>	<b>49</b>
<i>Tarasov V. N., Bakhareva N. F.</i> QUEUEING SYSTEMS WITH TIME LAG.....	49
<b>НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....</b>	<b>58</b>
<i>Gadetska S. V., Gorokhovatskyi V. O. Stiahlyk N. I. Vlasenko N. V.</i> STATISTICAL DATA ANALYSIS TOOLS IN IMAGE CLASSIFICATION METHODS BASED ON THE DESCRIPTION AS A SET OF BINARY DESCRIPTORS OF KEY POINTS.....	58
<i>Leoshchenko S. D., Oliinyk A. O., Subbotin S. A., Netrobko V. V., Gofman Ye. O.</i> SYNTHESIS OF A NEURAL NETWORK MODEL OF INDUSTRIAL CONSTRUCTION PROCESSES USING AN INDICATOR SYSTEM.....	69
<i>Povkhan I. F., Mitsa O. V., Mulesa O. Y., Polishchuk V. V.</i> THE ALGORITHM TREE METHOD IN SOLVING THE TASK OF CLASSIFYING HYDROGRAPHIC DATA...	78
<b>ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....</b>	<b>95</b>
<i>Burlachenko I. S., Savinov V. Yu., Tohoiev O. R., Zhuravska I. M.</i> THE CLOUD GNSS DATA FUSION APPROACH BASED ON THE MULTI-AGENT AUTHENTICATION PROTOCOLS' ANALYSIS IN THE CORPORATE LOGISTICS MANAGEMENT SYSTEMS.....	95
<i>Литвин В. В., Бублик М. І., Висоцька В. А., Мацелюх Ю. Р.</i> ТЕХНОЛОГІЯ ВІЗУАЛЬНОЇ СИМУЛЯЦІЇ ПАСАЖИРОПОТОКІВ У СФЕРІ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ SMART CITY.....	106
<i>Prots'ko I., Rykmas R.</i> ANALYSIS OF THE USE OF MULTITHREADED COMPUTING TECHNOLOGIES TO FACTORIZE OF NUMBERS BY A BINARY ALGORITHM.....	122
<i>Prykhodko S. B., Shutko I. S., Prykhodko A. S.</i> A NONLINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SIZE OF WEB APPS CREATED USING THE SAKEPHP FRAMEWORK.....	129
<i>Яковуна В. С., Ухрыновський В. В.</i> ANDROID SOFTWARE AGING AND REJUVENATION MODEL CONSIDERING THE BATTERY CHARGE.....	140
<b>УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>149</b>
<i>Kozulia T. V., Sviridova A. S., Kozulia M. M.</i> ENTROPY APPROACH IN SYSTEM RESEARCH OF DIFFERENT COMPLEXITY OBJECTS TO ASSESS THEIR CONDITION AND FUNCTIONALITY.....	149

# CONTENTS

<b>RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....</b>	<b>7</b>
<i>Bezruk V.V., Kaliuzhnyi M. M., Semenets V. V., Guo Qiang, Zheng Yu</i> RECOGNITION METHOD OF SPECIFIED TYPES OF SIGNAL MODULATION BASED ON A PROBABILISTIC MODEL IN THE FORM OF A MIXTURE OF DISTRIBUTIONS.....	7
<i>Kvasnikov V. P., Yehorov S. V., Shkvarnytska T. Yu., Ornatskyi D. P., Kataieva M. A.</i> MODELING COMMUNICATION SYSTEMS TO STUDY THE EFFECT OF INTERFERENCE IN THE TRANSMISSION MEDIUM.....	15
<i>Piza D. M., Romanenko S. N.</i> ADVANCED GRAM-SCHMIDT METHOD FOR RADAR SIGNAL PROCESSING.....	26
<i>Piltyay S. I., Bulashenko A. V., Bykovskyi O. V., Bulashenko O. V.</i> ESTIMATION OF FEM AND FDTD METHODS FOR SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF POLARIZATION TRANSFORMING DEVICES WITH DIAPHRAGMS.....	34
<b>MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....</b>	<b>49</b>
<i>Tarasov V. N., Bakhareva N. F.</i> QUEUEING SYSTEMS WITH TIME LAG.....	49
<b>NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....</b>	<b>58</b>
<i>Gadetska S. V., Gorokhovatskyi V. O. Stiahlyk N. I. Vlasenko N. V.</i> STATISTICAL DATA ANALYSIS TOOLS IN IMAGE CLASSIFICATION METHODS BASED ON THE DESCRIPTION AS A SET OF BINARY DESCRIPTORS OF KEY POINTS.....	58
<i>Leoshchenko S. D., Oliinyk A. O., Subbotin S. A., Netrebko V. V., Gofman Ye. O.</i> SYNTHESIS OF A NEURAL NETWORK MODEL OF INDUSTRIAL CONSTRUCTION PROCESSES USING AN INDICATOR SYSTEM.....	69
<i>Povkhan I. F., Mitsa O. V., Mulesa O. Y., Polishchuk V. V.</i> THE ALGORITHM TREE METHOD IN SOLVING THE TASK OF CLASSIFYING HYDROGRAPHIC DATA...	78
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>95</b>
<i>Burlachenko I. S., Savinov V. Yu., Tohoiev O. R., Zhuravska I. M.</i> THE CLOUD GNSS DATA FUSION APPROACH BASED ON THE MULTI-AGENT AUTHENTICATION PROTOCOLS' ANALYSIS IN THE CORPORATE LOGISTICS MANAGEMENT SYSTEMS.....	95
<i>Lytvyn V., Bublyk M., Vysotska V., Matseliukh Y.</i> VISUAL SIMULATION TECHNOLOGY FOR PASSENGER FLOWS IN THE PUBLIC TRANSPORT FIELD AT SMART CITY.....	106
<i>Prots'ko I., Rykmas R.</i> ANALYSIS OF THE USE OF MULTITHREADED COMPUTING TECHNOLOGIES TO FACTORIZE OF NUMBERS BY A BINARY ALGORITHM.....	122
<i>Prykhodko S. B., Shutko I. S., Prykhodko A. S.</i> A NONLINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SIZE OF WEB APPS CREATED USING THE CAKEPHP FRAMEWORK.....	129
<i>Yakovyna V. S., Uhrynovskyi B. V.</i> ANDROID SOFTWARE AGING AND REJUVENATION MODEL CONSIDERING THE BATTERY CHARGE.....	140
<b>CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....</b>	<b>149</b>
<i>Kozulia T. V., Sviridova A. S., Kozulia M. M.</i> ENTROPY APPROACH IN SYSTEM RESEARCH OF DIFFERENT COMPLEXITY OBJECTS TO ASSESS THEIR CONDITION AND FUNCTIONALITY.....	149

# РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

# РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

---

UDC 621.391

### RECOGNITION METHOD OF SPECIFIED TYPES OF SIGNAL MODULATION BASED ON A PROBABILISTIC MODEL IN THE FORM OF A MIXTURE OF DISTRIBUTIONS

**Bezruk V.V.** – Dr Sc., Professor, Head of the Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Kaliuzhnyi M. M.** – PhD, Senior Research, Head of the problem research laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Semenets V. V.** – Dr Sc., Professor, Rector, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Guo Qiang** – PhD, Professor, Director of Master and Ph. D Management Office, College of Information and Telecommunication Harbin Engineering University, The People Republic of China.

**Zheng Yu** – PhD, Professor, Chair of Department Micro- and Nano- Electronics, Qingdao University, The People Republic of China.

#### ABSTRACT

**Context.** The article considers the features of solving non-traditional problems of recognition of specified types modulation signals in automated radio monitoring. The practical features of this problem determine the increased a priori uncertainty, which consists in the absence of a priori information about the distribution densities of the given signals and the presence of unknown signals.

**Objective.** It is proposed to solve the problem using an unconventional method for the recognition of statistically specified random signals in the presence of a class of unknown signals. This method assumes that for the given signals there is a classified training sample of realizations, according to which the unknown parameters of their distributions are estimated, as well as some threshold values that determine the probabilities of correct recognition of the given types of signal modulation in the presence of unknown signals.

**Method.** A general solution to the problem of recognition of given signals in the presence of unknown signals is given, and recognition methods of types modulation based on the description of signals by probabilistic model in the form of a mixture of distributions are given. The method is based on the description of signals by a probabilistic model in the form of a mixture of distributions and construction of a closed area for given signals in the probabilistic space of signals.

**Results.** Studies of the recognition problems of given types of modulation of signals have been carried out. The studies were performed by statistical tests on samples of signals for radio monitoring of communications. In this case, the decisive rule for recognizing the given types of signal modulation is implemented in software on a computer. As a result of the statistical tests carried out on control samples of signals, estimates of the probabilities of correct recognition of the given types of signal modulation in the presence of unknown signals were obtained.

**Conclusions.** Values of indicators of quality of radio emissions recognition acceptable for the practice of radio monitoring are obtained. The dependences of quality indicators on some conditions and recognition parameters are property. As a result of the research, practical recommendations were obtained on the use of the proposed method for recognizing specified types of signal modulation in automated radio monitoring systems.

**KEYWORDS:** automated radio monitoring, radio emission, signal, types modulation, probabilistic model, recognition method, statistical tests. the probability of correct recognition.

#### ABBREVIATIONS

RM is a radio monitoring;  
RE is a radio emission;

TM are types of modulation.



## NOMENCLATURE

$M$  is a number of classes of recognizable signals;  
 $\vec{x}$  is a finite-dimensional random vector of some observations;  
 $L$  is a dimensions of realizations of the observed signals;  
 $W(\vec{x}/\vec{\alpha}^i)$  is a probability densities of the signals;  
 $\alpha^i$  is a vector parameters of the probability densities;  
 $P(H^i)$  is a priori probabilities of hypotheses;  
 $\vec{x}_r^i$  is a training sample for the signals;  
 $n_i$  is a volume of the training samples;  
 $\lambda$  is a threshold value in decision rule;  
 $A_c(k), A_s(k)$  are the quadrature components of the signals;  
 $\sigma_c^2, \sigma_s^2$  are the variances of the quadrature components;  
 $m_{c_j}, m_{s_j}$  are the mathematical expectations of the quadrature components;  
 $g_m$  are the weight coefficients in a composition of distributions;  
 $Q$  is a number of components in a composition of distributions;  
 $P_{(M/M+1)}$  is a average probability of an erroneous decision-making in favor of signals with a given TMs under the action of signals from the  $(M+1)$ -th class;  
 $P_{(M+1/M)}$  is a average probability of an erroneous decision-making in favor of signals from the  $(M+1)$ -th class under the action of signals with a given TM;  
 $P_M$  is a average probability of error due to entanglement of signals within the class of signals with given TMs.

## INTRODUCTION

Radio monitoring is a complex task of spatially-spectral-temporal processing of radio emissions in a wide frequency range. To simplify the solution, it is decomposed into a number of relatively independent processing tasks, in particular, detection of radiation sources operating in separate frequency channels, selection and recognition of the given types of radiation sources, recognition of the types of modulation of RE, recognition of species and estimation of modulation parameters for new unknown RE, recognition of RE sources. These processing tasks are solved by signals corresponding to the RE from the output of automated radio monitoring complexes. Therefore, for their mathematical description, mathematical models adequate to the solvable problems of signal processing should be used. It should be noted that due to the action of noise and many other uncontrolled factors, the observed signals are random in nature with a priori unknown statistical characteristics. A priori uncertainty regarding the statistical characteristics of signals is usually overcome by using training samples of signal implementations that can be obtained for given RE. However in case of RM many unknown RE are received for processing, for which it is not possible to obtain training samples of signals. Under such conditions it becomes impossible to use known

statistical methods for pattern recognition in automated RM. In classical problems of signal recognition a priori uncertainty overcoming was carried out using training samples of the signals being recognized. However, in real problems of the automated RM, situations arise when the observed signal may not belong to the given classes of signals and should be assigned to the class of unknown signals not specified in the probabilistic sense.

**The object of study** is the process of solving of recognition signals problems in automated RM.

**The subject of study** is the non-traditional methods of given signals recognition in the presence of unknown signals when probabilistic models in the form of a mixture of distributions is used to describe of the signals.

**The purpose of this work** is discusses the features of solving the problem of recognition of the specified TM of signals. Based on this mathematical model of signals, the decisive rule for the recognition of given signals is synthesized. Investigations of the recognizing task specified types modulation of signals by means of statistical tests on samples of the corresponding signals have been performed.

## 1 PROBLEM STATEMENT

Let us consider the features of the formalized formulation of the signal recognition problem under the indicated conditions for solving recognition problems with the automated RM. We assume that the signals being recognized are represented by finite-dimensional random observation vectors  $\vec{x}$ , according to the implementation of which decisions are made. The  $(M+1)$ -ahypotheses are set that can be made with respect to the observed signals:  $H^i, i = \overline{1, M}$  – for the specified signals,  $H^{M+1}$  – for the unknown signals combined in the  $(M+1)$ -th class. It is assumed that the probability densities of the distributions of specified signals  $W(\vec{x}/\vec{\alpha}^i), i = \overline{1, M}$  are presented up to random vector parameters  $\vec{\alpha}^i, i = \overline{1, M}$ , and the probability density is unknown for the  $(M+1)$ -th class of signals. A priori probabilities of hypotheses  $P(H^i) = P_i$ ,

are also given, moreover  $\sum_{i=1}^M P_i = 1$ . It is also believed that training samples  $\{\vec{x}_r^i, r = \overline{1, n}; i = \overline{1, M}\}$  for  $M$  signals have been obtained and the training sample for the  $(M+1)$ -th signal is absent or it is not representative.

The nonrandomized decision recognition rule splits the sampled signal space into  $(M+1)$  non-intersecting regions, in particular, regions separately for  $M$  given signals and the rest of the space – for unknown signals. In accordance with the available a priori information about the signals, it is possible to construct own regions only for given signals.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

Features of different signal processing tasks during automated radio monitoring are considered in [1–3]. In particular, the importance of solving the problems of recognizing RE from the signals representing them is noted. Features of solving the problem of automatic classification of signal modulations during radio monitoring are considered in [1]. Creating the information basis of spectral masks for automated RM are considered in [2]. Methods detection and recognition of signals for RM are considered in [3].

In [4–7] the different methods for automatic recognition of types of modulation for signals is presented. In particular, method of robust automatic signals modulation classification under varying noise conditions are considered in [4]. Method of radar signals modulation recognition based on deep joint learning are considered in [5]. Method of communication signals modulation recognition based on statistical model are considered in [6]. Method of automatic signals modulation recognition using wavelet transform and neural network are considered in [7].

The tasks of recognition signals corresponding to given RE have to be solved under conditions of a priori uncertainty. Since real signals are, generally, random in nature, statistical methods of pattern recognition should be used for signal recognition. These methods are considered in [8–10]. A priori uncertainty is overcome using classified training samples of recognized signals. However, in real problems of the automated RM, situations arise when the observed signal may not belong to the given classes of signals and should be assigned to the class of unknown signals not specified in the probabilistic sense [11].

When solving the problems of signal recognition based on the selected probabilistic model, the presence of unknown signals should be taken into account. In [12] an appropriate signal recognition method based on the autoregressive model was proposed.

From the analysis of publications, it follows the relevance of researching the possibilities of using non-traditional methods of selection and recognition of given random signals to solve problems of recognizing specific types of modulation in automated RM. In this case, it is necessary to specify the methods for recognizing signals by selecting probabilistic signal model that are adequate to the solved of recognizing problems. In addition, studies should be carried out of the proposed methods for signal recognition using signal samples characteristic of the problems of recognition of RE in radio monitoring.

To achieve the goal of research in this article:

- the theoretical features of the methods of recognition of specified types modulation of the signals in the presence of unknown signals based on probabilistic models in the form of a mixture of distributions are considered;

- the values of recognition quality indicators were studied by statistical tests of recognition methods on communication signals samples corresponding to the

problems of recognition of given types of modulation in RE.

## 3 MATERIALS AND METHODS

The solution of the formulated problem of recognizing given signals in the presence of a class of unknown signals can be based on constructing in the sample space closed own regions for  $M$  signals defined by their training samples of implementations. When realizations of the observed signal fall into one of the signal's own regions, a decision is made about the action of the given signal. Otherwise, a decision is made about the action of the unknown signal. The shape of their own areas is determined by the specific types of signal distribution densities, which depend on the selected probabilistic model for given signals, as well as on predetermined threshold values that are selected from the condition that the specified indicators of signal recognition quality are achieved.

To solve such an unconventional problem of selection and recognition of given signals in the presence of a class of unknown signals, it is advisable to use the following decision rule [11]:

- if inequalities hold

$$\max_{l=1, \overline{M}} \{P_l W(\bar{x}/\bar{\alpha}^l)\} < \lambda, \quad (1)$$

then  $H_0$  hypothesis about the action of the  $(M+1)$ -th class of unknown signals is accepted;

- if the system of inequalities holds:

$$\max_{l=1, \overline{M}} \{P_l W(\bar{x}/\bar{\alpha}^l)\} \geq \lambda, \quad (2)$$

$$P_l W(\bar{x}/\bar{\alpha}^i) \geq P_l W(\bar{x}/\bar{\alpha}^l), l = \overline{1, M}, l \neq i, \quad (3)$$

then  $H^i$  hypothesis about the action of the specified  $i$ -th signal is accepted.

Here, the unknown parameters of the distribution densities  $\alpha^i$  are estimated from the training samples for  $M$  signals, and the threshold value  $\lambda$  is determined from the condition of ensuring a specified probability of correct recognition of the specified signals.

Note that when constructing the decision rule (1), information on the distribution density of the  $(M+1)$ -th signal was not used and its training sample was not required. The statement and solution of the considered recognition problem is a formalization of the substantive requirement about the need to isolate (perform selection) and recognize  $M$  specified signals and classify unknown signals in the  $(M+1)$ -th class, information about which is insufficient for their recognition.

When using a probabilistic signal model in the form of a mixture of distributions, the decision recognition rule (1–3) takes the following form [12]:

- if the conditions hold:

$$\max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} \geq \lambda, \quad (4)$$

$$P_i \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \geq P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l), \quad l=1, M, \quad l \neq i, \quad (5)$$

the hypothesis  $H^i$  about the action of the  $i$ -th given signal is accepted;

– if the conditions hold:

$$\max_{l=1, M} \left\{ P_l \sum_{q=1}^Q g_m W_m(\bar{x}/\bar{\alpha}^l) \right\} < \lambda, \quad (6)$$

then the hypothesis  $H^{M+1}$  about the action of unknown signals from the  $(M+1)$ -th class is accepted.

After making a decision to observe the given types of signal modulation, a decision is made according to (5), what kind of signal modulation is observed. In this case, there are probabilities of confusion between the given types of signal modulation.

Under the assumption of independence of samples of quadrature components, the probabilistic properties of signals were determined by mixtures of Gaussian distributions of samples of quadrature components in the form [11]:

$$W(\bar{A}_c) = \prod_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_{cj} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(A_{cj} - m_{cj})^2}{2\sigma_{cj}^2}\right],$$

$$W(\bar{A}_s) = \prod_{j=1}^N \frac{1}{\sigma_{sj} \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(A_{sj} - m_{sj})^2}{2\sigma_{sj}^2}\right], \quad (7)$$

where  $\sigma_{cj}^2, \sigma_{sj}^2, m_{cj}, m_{sj}$  – are respectively, the variances and mathematical expectations of the quadrature components.

At the same time, a special case of the decision-making rule (4–6) on the  $2N$ -dimensional vector of independent quadrature components of the signals  $(A_c(k), A_s(k)), k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$  can be used.

In the given decision rules for recognition, it is assumed that for unknown parameters of signal distribution densities there are their estimates calculated from training samples of realizations of the specified signals.

#### 4 EXPERIMENTS

Let us consider some results of studies of the problems of recognition of RE, which were carried out by statistical modeling. Moreover, the methods of selection and recognition of random signals in the presence of a class of unknown signals, which are described in clause (4–6) are implemented on a computer program. Next,

© Bezruk V. V., Kaliuzhnyi M. V., Semenets V. V., Guo Qiang, Zheng Yu, 2021  
 DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-1

statistical tests were carried out on samples of implementations of some signals that correspond to RE characteristic of radio monitoring of communications. Based on the training samples of the given signals, the corresponding parameters of the decision rules are calculated. Control samples of signals were used to find estimates of the probabilities of signal recognition based on the results of statistical tests. By changing some conditions and research parameters, the corresponding dependences of signal recognition quality indicators are obtained.

Under the conditions of increasing load of radio bands with automated RM, it is also an important task to recognize the specified types of modulation for the newly detected REs. This is a more difficult recognition problem compared to the above considered problem of recognition of the REs with given types and modulation parameters. The complexity is due to the fact, that whole classes of signals are subject to recognition – signals with a definite TM and various possible values of the modulation parameters. Recognition of TM signals during RM in real conditions is difficult due to the random nature of the transmitted messages, interference action, as well as the appearance of radio signals with new previously unknown TMs for which there is no a priori information.

It is proposed to solve this problem as a problem of recognizing classes of signals with known TMs in the presence of a class of signals with unknown TMs. In this case, the general form of the decision rule for the selection and recognition of given signals (1–3) is concretized taking into account the description of signal classes with given TMs by a probabilistic model in the form of a mixture of distributions (4–6). Here, the decision on the TM is made according to the implementation of the signals in the form of sequences of samples of quadrature components  $A_c(k), A_s(k), k = 1, 2, 3, \dots, N$ , obtained from the output of a digital radio receiver. The studies were conducted for signals with the following types of modulation: on-off amplitude modulation (AM2), on-off and four-position frequency modulation (FM2, FM4), and on-off phase modulation (PM2), sixteen-position code-amplitude modulation (QAM16), unmodulated carrier (NON).

When choosing such an initial description of the signals for each specific type of modulation, characteristic images are formed – areas determined by the projections of the readings of the quadrature components  $A_c(k)$  and  $A_s(k)$  onto the plane with coordinates  $(A_c, A_s)$  (Fig. 1).

The signals were observed on the background of interference in the form of Gaussian white noise. It can be seen that these projections define characteristic regions for each type of modulation. Here, histograms of the distribution of the values of the signals quadrature components are given for each coordinate.

#### 5 RESULTS

From an analysis of the content of the problem of recognition of TM signals, it follows that a model in the

form of a mixture of distributions and the corresponding decision rule (4–6) taking into account relations (7) can serve as a suitable probabilistic model for describing signals with different TMs.

Estimates of the quality of recognition of TMs were obtained by statistical tests on samples of signals with different TMs (Fig. 1) at different values of the

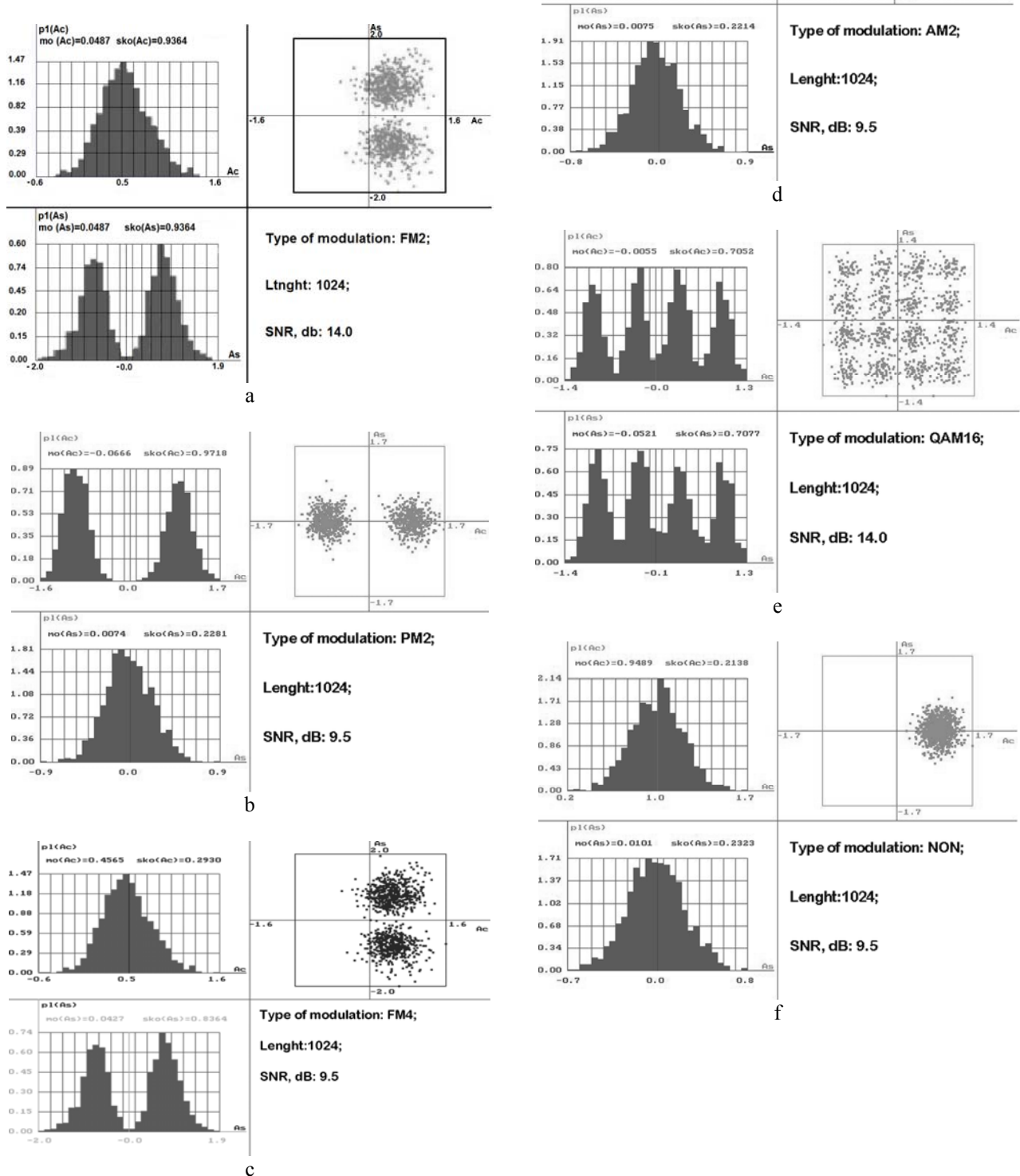


Figure 1 – Histograms of the distributions of the quadrature components of the signal samples with different types of modulation:

a – FM2, b – PM2, c – FM4, d – AM2, e – QAM16, f – NON

manipulation rate in the range of 100–2400 Baud. For each type of signal, training and control samples of 500 realizations with a length of  $N = 1024$  quadrature samples were obtained. The training samples of signals with given TMs were used to evaluate the unknown parameters of the decision rule for recognizing TMs (4–6). Control samples of signals were used to obtain estimates of the quality of recognition of TMs through statistical tests.

The recognition quality of TM signals was evaluated by the following indicators:  $P_{(M/M+1)}$  – the average probability of an erroneous decision-making in favor of signals with a given TMs under the action of signals from the  $(M+1)$ -th class;  $P_{(M+1/M)}$  – the average probability of an erroneous decision-making in favor of signals from the  $(M+1)$ -th class under the action of signals with a given TM;  $P_M$  – the average probability of error due to entanglement of signals within the class of signals with given TMs.

As the  $M$  given signals, signals with the following types of modulation were used: FM2, FM4, QAM16, and signals from the  $(M+1)$ -th class – signals PM2, AM2, NON. The choice of threshold values in decision rule (4–6) was carried out from the condition of ensuring a given probability of recognition of the TMs  $\hat{P}_{cr}$ . The values  $\lambda_i$  determine the sizes of the own areas of the given signals in space  $(A_c, A_s)$  and accordingly affect not only  $P_{(M+1/M)}$  (the probability of “skipping”), but also  $P_{(M/M+1)}$  (the probability of “false alarm”). Fig. 2 shows a diagram of the exchange of quality indicators  $P_{(M/M+1)}$  and  $P_{(M+1/M)}$  obtained at  $N = 1024$  and at a signal-to-noise ratio of 9.54dB.

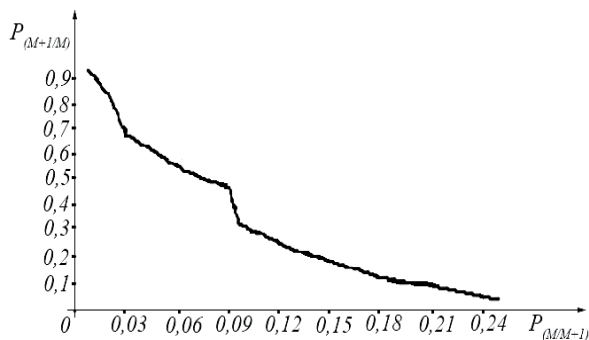


Figure 2 – Diagram of the exchange of indicators of the quality of recognition of given types of signal modulation

From the obtained dependence it follows, that it is impossible to reduce simultaneously both error probabilities. By lowering the threshold values  $\lambda_i$ , the own areas of the given signals are narrowed and the probability of “false alarm” decreases, but at the same time, the probability of “skipping” the given signals increases.

The dependence of the recognition quality of the TMs signals on the duration of their observation  $N$  is of particular interest. This dependence is important, because the parameter  $N$ , unlike  $s/n$  ratio, can be controlled to provide the required quality of recognition of the TMs. Therefore, the dependences of the probability of recognition errors on the length of the implementation of the signals  $N$  were investigated. In studies, for each value  $N = 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024$ , threshold values  $\lambda_i$  were selected based on the conditions for ensuring the required probability  $P_{(M+1/M)} = 0.05$ . The obtained dependences are shown in Fig. 3. It can be seen that at  $N < 64$ , the quality of recognition deteriorates significantly, and at  $N > 256$  an acceptable quality of recognition of TMs is provided.

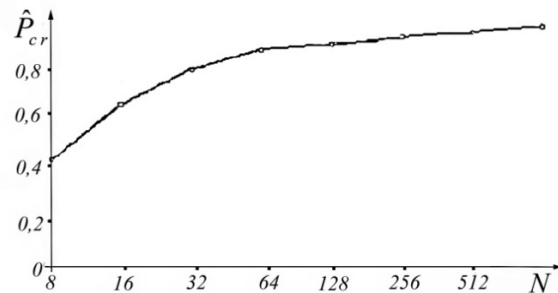


Figure 3 – Dependence of the probability of correct recognition  $\hat{P}_{cr}$  of TMs on the length of signal implementations

## 6 DISCUSSION

From the obtained research results it follows that the considered decision rule for recognizing TMs (2) provides an average probability of correct recognition for all TMs of at least 0.9 with a probability of “false alarm” of not more than 0.02. This corresponds to the real requirements for the quality of recognition of TM signals with automated RM.

The results of the study illustrate the distinctive feature of the proposed method for recognizing given types of modulation in the presence of unknown types of modulation in comparison with traditional methods for recognizing types of signal modulation. In traditional methods of recognizing the types of signal modulation, all unknown types of modulation signals will mistakenly refer to one of the given types of signal modulation. The proposed method for recognizing the given types of modulation uses a two-stage decision-making procedure. In this case, due to the randomness of the observed signals, insignificant probabilities of error in assigning the given types of signal modulation to the class of unknown types of signal modulation  $P_{(M+1/M)}$  and vice versa of unknown types of signal modulation to the given types of signal modulation  $P_{(M/M+1)}$  are possible. The necessary probability of correct recognition of the type of modulation can be achieved by choosing the appropriate duration of the observed signals  $N$ .

## CONCLUSIONS

The solution of the problem of recognition of specified types modulation of signals under conditions of increased a priori uncertainty is considered,

**The scientific novelty.** New recognition method based on the description of signals by probabilistic model in the form of a mixture of distributions are given.

**The practical significance.** The obtained values of the quality indicators recognition are acceptable for the practice of radio monitoring.

**Prospects for further research.** The considered recognition method may be using to solve practical problems of automated radio monitoring.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of Kharkiv National University of Radio Electronics “Development of methods and tools for signal ensemble processing and recognition of radio sources and objects in a priori uncertainty” (state registration number 0121U109792).

## REFERENCES

1. Weber C., Peter M., Felhauer T. Automatic modulation classification technique for radio monitoring, *Electronics Letters*, 2015, Vol. 51, Issue 10, pp. 794–796. DOI: 10.1049/el.2015.0610
2. Huang Yingkun, Weidong Jin, Bing Li, PengGe, Yunpu Wu Automatic Modulation Recognition of Radar Signals, *Based on Manhattan Distance-Based Features*, Access IEEE, 2019, Vol. 7, P. 41193–41204. DOI: 10.3724/sp.j.1087.2011.01730
3. Nandi A. K., Azzouz E. E. Automatic analogue modulation recognition, *Signal Process*, 1995, Vol. 46, No. 2, pp. 211–222. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176783
4. Wu Zhilu, Siyang Zhou, Zhendong Yin, Bo Ma, Zhutian Yang Robust Automatic Modulation Classification Under Varying Noise Conditions, *IEEE Access*, 2017, Vol. 5, pp. 19733–19741. DOI: 10.1109/access.2017.2746140
5. Li Dongjin, Ruijuan Yang, Xiaobai Li, Shengkun Zhu Radar Signal Modulation Recognition Based on Deep Joint Learning, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 48515–48528. DOI: 10.1109/access.2020.2978875
6. Yuanzeng Cheng, Zhang Hailong, Wang Yu Research on modulation recognition of the communication signal based on statistical model, *3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2011, Vol. 3, pp. 46–50. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.583
7. Hassan K., Dayoub I., Hamouda W., Berbineau M. Automatic modulation recognition using wavelet transform and neural network, *9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications*, 2009, pp. 234–238. DOI: 10.1109/ITST.2009.5399351
8. Watanabe S. Methodologies of pattern recognition, Academic Press. Honolulu, University of Hawaii, 1969, 590 p. DOI: 10.1016/C2013-0-12340-9
9. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern classification 2nd Edition. New York, John Wiley & Sons, 2001, 654 p. DOI: 10.1007/s00357-007-0015-9
10. Hau C. C. Handbook of pattern recognition and computer vision. World Scientific, 2016, 584 p. DOI: 10.1142/9503
11. Bezruk V. M., Pevtsov G. V. Theoretical foundations of designing signal recognition systems for automated radio monitoring. Harkov, Kollegium, 2006, 430 p.
12. Bezruk V. M., Kaliuznyi N. M., Qiang Guo, Zheng Yu, Nikolaev I. M. Selection and recognition of the specified radio emissions based on the autoregression signal model, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 2, pp. 7–14. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-1

Received 07.07.2021.

Accepted 25.10.2021.

УДК 621.391

## МЕТОД РОЗПІЗНАВАННЯ ЗАДАНИХ ТИПІВ МОДУЛЯЦІЇ СИГНАЛІВ, ОСНОВАНИЙ НА ЙМОВІРНІСТНІЙ МОДЕЛІ У ВИДІ СУМІШІ РОЗПОДІЛІВ

**Безрук В. М.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедру інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Калюжний М. М.** – канд. техн. наук, с.н.с., завідувач проблемної лабораторії радіомоніторингу та обробки радіотехнічної інформації Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

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

**Guo Qiang** – PhD, професор, завідувач аспірантурою та магістратурою Інституту інформації та телекомунікації Харбінського інженерного університету, КНР.

**Zheng Yu** – PhD, професор, завідувач кафедру мікро- та наноелектроніки Циндаоського університету, Китайська народна республіка.

## АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** У статті розглянуті особливості вирішення нетрадиційної задачі розпізнавання заданих типів модуляції сигналів в автоматизованому радіомоніторингу. Практичні особливості такої задачі визначають підвищену апріорну невизначеність, яка полягає у відсутності апріорних відомостей про щільності ймовірностей розподілу заданих сигналів і наявності невідомих сигналів.

**Мета.** Запропоновано вирішення задачі з використанням нетрадиційного методу розпізнавання статистично заданих випадкових сигналів при наявності невідомих сигналів. У цьому методі припускається, що для заданих сигналів мається класифікована навчальна вибірка реалізацій, по якій оцінюються невідомі параметри їх розподілу, а також деякі порогові значення, що визначають ймовірності правильного розпізнавання заданих типів модуляції сигналів при наявності невідомих сигналів.

**Метод.** Обговорюється загальне вирішення задачі розпізнавання заданих сигналів у присутності невідомих сигналів та приводиться метод розпізнавання заданих типів модуляції, оснований на описі сигналів ймовірнісною моделлю у виді суміші розподілів. Метод базується на описуванні сигналів ймовірнісною моделлю у виді суміші розподілів і побудові замкнутої області для заданих сигналів у ймовірнісному просторі сигналів.

**Результати.** Проведені дослідження задачі розпізнавання заданих типів модуляції сигналів шляхом статистичних випробувань на вибірках відповідних сигналів, характерних для автоматизованого радіомоніторингу засобів зв'язку. При цьому вирішувальне правило розпізнавання заданих типів модуляції сигналів програмно реалізовано на ЕОМ. У результаті проведених статистичних випробувань на контрольних вибірках сигналів отримані оцінки ймовірностей правильного розпізнавання заданих типів модуляції сигналів при наявності невідомих сигналів.

**Висновки.** Отримані прийнятні для практики радіомоніторингу значення показників якості розпізнавання типів модуляції сигналів. Досліджені залежності показників якості від деяких умов і параметрів розпізнавання. У результаті проведених досліджень отримано практичні рекомендації по використанню запропонованого методу розпізнавання заданих типів модуляції сигналів у системах автоматизованого радіомоніторингу.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** автоматизований радіомоніторинг, радіовипромінювання, сигнал, тип модуляції, ймовірнісна модель, метод розпізнавання, статистичні випробовування, ймовірність правильного розпізнавання.

УДК 621.391

## МЕТОД РАСПОЗНАВАНИЯ ЗАДАНЫХ ТИПОВ МОДУЛЯЦИИ СИГНАЛОВ, ОСНОВАННЫЙ НА ВЕРОЯТНОСТНОЙ МОДЕЛИ В ВИДЕ СМЕСИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ

**Безрук В. М.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-сетевой инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Калиужный Н. М.** – канд. техн. наук, с.н.с., заведующий проблемной лаборатории радиомониторинга и обработки радиотехнической информации Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Семенец В. В.** – д-р техн. наук, профессор, ректор Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Guo Qiang** – PhD, профессор, Заведующий аспирантурой и магистратурой Института информации и телекоммуникаций Харбинского инженерного университета, КНР.

**Zheng Yu** – PhD, профессор, заведующий кафедрой микро- и нанoeлектроники Циндаоского университета, Китайская народная республика.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В статье рассмотрены особенности решения нетрадиционной задачи распознавания заданных типов модуляции сигналов в автоматизированном радиомониторинге. Практические особенности этой задачи определяют повышенную априорную неопределенность, которая заключается в отсутствии априорных сведений о плотностях распределения заданных сигналов и наличии неизвестных сигналов.

**Цель.** Предложено решение задачи с использованием нетрадиционного метода распознавания статистически заданных случайных сигналов при наличии класса неизвестных сигналов. В этом методе полагается, что для заданных сигналов имеется классифицированная обучающая выборка реализаций, по которой оцениваются неизвестные параметры их распределений, а также некоторые пороговые значения, определяющие вероятности правильного распознавания заданных видов модуляции сигналов при наличии неизвестных сигналов.

**Метод.** Обсуждается общее решение задачи распознавания заданных сигналов в присутствии неизвестных сигналов и приводится метод распознавания заданных типов модуляции. Метод основан на описании сигналов вероятностной моделью в виде смеси распределений и построении замкнутой области для заданных сигналов в вероятностном пространстве сигналов.

**Результаты.** Проведены исследования задачи распознавания заданных типов модуляции сигналов путем статистических испытаний на выборках соответствующих сигналов, характерных для автоматизированного радиомониторинга средств связи. При этом решающее правило распознавания заданных типов модуляции сигналов программно реализовано на ЭВМ. В результате проведенных статистических испытаний на контрольных выборках сигналов получены оценки вероятностей правильного распознавания заданных типов модуляции сигналов при наличии неизвестных сигналов.

**Выводы.** Получены приемлемые для практики радиомониторинга значения показателей качества распознавания типов модуляции сигналов. Исследованы зависимости показателей качества от некоторых условий и параметров распознавания. В результате проведенных исследований получены практические рекомендации по использованию предложенного метода распознавания заданных типов модуляции сигналов в системах автоматизированного радиомониторинга.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** автоматизированный радиомониторинг, радиоизлучение, сигнал, тип модуляции, вероятностная модель, метод распознавания, статистические испытания, вероятность правильного распознавания.

### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Weber C. Automatic modulation classification technique for radio monitoring / C. Weber, M. Peter, T. Felhauer // Electronics Letters. – 2015. – Vol. 51, Issue 10. – P. 794–796. DOI: 10.1049/el.2015.0610
2. Automatic Modulation Recognition of Radar Signals / [Yingkun Huang, Weidong Jin, Bing Li, PengGe, Yunpu Wu] // Based on Manhattan Distance-Based Features. – 2019. – Access IEEE. – Vol. 7. – P. 41193–41204. DOI: 10.3724/sp.j.1087.2011.01730
3. Nandi A. K. Automatic analogue modulation recognition / A. K. Nandi, E. E. Azzouz – Signal Process. – 1995. – Vol. 46, No. 2. – P. 211–222. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.176783
4. Wu Zhilu. Robust Automatic Modulation Classification Under Varying Noise Conditions / Zhilu Wu, Siyang Zhou, Zhendong Yin, Bo Ma, Zhutian Yang // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 19733–19741. DOI: 10.1109/access.2017.2746140
5. Radar Signal Modulation Recognition Based on Deep Joint Learning / [Dongjin Li, Ruijuan Yang, Xiaobai Li, Shengkun Zhu] // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 48515–48528. DOI: 10.1109/access.2020.2978875
6. Yuanzeng Cheng. Research on modulation recognition of the communication signal based on statistical model / Cheng Yuanzeng, Zhang Hailong, Wang Yu // 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – 2011. – Vol. 3. – P. 46–50. DOI: 10.1109/ICMTMA.2011.583
7. Hassan K. Automatic modulation recognition using wavelet transform and neural network / [K. Hassan, I. Dayoub, W. Hamouda, M. Berbineau] // 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications. – 2009. – P. 234–238. DOI: 10.1109/ITST.2009.5399351
8. Watanabe S. Methodologies of pattern recognition / S. Watanabe. – Academic Press. – Honolulu : University of Hawaii, 1969. – 590 p. DOI: 10.1016/C2013-0-12340-9
9. Duda R. O. Pattern classification 2nd Edition / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – New York : John Wiley & Sons, 2001. – 654 p. DOI: 10.1007/s00357-007-0015-9
10. Hau C. C. Handbook of pattern recognition and computer vision. / C. C. Hau. – World Scientific, 2016. – 584 p. DOI: 10.1142/9503
11. Bezruk V. M. Theoretical foundations of designing signal recognition systems for automated radio monitoring / V. M. Bezruk, G. V. Pevtsov. – Harkov: Kollegium, 2006. – 430 p.
12. Selection and recognition of the specified radio emissions based on the autoregression signal model / [N. M. Kaliuznyi, Qiang Guo, Zheng Yu, I. M. Nikolaev] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – No. 2. – P. 7–14. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-1

## MODELING COMMUNICATION SYSTEMS TO STUDY THE EFFECT OF INTERFERENCE IN THE TRANSMISSION MEDIUM

**Kvasnikov V. P.** – Professor, Dr. Sc., Head of Computerized Electrical Systems and Technologies Department of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Yehorov S. V.** – PhD, Associate Professor of Computerized Electrical Systems and Technologies Department of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Shkvarnytska T. Yu.** – Associate Professor, PhD, Associate Professor of Computerized Electrical Systems and Technologies Department of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Ornatskyi D. P.** – Dr. Sc., Professor of Computerized Electrical Systems and Technologies Department of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

**Kataieva M. A.** – PhD, Associate Professor of Computerized Electrical Systems and Technologies Department of the National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The problem of creating a model of transmission and transformation of information has been resolved, the processes of information transformation in transmitters and receivers have been considered, the process of influence of the destabilizing factors in the communication channel has been investigated.

**Objective.** The study aims to create a mathematical model of the communication channel, taking into account the destabilizing factors that affect the transmission channel and control the correctness of the communication channel model.

**Method.** A mathematical model, which evaluates the stability of the signal in the communication channel at the stage of designing telecommunication systems for various purposes, taking into account the effects of destabilizing factors in the environment of information signal transmission, is proposed. It is also a proposed method of determining the parameters of information signals in the communication channel and the increase in the bandwidth during exposure of external destabilizing factors on the signal transmission medium in the communication channel.

**Results.** A mathematical model of the communication channel was obtained, which takes into account external destabilizing factors that can affect the communication channel and equipment. The developed model contains a method of verification, which allows determining its correctness.

**Conclusions.** The method of information transfer has been improved by adding a verification method. The value of the bit error obtained during the simulation of the communication channel coincides with the value of the bit error during the verification process, which indicates the correctness of the considered mathematical model of the communication channel. The modeling of the communication channel confirmed the adequacy of the proposed method of modeling the communication system, so this method can be recommended for use in the design and research of telecommunications systems.

**KEYWORDS:** communication channel, modulation, communication quality, signal recovery, demodulation, filtering.

### ABBREVIATIONS

QPSK is a Quadrature Phase Shift Keying;  
MIMO is a Multiple Input Multiple Output;  
OFDM is an Orthogonal Frequency-Division Multiplexing;  
LC-RoF is a linear-cell-based radio-over-fiber;  
LTE is a Long-Term Evolution;  
VLC is a Visible Light Communication;  
PLC is a Power Line Communication;  
BER is a Bit Error Rate;  
AWGN is an Additive White Gaussian Noise;  
BPM is a binary phase manipulation.

### NOMENCLATURE

$M$  is the number of characters in the alphabet;  
 $R$  is a source performance;  
 $T_M$  is a time interval;  
 $k$  is the number of binary units of information in one character;  
 $T$  is a signal duration;  
 $n$  is the number of binary signals;  
 $E$  is the energy that falls on the  $M$ -th symbol;  
 $E_2$  is the energy per binary unit (bit) of the source;

$S$  is a signal strength;  
 $P_{e2}$  is a probability of error in binary;  
 $P_e$  is a probability of erroneous character reception;  
 $P_{eim}$  is an equivalent probability of error;  
 $f_0$  is a frequency  
 $t$  is a time;  
 $a$  is an independent coefficient;  
 $b$  is an independent coefficient;  
 $\theta$  is a signal phase;  
 $s(t)$  is a full signal emitted at any time  
 $N$  is a noise power;  
 $\gamma$  is a signal-to-noise power ratio;  
 $\gamma_2$  is a normalized signal-to-noise ratio.

### INTRODUCTION

The design of telecommunication systems requires a careful study of the principles of information, the properties of communication channels, as well as existing systems for transmitting and receiving signals. The rapid pace of development of science and technology has caused the growth of industry and telecommunications services.



Selecting and designing a communication channel without proper study of the systems that affect the transmission medium can lead to complete or partial data loss. The first step in preventing the loss of information in communication channels during the development of data transmission systems is to model the processes of conversion and transmission of information taking into account external influences.

The task of developing a mathematical model of transmission and transformation of information, including transmitter and receiver, is relevant and determines the direction of research.

**The object of the study** is the process of formation, transmission, and recovery of radio signals.

**The purpose of the study** is to create a mathematical model of a communication system that takes into account the destabilizing factors that act on the transmission channel and controls the correctness of the communication channel model.

## 1 PROBLEM STATEMENT

In almost every electrical measurement or generated signal, there are unwanted components that mix with the useful signal. Noise is an unwanted component of a signal from any source. If the required signals are very weak, they can be completely lost against a background of higher noise levels.

In general, sources of unwanted noise power can be classified as internal or external noise. Internal noise occurs when unwanted random signal power appears at the output of an electronic device, despite its absence at the output of the device that generates the useful signal. Internal noise is generated inside the device. On the other hand, the power of external noise is regarded as combined unwanted sources of electrical signal that are received by the device from any external source.

All the above facts are the cause of errors in detecting a useful signal. To avoid such errors, it is necessary at the stage of designing communication systems to analyze the resistance of the system to external and internal interference using mathematical modeling.

To achieve this goal, a mathematical model was proposed, the essence of which is as follows. It is suggested to choose a mathematical model of the communication system as input data. This model should receive information modulating signals that can be obtained using a random number generator. In the mathematical model of the transmitter, the carrier frequency signals are modulated. These signals are summed and transmitted to the communication channel, where they are exposed to external influences generated by the simulation system. In the receiver, the additive mixture of signals is restored by a demodulator, which is described by the difference equation and uses bandpass filters. The degree of similarity of the recovered signal to the modulating signal in the communication channel model is estimated by the probability of bit error by comparing the signal at the input of the communication system model and the output of the model. The Bit Error Rate Analysis Tool of the MATLAB

software package is used to verify the correct operation of the communication system model.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

In [1] the methods and algorithms of frame synchronization used in multi-antenna radio communication systems for orthogonal space-time block coding were considered. However, it did not evaluate the noise immunity of the signal when using QPSK modulation, which is not entirely consistent with the integrity of the information during the transmission session over the communication channel.

In the study [2] a method for solving the problem of identification of emergencies in the power supply system on the railway, using set theory, was proposed. However, the issue of transmitting diagnostic information to a remote operator was not addressed and the effect of destabilizing factors on the communication channel was not assessed. Such assessment is necessary to ensure the integrity of the information. In addition, due to remote monitoring of the system parameters, it is possible to identify an emergency or prevent its occurrence more quickly.

A complex mathematical model of a MIMO communication channel is proposed in [3]. The destabilizing factor is the additive Gaussian white noise there, which is common in the design of radio communication systems. This is because the additive Gaussian white noise refers to the fluctuation noise, which is represented as the sum of several independent oscillations. Fluctuation noise is a stationary ergodic random process with a Gaussian (normal) probability distribution, according to the central limit theorem. The spectral power density of the fluctuation noise always depends on the nature of the physical process of its formation. Most of the interferences that occur in practice belong to the group of additive interferences. This paper does not consider the effect of unintentional interference on the communication channel.

In [4] the noise immunity of existing radio lines with noise-like signals and digital types of modulation was investigated. To increase the noise immunity of communication systems, it was proposed in [4] to use non-stationary signal structures with variable center frequency and power spectral density. However, when assessing the potential noise immunity of radio lines, only the probability of a symbolic error in the radio channel is taken into account, which does not allow to take effective measures to adapt to the situation in the communication channel.

The study [5] developed a system of quantitative indicators of information security of the marine infrastructure. However, mathematical models of the communication system have not been developed and the impact of external influences on the communication channel has not been assessed, which indicates the lack of stability of the communication system used to external influences of intentional and unintentional interference.

In [6], the possibility of increasing LTE performance by using MIMO systems and frequency distribution methods is proposed. The authors [6] used OFDM technology. Analysis of the operation of OFDM technology

showed that in the case of spectrum-concentrated interference, it is impossible to translate the carrier frequency signal into another range. As a result, some of the information transmitted over the communication channel will be lost because the frequency range through which the information is transmitted has been affected by external interference. As a result, the authors of [6] did not sufficiently substantiate the noise immunity to intentional and unintentional interference of the developed transmission channel using LTE technology.

The study [7] considered a system with changing parameters and used the difference-phase modulation of the second order, as well as the resistance of such a system to additive interference. As a result, it was possible to reduce the Doppler effect caused by the movement of the object and interference in the communication channel. Improving the quality of communication using the method proposed in [7] is due to the use of Phase-Difference Modulation. However, the effects of artificial interference were not taken into account, which certainly led to a deterioration in the quality of communication.

[8] considers the LC-RoF radio communication system, which allows transmitting mobile communication without hard transmissions during high-speed train movement. Hard transmissions occur when the range of radio transmitters is exceeded. As a result, the user may lose connection to the Internet or data. The developed system was tested on a Shinkansen high-speed train owned by the West Japan Railway Company. The LC-RoF system can have two configurations: routing with wavelength division and routing based on an optical switch. When testing the LC-RoF radio system, only less efficient routing systems based on an optical switch were used. Scientists in [8] did not fully take into account the effect of external interference of artificial origin on the optical and radio data transmission.

In [9], a rather promising data transmission system was proposed, which combines VLC (Visible Light Communication) and PLC (Power Line Communication) technologies. As for disadvantages of the developed system in [9], it is shown that in the case of PLC, the transmission medium is shared between all subscribers, and the quality of the data transmission medium depends on the installation quality of the power supply system and is exposed to shortwave radio transmitters. The PLC signal transmission medium to the first transformer junction is running. It is shown that PLC modems will be affected by low-quality power consumers. When using the VLC system, subscribers must be in the line of sight, and the quality of data transmission depends on the operating conditions. It is known that the VLC system is negatively affected by solar radiation. The disadvantage is that the issue of intentional interference to the communication channel has not been fully addressed.

In [10], a high-frequency radio communication system with a millimeter band of 41 GHz was proposed. To protect against the effects of atmospheric phenomena, the authors proposed to use narrowly directed antennas with a high gain. The disadvantages of this system include the

fact that the transmitter and receiver of the radio signal must be in the line of sight, which complicates the application on rough terrain. However, when assessing the potential noise immunity of radio lines, the probability of a symbolic error in the radio channel is not investigated, which does not allow to take effective measures to adapt to the situation in the communication channel.

In [11], a chaotic scrambling algorithm was used to increase the stability of the communication system from artificial interference. Gaussian noise was added to the mathematical model to be studied to model the communication channel. As a disadvantage, it should be noted that the probability of bit error was not estimated. This disadvantage does not fully assess the resistance of the proposed algorithm to artificial interference.

Scientists in [12] solved the problems of design and analysis of control protocols for discrete-time multi-agent systems of the second order. Interference related to the time delay on equipment and communication channel has been simulated. The disadvantage of this study is that the effect of artificial interference on the communication channel has not been evaluated.

In [13] the problem of control of energy consumption and distribution of resources in the radio communication system was solved. As a disadvantage of this work, it should be noted that the quality of interference to the communication channel was taken into account only fluctuating interference. Other types of artificial interference were not considered.

In [14] the research of the system of mobile access points using millimeter waves for communication of high-speed trains, and the design of the extended system of mobile access points, including the specification of the physical layer and the single-frequency network, is presented. Experimental studies were conducted on the Seoul subway line. The simulation results showed that the extended system of mobile access points can provide broadband mobile wireless communication with a peak data rate exceeding 5 Gbps at a train speed of 500 km / h. However, when assessing the immunity of radio lines, the probability of a symbolic error in the radio channel is not investigated, which does not allow us to take effective measures to adapt to the situation in the communication channel.

A group of researchers in [15] considered the characteristics of the channel in the range of millimeter waves of the 5G communication standard for typical routes of high-speed rail communication system, including urban, rural, and tunnel, with straight and curved route shapes. Based on the obtained results, proposals were made to improve the symbol rate, subframe bandwidth, and polarization configuration for use in the design of a 5G communication system on typical routes of a high-speed railway communication system. However, when assessing the immunity of radio lines, the probability of a symbolic error in the radio channel is not investigated, which does not allow us to take effective measures to adapt to the situation in the communication channel.

The efficiency of receivers and transmitters in noisy conditions depends on the choice of modulation methods, coding, and scheme of the receiver and transmitter. In works [1–15] this is not fully taken into account.

### 3 MATERIALS AND METHODS

Binary systems use two waveforms to transmit source binary symbols, each of which may contain one binary unit (or one bit) of information. However, with a larger alphabet of signals, each symbol sent can carry much more information. In particular, the alphabet containing  $M$  characters ( $M$  different signals) allows you to transmit binary units of information for each sent character.  $M$ -th signals can be formed by multi-position manipulation of the oscillations of the carrier in the amplitude, frequency, phase.

The block diagram of a typical data transmission system is shown in Fig. 1. It is assumed that the message source generates statistically independent equally probable binary symbols with a rate of  $R$  symbols per second, where  $R$  is the performance of the source. This assumption is valid because the message of any source can be converted into a sequence of equally probable binary characters using the appropriate encoding method. Each symbol of the source in question carries one binary unit of information. Over the time interval, the  $T_M$  source creates one of the  $M = 2^{RT_M}$  different equal-sequence sequences of binary symbols, each of which contains  $RT_M$  binary units of information.

The encoder divides the sequence generated by the source into blocks with  $k = RT_M$  symbols in each and sends a command to the modulator to generate one of the  $M = 2^k$  possible signals. In binary systems,  $k = 1$  and the modulator selects only two possible signals with a duration of  $T = T_M = 1 / R$  each. When using coding with algebraic binary code, the encoder receives blocks with  $k > 1$  source symbol. The encoder sends to the modulator a command to generate one of  $M = 2^k$  different sequences (codewords); any such sequence consists of  $n$  binary signals (where  $n > k$ ) with duration  $T = TM / n$  each. During the reception, the demodulation of individual binary signals with a duration of  $T$ , and not the whole sequence, the duration of which is equal to  $T_M$ . Then the demodulation

results are fed to a logic circuit that converts  $n$  decisions made by the demodulator into  $k$  information symbols. In the  $M$ -th system, the encoder also receives blocks with  $k > 1$  binary source symbols and sends a command to the modulator to generate one of the  $M = 2^k$  different signals with a duration of  $T_M$ . However, in the receiver, the incoming signal is considered indivisible and is processed as a whole.

The modulator sends the selected signal to a communication channel in which this signal is distorted by additive white Gaussian noise. Depending on the context, the signal transmission speed will be understood as either the  $M$ -symbol transmission rate ( $1 / T_M$ ) or the source performance ( $1 / T$ ).

On the receiving side, in the case of a binary system without encoding information, a decision is made on the incoming signal as to which symbol was transmitted, and one of two possible values is issued. This eliminates the need for a decoder because the result of the decision (detection) is directly a binary digit that contains one binary unit of information. In a binary system with algebraic coding under the action of each binary signal, the demodulator (the first decision circuit) produces one of two possible values of its output value, and then the decoder converts each block of the output values of the demodulator into a sequence of  $k$  binary symbols. In  $M$ -systems, the demodulator converts each  $M$ -signal into one of the  $M$  possible values of its output value. In turn, the decoder for each of the  $M$  possible values of the input signal produces a certain sequence of  $k$  binary characters.

An objective comparison of so many different systems is quite a difficult task. If the frequency band of the system is insignificant (this assumption is often true when using  $M$ -signals or algebraic codes), it is more appropriate to compare systems at the same data rate.

The energy per binary unit (bit) of the source  $E_2$  is related to the energy  $E$  on the  $M$ -th symbol represented by the formula

$$E_2 = \left(\frac{1}{k}\right)E,$$

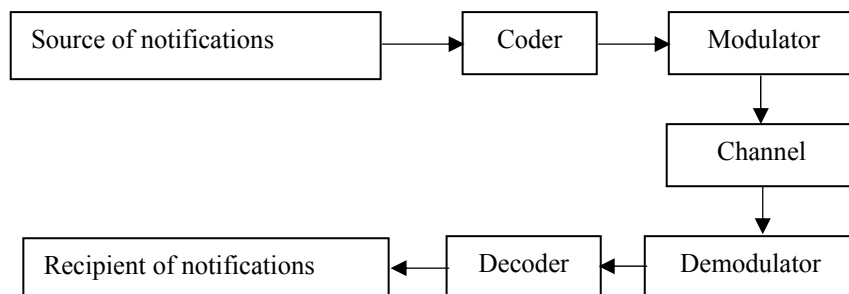


Figure 1 – Block diagram of the data transmission system

where  $k$  is the number of binary units of information in one character. The signal strength  $S$ , at a fixed performance of the source  $R$ , is determined by the formula:

$$S = E^2 R.$$

When comparing communication systems, it is proposed to use the probability of erroneous reception of the symbol, rather than the probability of erroneous reception of the binary unit, because between these two quantities there is no single universal deterministic relationship. Such specific relationships can be formulated for individual cases. Probably the most general assumption that will link the probability of erroneous reception of a character with the probability of erroneous reception of a binary unit is the following: if any  $M$ -th character is received incorrectly, the decoder randomly selects  $k$  binary characters corresponding to each of the others ( $2^{k-1}$ )  $M$  characters. Further, if there is a set of  $M$   $k$ -bit binary sequences, then  $M/2$  of them contain in some arbitrary digit binary number 1, and the rest  $M/2$ -binary number 0. Then from  $2^{k-1}$  possible erroneous solutions,  $2^{k-1} - 1$  contain in this digit the same binary number as the transmitted sequence. The remaining  $2^{k-1}$  sequences contain the opposite number in this digit. Under such assumptions, the average probability of erroneous reception of the binary unit (the probability of error in binary digit)  $P_{e2}$  is related to the probability of erroneous reception of the symbol  $P_e$  by the ratio

$$P_{e2} = \left( \frac{2^{k-1}}{2^k - 1} \right) P_e = \left( \frac{1}{2} \right) \frac{P_e}{\left( 1 - \frac{1}{2^k} \right)}. \quad (1)$$

In this case, relation (1) indicates the probability limit of erroneous reception of the symbol  $P_e$ :

$$P_{e2} \leq \frac{P_e}{2(1 - 2^{-k})}. \quad (2)$$

For large  $k$ , the limit defined by (2) practically coincides with

$$P_{e2} \leq 0.5 P_e.$$

If the bandwidth of the system is limited, it is advisable to compare systems that occupy the same radio frequency band. Unfortunately, the spectrum width of the  $M$ -th or coded signal depends on the type of system. For signals with multi-position amplitude manipulation (multi-level signals), the width of the signal spectrum is essentially independent of  $M$ . However, at large  $M$ , this method of manipulation does not provide sufficient noise immunity during radio communication. When using frequency-manipulated or other orthogonal signals most commonly used in radio communications, the bandwidth of the system is proportional to  $M$ . At the same time, in all these systems, the data rate is proportional only to

$\log_2 M$ . Assuming that the value of  $M$  and the data rate are given, the graph of the probability of erroneous symbol reception from the signal-to-noise ratio can be considered as a curve taken at some fixed bandwidth of the system (in the whole range of signal-to-noise ratio).

It is shown that a more objective characteristic of the noise immunity of a discrete communication system than the probability of erroneous reception of the symbol  $P_e$  and the probability of erroneous reception of the binary unit  $P_{e2}$  is the equivalent probability of error  $P_{err}$ . It is defined as the probability of error in the binary channel when transmitting without redundant coding, in which the probability of error-free reception of a long segment of the message is the same as in this system. In particular, in the case of  $M$ -position redundant coding, it is possible to determine the equivalent probability of Rape error by the expression

$$P_{err} = \frac{P_e}{\log_2 M}.$$

The problem of integrated design of communication systems, which usually consists of a compromise between the quality of the system, data rate, and bandwidth is a task with many unknowns and does not always allow to find a single universal basis for comparing communication systems. using  $M$  or coded signals.

The transmission of information through the use of several phases of the same tone signal is a natural generalization of the method of binary phase manipulation.

Consider a four-phase system in which when using a binary signal BPM with phases, for example,  $0^\circ$ – $180^\circ$  can be transmitted completely independently, for coherent detection, on the same carrier another binary signal with phases  $90^\circ$ – $270^\circ$ . One signal can be considered as a result of balanced modulation (multiplication by  $\pm 1$ ) oscillations  $\cos 2\pi f_0 t$ , and the other as a result of balanced modulation of oscillations  $\sin 2\pi f_0 t$ . The input signal after filtering is fed to two coherent detectors. One of them uses the reference oscillation of the species  $\cos 2\pi f_0 t$  (with compensation for phase shifts occurring in the transmission medium and the receiver filters) and emits the first signal and in-phase noise component. Another coherent detector uses a reference oscillation of the form  $\sin 2\pi f_0 t$  and extracts the second signal and the quadrature component of the noise. It is shown that at any given moment of the hour, for example, at the moment of seeing a two-way virtual scheme, offending warehouses to the noise of an area. In such a rank, with the same smoothness of frequencies, it is possible to improve the speed of transmissions. According to the average value of the recipient, two units of the visa are assigned to  $ST/n_0$ , wherein in this case,  $S$  is the power of one of the two quadrature signals. Hence, to double the transmission speed with a constant probability of erroneous reception requires doubling the radiated power. It is established that there are no other values of the carrier phases that could be used to transmit another signal of binary BPM, free from cross-interference from the already considered two

quadrature signals. This does not mean that other binary BPM signals can be transmitted on this carrier, for example, with phase values of  $45^\circ$ – $225^\circ$  і  $135^\circ$ – $315^\circ$ . It is established that due to the presence of crosstalk, which reduces the signal resolution in the additive noise, the total radiation power should grow not in proportion to the number of binary signals combined, but much faster.

In the above case, the formation of binary signals BPM on each of the quadrature components of the carrier, the signal emitted at any time can be represented by the expression

$$s(t) = a \cos 2\pi f_0 t + b \sin 2\pi f_0 t,$$

where for each signal element  $a$  and  $b$  are independent and take the value  $+1$  or  $-1$ . It is known that the signal emitted at any time can be recorded as

$$s(t) = \sqrt{2} \cos(\cos 2\pi f_0 t + \theta), \quad (3)$$

where  $\theta$  takes one of the values  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ . Thus, the previously considered sum of two signals with phase values of  $0^\circ$  or  $180^\circ$  and  $90^\circ$  or  $270^\circ$  can be represented as a signal with one of the four possible phase values ( $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$ ,  $315^\circ$ ) carrying two binary units of information. Summarizing (3) in the case of  $M$  phases, we obtain that each signal element of duration  $T$  can be written as

$$s(t) = \sqrt{S2} \cos(\cos 2\pi f_0 t + \theta), \quad 0 < t < T, \quad (4)$$

where  $\theta$  is one of the many equidistant values obtained, for example (Fig. 2) from the expression

$$\theta_m = (2\pi / M)(m-1), \quad m = 1, \dots, M.$$

An integer power of 2 is selected as  $M$ :  $M = 2^k$ .

The power  $S$  in (4) is the power of the full received signal.

We will be interested in measuring the value of the phase  $\theta$ . To do this, you can simply use a conventional phase detector with a reference voltage of the form  $\theta$ . Such a detector detects  $\cos \theta_m$ . This feature is ambiguous [ $\cos \theta_m = \cos(2\pi - \theta_m)$ ] and only in the binary case when  $\theta = 0$  or  $\pi$  ambiguity is eliminated. Phase determination  $\theta$  is performed using two-phase detectors with a reference voltage of the form  $\cos 2\pi f_0 t$  and  $\sin 2\pi f_0 t$  a logic circuit that determines the ratio of certain components of the signal. One of the modulator options is a circuit that uses  $M$  coherent or phase detectors with a reference voltage of the form  $\cos(\cos 2\pi f_0 t + \theta_m)$  and selects the solution for the maximum (algebraic) output signal. This rule of the decision follows directly from the criterion of maximum plausibility.

In Fig. 2 shows a variant when  $M = 8$ . Angle  $\pi / \theta$  is the zone of correct reception if the phase value is transferred  $\theta_1 = 0$ . Assume that a signal with  $\theta = 0$  has been transmitted. Let us denote the in-phase and quadrature noise components at the input of the phase detector (connected after the bandpass filter) by  $x(t)$  and  $y(t)$ , respectively. It's known that the input voltage detector is as follows

$$v(t) = [\sqrt{2S} + x(t)] \cos 2\pi f_0 t - y(t) \sin 2\pi f_0 t, \quad (5)$$

where  $S$  is the signal strength, and  $N = \bar{x}^2 = \bar{y}^2$  – noise power, because the possible values of the signal phase differ from each other in magnitude  $2\pi/M$ , then, as can be seen from Fig. 2, the reception will be correct if the phase of the voltage is determined (5) differs in absolute value from the phase of the transmitted signal by no more than  $\pi/M$ . The exact expression for the probability of erroneous character reception has the form

$$P_e = 1 - \left( \frac{1}{2\pi} \right)^{\frac{\pi}{M}} \int_{-\frac{\pi}{M}}^{\frac{\pi}{M}} e^{-\gamma} \left[ 1 + \sqrt{4\pi\gamma} \cos \theta e^{\gamma \cos^2 \theta} \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right) \int_{-\infty}^{\sqrt{2\gamma} \cos \theta} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right] d\theta,$$

where the ratio of signal power/noise to interference power at the detector input is indicated by  $\gamma = \frac{S}{N}$ .

If a matched filter is used, then

$$\gamma = S/N = E/n_0,$$

where  $E$  is the energy of the signal element corresponding to the  $M$ -th symbol. The normalized signal-to-noise ratio is defined as the signal-to-noise ratio per binary unit of information:

$$\gamma_2 = \gamma / k = \gamma / \log_2 M$$

or for the case of an agreed filter

$$\gamma_2 = E_2/n_0 = E/kn = E/n_0 \log_2 M.$$

If we record the speed of information transmission, it is obvious that maintaining a constant probability of erroneous reception of the symbol with increasing  $M$  it is necessary to increase the normalized signal-to-noise ratio  $\gamma_2$  in proportion to  $M^2 \log_2 M$ . The required frequency band decreases in proportion to  $\frac{1}{M}$ . If we consider the frequency band to be fixed, then to keep the probability of erroneous reception of the symbol constant with increasing  $M$ , it is necessary to increase the normalized signal-to-noise ratio  $\frac{M}{\log_2 M} \gamma_2$  also proportionally. While the speed of information transfer increases proportionally  $\log_2 M$ . Note, however, that due to the increase in transmission rate, the signal power  $S$  should increase in  $\frac{M}{\log_2 M}$  proportion to  $M^2$ , and not.

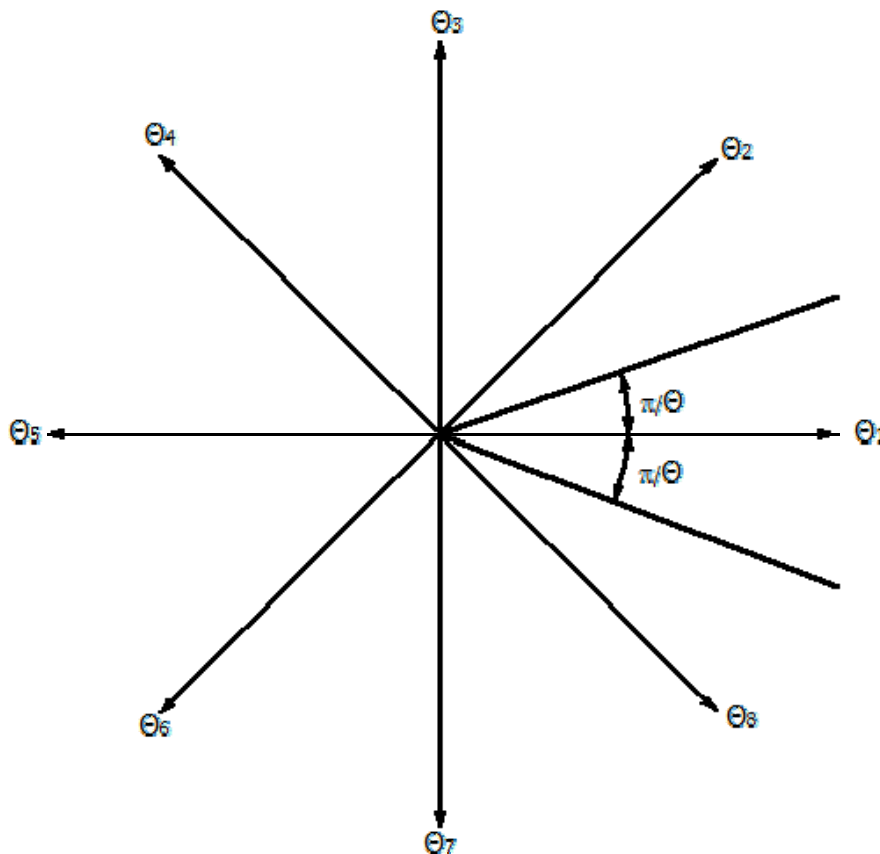


Figure 2 – The formation of the signal of the  $M$ -DFM (Fig.  $M = 8$ )

Assuming that when erroneously receiving any  $M$ -character, the decoder randomly selects  $k$  binary characters corresponding to any of the remaining  $2^k - 1$   $M$ -characters, then the probability of erroneous reception of the binary unit is associated with the probability of erroneous reception of the symbol relation (1) and, therefore, the above dependencies for the probability of erroneous reception of the symbol will also be valid for the probability of erroneous reception of the binary unit. However, in the case of multi-position FM, as follows from Fig. 2, the most probable errors are those in which the receiver instead of the phase of the transmitted signal is fixed to the adjacent phase value, and not some other. If we now choose a method of converting binary symbols to  $M$ , in which signals with adjacent phase values are represented by binary sequences that differ only in one digit (as, for example, in the Gray code), then each erroneous reception of the  $M$ -symbol will most likely mean error in only one digit of the binary sequence of  $k$  digits. In the limit (which at very high signal/noise ratios)

$$P_{e2} = (1/k)P_e = (1/\log_2 M)P_e. \quad (6)$$

Equations (6) and (1) reflect the two extreme cases that characterize the relationship between the probability of erroneous reception of the binary unit and the probability of erroneous reception of the  $M$ -th symbol. In both cases, these probabilities are related by some algebraic coefficient, and the nature of the change in the probability

of erroneous symbol reception as a function of signal energy in the presence of additive Gaussian noise is still largely determined by the exponential dependence on  $\frac{\gamma}{M^2}$ . Thus, with multi-position binary phase manipulation for any  $M > 4$ , the required signal strength should increase approximately proportionally  $M^2$ .

#### 4 EXPERIMENTS

A complete simulation of the communication system was performed to determine and verify the calculated parameters and model the interference in the communication channel. An example of such a model is shown in Fig. 3.

Description of the means of estimating the parameters of the communication system model, shown in Fig. 3:

1. The Error Rate Calculation block compares the input data from the transmitter with the output data of the receiver. The length of the filters must be taken into account in the block settings.
2. The Constellation Diagram allows you to observe the phase constellation.
3. The Spectrum Analyzer unit allows you to monitor the signal at the output of the communication channel.
4. The Find Delay block allows you to compare the received and transmitted signal, to find the probability of a bit error without knowing about the delay in the received signal.

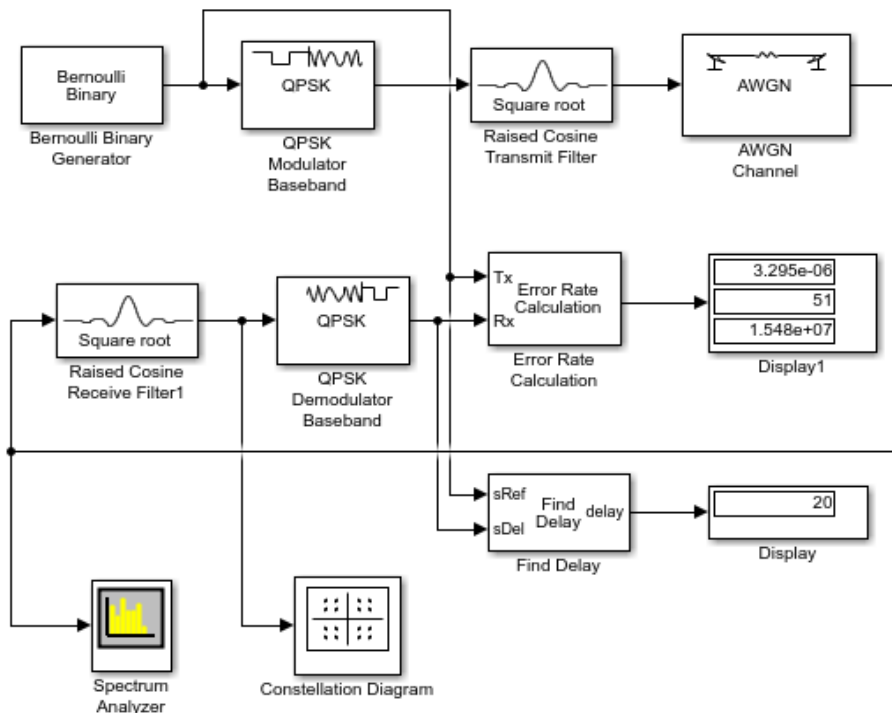


Figure 3 – Communication channel model, which was built in the SIMULINK software application from the MATLAB software package

Description of the blocks of the communication system model shown in Fig. 3:

1. In the configuration parameters of the model, select the discrete solver and the end time of the simulation.
2. The input to the communication channel model is provided by the Bernoulli Binary Generator block, which generates a random binary sequence of bits using the Bernoulli distribution.
3. Generated random binary sequence (Bernoulli generator), fed to the input of the modulator unit QPSK Modulator Baseband (Quadrature Phase Shift Keying, QPSK). At the receiving end, use the appropriate demodulator (QPSK Demodulator Baseband). In the modulator block settings, the “bit” parameter must be selected as the received data type, because the Bernoulli generator generates a sequence of bits. In the modulator block settings, select the “bit” parameter as the source data type.
4. A forming filter is installed at the output of the QPSK modulator and the input of the demodulator. The model developed in this study uses a Raised Cosine Transmit Filter. This type of shaping filter increases the sampling of the signal and filters the input signal using an FIR filter (finite impulse response) of the raised cosine with a square root, or a conventional FIR filter with a raised cosine.
5. The AWGN Channel is used as the transmission channel model. This unit adds white Gaussian noise to a real or complex input signal. In the block settings, set the parameter “Number of bits per character” to 2, as QPSK is used. Set the relative signal level to 1/8, as the filter interpolation factor is 8. The symbol period

must correspond to the generator settings. The signal-to-noise ratio is set to 10.

## 5 RESULTS

To verify the correct operation of the communication channel model shown in Fig. 3, we will use the Bit Error Rate Analysis Tool of the MATLAB software package. The theoretical curve, which shows the signal-to-noise ratio, is shown in Fig. 4.

During the simulation of the communication channel at  $E_b / N_0 = 10$  dB, the following results were obtained (Fig. 3).

- Bit error probability:  $BER = 3.295e - 6$  ;
- The number of erroneous bits is 51;
- The total number of transmitted bits is  $1.548e + 7$ .

## 6 DISCUSSION

Analyzing the simulation results obtained during the simulation of the communication channel, we can conclude that the model is built quite correctly. The fact that the model of the communication channel is correct is confirmed by the fact that the simulation results obtained during the simulation in Fig. 3 ( $BER = 3.295e - 6$ ), coincide with the results obtained by the analysis tool Bit Error Rate Analysis Tool MATLAB software package, where  $BER = 3.8e - 6$  (MATLAB software package, where  $E_b/N_0=10$  dB). For more accurate results, you need to increase the simulation time.

The disadvantage of QPSK is the complexity of the system. The advantage is a higher data rate.

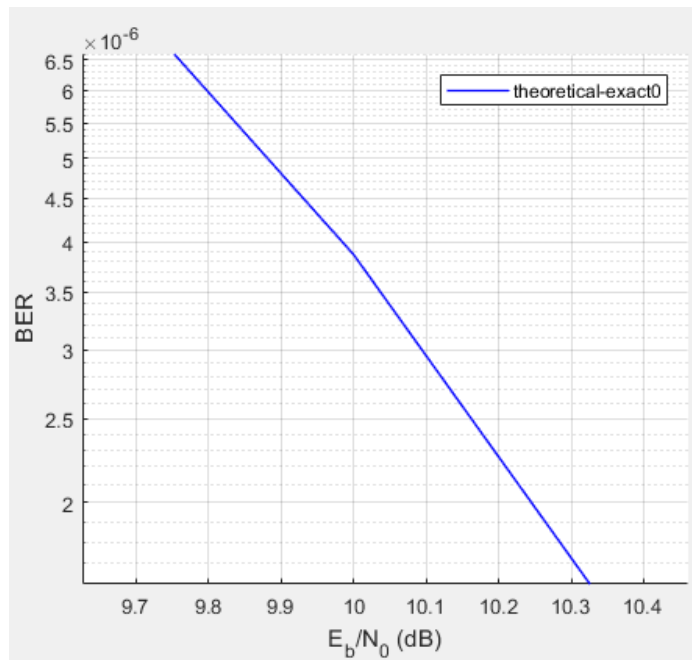


Figure 4 – Theoretical signal-to-noise ratio curve obtained using the Bit Error Rate Analysis Tool of the MATLAB software package.  $E_b/N_0$  – the ratio of the energy of the information bits per symbol to the spectral density of the noise power in decibels

## CONCLUSIONS

The results of experimental studies of the communication channel fully confirmed the results of the mathematical model. As part of the study of the mathematical model, the verification of the correctness of the construction of the mathematical model (to ensure the correctness of signal filtering) is considered. The adequacy of the model is confirmed by the results of the experiment. The theoretical values of the Bit Error Rate (BER) obtained during the simulation of the communication channel are consistent with the results obtained using the Bit Error Rate Analysis Tool of the MATLAB software package.

**The scientific novelty** of the obtained results is that the proposed method of determining the parameters of information signals in the communication channel and increase the bandwidth of the communication channel during external interference to the signal transmission medium in the communication channel, which led to improved communication quality because QPSK technology was used.

**The practical significance** of the obtained results is that the method of mathematical modeling of information signal conversion processes during the process of formation, transmission, and selection of information signals is proposed.

**Prospects for further research.** The use of differential QPSK avoids the problem of lack of phase synchronization between transmitter and receiver. The use of QPSK with squaring offsets, ( $\pi/4$ -QPSK) allows mitigating the effects of changing the voltage of the signal of the carrier with a high slope when switching between characters.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the state budget research project of the National Aviation University “Methodology for building modern remote information and measurement systems” (state registration number 0117U002367), which was performed at the Department of Computerized Electrical Systems and Technologies.

## REFERENCES

1. Tokar M. Development of blind frame synchronization for transfer system with differential space-time block coding, *Technology audit and production reserves*, 2020, Vol. 1, No. 2(51), pp. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.196277>
2. Holub H., Kulbovskiy I., Skliarenko I., Bambura O., Tkachuk M. Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects, *Technology audit and production reserves*, 2019, Vol. 4, No. 5(49), pp. 34–36. DOI: 10.15587/2312-8372.2019.182830
3. Kalantaievska S., Kuvshynov O., Shyshatskyi A., Salnikova O., Punda Y., Zhuk P., Zhuk O., Drobakha H. L. Development of a complex mathematical model of the state of a channel of multi-antenna radio communication systems, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, Vol. 3, No. 9(99), pp. 21–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.166994
4. Korchynskiy V., Hadzhyiev M., Pozdniakov P., Kildishev V., Hordiichuk V. Development of the procedure for forming non-stationary signal structures based on multicomponent LFM signals, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2018, Vol. 6, No. 9(96), pp. 29–37. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.151816
5. Blintsov O., Maidaniuk P. Development of informationally-protected system of marine water area monitoring, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 6, No. 9(90), pp. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.118851
6. Loshakov V. A., Al-Janabi Hussam Dheaa, Hussein Yahya Tareq, Nooh Taha Nasif Adaptive modulation in LTE technology by using ofdma and SC-FDMA with MIMO, *Eastern-*



- European Journal of Enterprise Technologies*, 2013, Vol. 2, No. 9(62), pp. 8–11.
7. Dolinskiy R. Analysis of system with variable parameters, invariant to additive interference, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 4, No. 4(74), pp. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.47729
  8. Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, Nagateru Iwasawa, Nariya Iwaki, Kazuki Nakamura, Kunihiko Kawasaki, Naoki Kanada, Naruto Yonemoto, Yosuke Sato, Masato Fujii, Katsuya Yanatori, Nobuhiko Shibagaki, Kenichi Kashima High-Speed Railway Communication System Using Linear-Cell-Based Radio-Over-Fiber Network and Its Field Trial in 90-GHz Bands, *Journal of lightwave technology*, 2020, Vol. 38, No. 1, pp. 112–122. DOI: 10.1109/JLT.2019.2946691
  9. Sobia Baig, Hafiz Muhammad Asif, Tariq Umer, Shahid Mumtaz, Muhammad Shafiq, Jin-Ghoo Choi High Data Rate Discrete Wavelet Transform-Based PLC-VLC Design for 5G Communication Systems, *IEEE Access*, 2020, Vol. 6, pp. 52490–52499. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2870138
  10. Guangrong Yue, Daizhong Yu, Long Cheng, Qifu Lv, Zhigang Luo, Qing Li, Junxin Luo, Xu He Millimeter-Wave System for High-Speed Train Communications Between Train and Trackside: System Design and Channel Measurements, *IEEE transactions on vehicular technology*, 2019, Vol. 68, No. 12, pp. 11746–11761. DOI: 10.1109/TVT.2019.2919625
  11. Yongqing Fu, Shengnan Guo, Zhixin Yu The Modulation Technology of Chaotic Multi-Tone and its Application in Covert Communication System, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 122289–122301. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937895
  12. Lyulong He, Jiaqiang Zhang, Yueqi Hou, Xiaolong Liang, Peng Bai Time-Varying Formation Control for Second-Order Discrete-Time Multi-Agent Systems With Directed Topology and Communication Delay, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 33517–3352. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2904663
  13. Zuolin Dong, Jiahong Wei, Xiaoyu Chen, Pengfei Zheng Energy Efficiency Optimization and Resource Allocation of Cross-Layer Broadband Wireless Communication System, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 50740–50754. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2978034
  14. Junhyeong Kim, Mathis Schmieder, Michael Peter, Heesang Chung, Sung-Woo Choi, Ilgyu Ki, Younghan Han A comprehensive study on mmWave-based mobile hotspot network system for high-speed train communications, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 68, No. 3 pp. 2087–2101. DOI: 10.1109/TVT.2018.2865700
  15. Danping He, Ai Bo, Guan Ke, Zhong Zhangdui, Hui Bing, Kim Junhyeong, Chung Heesang, Kim Ilgyu Channel measurement, simulation, and analysis for highspeed railway communications in 5G millimeter-wave band, *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, 2018, Vol. 19, No. 10, pp. 3144–3158. DOI: 10.1109/TITS.2017.2771559

Received 30.09.2020.

Accepted 19.09.2021.

УДК 004.94

#### МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ З МЕТОЮ ДОСЛІДЖЕННЯ ДІЇ ЗАВАД В СЕРЕДОВИЩІ ПЕРЕДАЧІ

**Квасніков В. П.** – професор, доктор технічних наук, завідувач кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Сгоров С. В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Шкварницька Т. Ю.** – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Орнатський Д. П.** – доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Катаєва М. О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем та технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Розглянуто задачу створення моделі передачі та перетворення інформації, розглянуті процеси перетворення інформації в передавачах та приймачах, розглянутий процес дії дестабілізуючих факторів на канал зв'язку. Об'єктом дослідження є процес формування, передачі, та відновлення радіосигналів.

**Метод.** Запропоновано математичну модель, яка дозволяє оцінити стійкість сигналу в каналі зв'язку ще на етапі проектування телекомунікаційних систем різного призначення з урахуванням дії завад в середовищі передачі інформаційного сигналу. Проведено оцінку дії завади на канал зв'язку завдяки використанню співвідношення сигнал/шум. Запропоновано метод визначення параметрів інформаційних сигналів у каналі зв'язку та підвищення пропускну здатності під час дії зовнішніх завад на середовище передачі сигналу в каналі зв'язку.

**Результати.** Була отримана математична модель каналу зв'язку, яка враховує зовнішні дестабілізуючі фактори, які можуть діяти на канал та апаратуру зв'язку. Розроблена модель містить метод верифікації, який дозволяє визначити її коректність.

**Висновки.** Вдосконалено метод передачі інформації шляхом додавання методу верифікації. Значення бітової помилки, що було отримано під час моделювання каналу зв'язку співпадає зі значенням бітової помилки під час процесу верифікації, що свідчить про правильність розглянутої математичної моделі каналу зв'язку. Тому цей метод моделювання каналу зв'язку може бути рекомендованим для використання під час проектування та дослідження телекомунікаційних систем.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** канал зв'язку, модуляція, якість зв'язку, відновлення сигналу, демодуляція, фільтрація.

УДК 004.94

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ СВЯЗИ С ЦЕЛЮ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ В СРЕДЕ ПЕРЕДАЧИ

**Квасников В. П.** – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедры компьютеризированных электротехнических систем и технологий Национального авиационного университета, Киев, Украина.

**Егоров С. В.** – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютеризированных электротехнических систем и технологий Национального авиационного университета, Киев, Украина.

© Kvasnikov V. P., Yehorov S. V., Shkvarnytska T. Yu., Ornatyky D. P., Kataieva M. A., 2021  
DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-2

**Шкварницька Т. Ю.** – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Орнатський Д. П.** – доктор технічних наук, професор комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

**Катаєва М. А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

#### АННОТАЦІЯ

**Актуальність.** Розглянута задача створення моделі передачі і преобразования інформації, процеси преобразования інформації в передатчиках і приймачах, процес дійства дестабілізуючих факторів на канал зв'язу об'єкт дослідження – процес формування, передачі і відновлення радіосигналів.

**Метод.** Предложена математическая модель, позволяющая оценить устойчивость сигнала в канале связи на этапе проектирования телекоммуникационных систем различного назначения с учетом влияния помех в среде передачи информационного сигнала. Влияние помех на канал связи оценивается за счет использования соотношения сигнал/шум. Предложен метод определения параметров информационных сигналов в канале связи и повышения пропускной способности при действии внешних помех на среду передачи сигнала в канале связи.

**Результаты.** Получена математическая модель канала связи, учитывающая внешние дестабилизирующие факторы, которые могут действовать на канал и аппаратуру связи. Разработанная модель содержит метод верификации, позволяющий определить ее правильность.

**Выводы.** Улучшен способ передачи информации путем добавления метода верификации. Величина битовой ошибки, полученной при моделировании канала связи, совпадает с величиной битовой ошибки в процессе верификации, что свидетельствует о правильности математической модели рассматриваемого канала связи. Поэтому данный метод моделирования канала связи может быть рекомендован для использования при проектировании и исследовании телекоммуникационных систем.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** канал зв'язу, модуляція, якість зв'язу, відновлення сигналу, демодуляція, фільтрація.

#### ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Tokar M. Development of blind frame synchronization for transfer system with differential space-time block coding / M. Tokar // *Technology audit and production reserves*. – 2020. – Vol. 1, No. 2(51) – P. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.196277>
2. Holub H. Research of methods for identification of emergency modes of power supply system in transport infrastructure projects / [H. Holub, I. Kulbovskiy, I. Skliarenko et al.] // *Technology audit and production reserves*. – 2019. – Vol. 4, No. 5(49) – P. 34–36. DOI: [10.15587/2312-8372.2019.182830](https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.182830)
3. Kalantaievska S. Development of a complex mathematical model of the state of a channel of multi-antenna radio communication systems / [S. Kalantaievska, O. Kuvshynov, A. Shyshatskiy et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 3, No. 9(99) – P. 21–30. DOI: [10.15587/1729-4061.2019.166994](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166994)
4. Korchinskyi V. Development of the procedure for forming non-stationary signal structures based on multicomponent LFM signals / [V. Korchinskyi, M. Hadzhyiev, P. Pozdniakov et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2018. – Vol. 6, No. 9(96) – P. 29–37. DOI: [10.15587/1729-4061.2018.151816](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.151816)
5. Blintsov O. Development of informationally-protected system of marine water area monitoring / O. Blintsov, P. Maidaniuk // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2017. – Vol. 6, No. 9(90) – P. 10–16. DOI: [10.15587/1729-4061.2017.118851](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.118851)
6. Loshakov V. A. Adaptive modulation in LTE technology by using ofdma and SC-FDMA with MIMO / [V. A. Loshakov, Al-Janabi Hussam Dheaa, Hussein Yahya Tareq, Nooh Taha Nasif] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2013. – Vol. 2, No. 9(62) – P.8–11.
7. Dolinskyi R. Analysis of system with variable parameters, invariant to additive interference / R. Dolinskyi // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2015. – Vol. 4, No. 4 (74) – P. 10–16. DOI: [10.15587/1729-4061.2015.47729](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.47729)
8. Atsushi Kanno. High-Speed Railway Communication System Using Linear-Cell-Based Radio-Over-Fiber Network and Its Field Trial in 90-GHz Bands / Atsushi Kanno, Pham Tien Dat, Naokatsu Yamamoto, Tetsuya Kawanishi, Nagateru Iwasawa, Nariya Iwaki, Kazuki Nakamura, Kunihiro Kawasaki, Naoki Kanada, Naruto Yonemoto, Yosuke Sato, Masato Fujii, Katsuya Yanatori, Nobuhiko Shibagaki, Kenichi Kashima // *Journal of lightwave technology*. – 2020. – Vol. 38, No. 1 – P. 112–122. DOI: [10.1109/JLT.2019.2946691](https://doi.org/10.1109/JLT.2019.2946691)
9. Sobia Baig. High Data Rate Discrete Wavelet Transform-Based PLC-VLC Design for 5G Communication Systems / [Sobia Baig, Hafiz Muhammad Asif, Tariq Umer et al.] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 6. –P. 52490–52499. DOI: [0.1109/ACCESS.2018.2870138](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2870138)
10. Guangrong Yue. Millimeter-Wave System for High-Speed Train Communications Between Train and Trackside: System Design and Channel Measurements / [Guangrong Yue, Daizhong Yu, Long Cheng et al.] // *IEEE transactions on vehicular technology*. – 2019. – Vol. 68, No. 12 – P. 11746–1761. DOI: [10.1109/TVT.2019.2919625](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2919625)
11. Yongqing Fu. The Modulation Technology of Chaotic Multi-Tone and its Application in Covert Communication System / Yongqing Fu, Shengnan Guo, Zhixin Yu // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7 – P. 122289–122301. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2937895](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2937895)
12. Lyulong He. Time-Varying Formation Control for Second-Order Discrete-Time Multi-Agent Systems With Directed Topology and Communication Delay / [Lyulong He, Jiaqiang Zhang, Yueqi Hou et al.] // *IEEE Access*. – 2019. – Vol. 7 – P. 33517–3352. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2904663](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2904663)
13. Energy Efficiency Optimization and Resource Allocation of Cross-Layer Broadband Wireless Communication System / [Zuolin Dong, Jiahong Wei, Xiaoyu Chen, Pengfei Zheng] // *IEEE Access*. – 2020. – Vol. 8 – P. 50740–50754. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.2978034](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978034)
14. Junhyeong Kim. A comprehensive study on mmWave-based mobile hotspot network system for high-speed train communications / [Junhyeong Kim, Mathis Schmieder, Michael Peter, Heesang Chung et al.] // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. – 2018. – Vol. 68, No. 3 – P. 2087–2101. DOI: [10.1109/TVT.2018.2865700](https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2865700)
15. Danping He Channel measurement, simulation, and analysis for highspeed railway communications in 5G millimeter-wave band / [Danping He, Bo Ai, Ke Guan et al.] // *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* – 2018. – Vol. 19, No. 10 – P. 3144–3158. DOI: [10.1109/TITS.2017.2771559](https://doi.org/10.1109/TITS.2017.2771559)

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ГРАМА-ШМИДТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

**Пиза Д. М.** – д-р техн. наук, профессор кафедры Радиотехники и телекоммуникаций Национального университета «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина.

**Романенко С. Н.** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Защиты информации Национального университета «Запорожская политехника», г. Запорожье, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** При защите радиолокационных станций от активных шумовых помех, действующих по боковым лепесткам диаграммы направленности антенны, используют пространственную фильтрацию сигналов, которая реализуется путем использования антенн, разнесенных в пространстве. В этом случае различие направлений приема полезного сигнала и помехи позволяет сформировать оптимальное значение весовых коэффициентов адаптивных пространственных фильтров для подавления помехи. Однако, если источник помехи смещается в область главного луча, то пространственные различия между полезным сигналом и помехой уменьшаются. Это приводит к существенному искажению диаграммы направленности основной антенны. В результате этого ухудшается точность измерения угловых координат, а также чувствительность приемного устройства РЛС. В статье предложен структурно-параметрический метод адаптации пространственного фильтра, обеспечивающий эффективную работу РЛС при воздействии АШП как с направления боковых лепестков, так и с направления главного луча.

**Цель.** Повышение эффективности работы РЛС при смещении источника АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча.

**Метод.** Предложенный метод позволяет за счет структурной адаптации многоканального пространственного фильтра исключить искажение главного луча диаграммы направленности антенны РЛС и обеспечить ее работу в условиях возможного воздействия помехи по главному лучу. Структурная адаптация пространственного фильтра реализуется путем текущего анализа весовых коэффициентов блоков компенсации.

**Результаты.** Усовершенствовано структурную схему многоканального пространственного фильтра по методу Грама-Шмидта со структурно-параметрической адаптацией, а также структурную схему блока компенсации. В результате проведенного моделирования подтверждена возможность исключения искажений диаграммы направленности основной антенны РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу диаграммы направленности РЛС.

**Выводы.** Научная новизна работы состоит в усовершенствовании алгоритма обработки сигналов при пространственной фильтрации как при воздействии АШП с направления боковых лепестков, так и при смещении источника помехи на направление главного луча диаграммы направленности антенны РЛС.

Практическая новизна работы состоит в разработке структурной схемы и математической модели усовершенствованного пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** структурно-параметрическая адаптация, активная шумовая помеха, пространственный фильтр, коэффициент подавления.

### АББРЕВИАТУРЫ

АШП – активная шумовая помеха;  
ДНА – диаграмма направленности антенны;  
БпЛА – беспилотный летающий аппарат;  
ВМ – вычислитель модуля;  
КОМ – коммутатор;  
ЛЗ – линия задержки;  
РЛС – радиолокационная станция;  
ФП – формирователь порога.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}_{\text{опт}}$  – оптимальное значение весового коэффициента;  
 $\dot{U}_0$  – комплексное значение помех в основном канале;  
 $\dot{U}_{k1}, \dot{U}_{k2}, \dot{U}_{k3}$  – комплексные значения помех в компенсационных каналах приема;

$\dot{U}_{01}, \dot{U}_{k11}, \dot{U}_{k21}$  – комплексные значения помех на выходе первого каскада;

$\dot{U}_{02}, \dot{U}_{k12}$  – комплексное значение помех на выходе второго каскада;

$\dot{U}_{03}$  – комплексное значение помехи на выходе третьего каскада;

$\alpha$  – азимут помехи;

$\sigma_0$  – среднееквадратическое значение помехи в основном канале приема;

$\sigma_k$  – среднееквадратическое значение помехи в компенсационном канале;

$\dot{\rho}$  – комплексное значение коэффициента межканальной корреляции АШП;

$K_b$  – модуль весового коэффициента;

$K_n$  – коэффициент подавления АШП.

## ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных требований, предъявляемых к РЛС, является ее помехозащищенность. Это характерно для широкого класса радиолокационных средств как военного, так и гражданского назначения [1]. В условиях воздействия активных шумовых помех возможность обнаружения полезных сигналов существенно снижается [2, 4]. В современных условиях вероятность подавления радиолокационных средств по боковым лепесткам диаграмм направленности антенны (ДНА) значительно возросла. Это определяется двумя факторами. Во-первых, это определяется возросшей вероятностью воздействия на РЛС БпЛА, оснащенных источниками АШП, действующими в ближней зоне [1, 2]. Вторая причина возросшей вероятности подавления РЛС объясняется существенным повышением интенсивности активных помех, формируемых современными средствами радиопротиводействия. Это обеспечивается внедрением в постановщики помех фазированных антенных решеток с когерентным сложением помеховых сигналов, а также реализацией режима «помеха в кадре» [2].

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для повышения эффективности РЛС в условиях воздействия АШП по главному лучу ДНА используют поляризационные отличия в структуре полезного сигнала и помехи, что реализуется использованием дуальнополяризованных антенн. При воздействии АШП по боковым лепесткам используют пространственные отличия в направлениях воздействия полезных сигналов и АШП. Это обеспечивается использованием распределенного в пространстве приема сигналов как основной антенной РЛС, так и антеннами компенсационных каналов приема. В этом случае весовые коэффициенты адаптивного пространственного фильтра, как правило, не превышают единичного уровня. При этом диаграммы направленности компенсационных каналов «накрывают» боковые лепестки основной антенны, что позволяет компенсировать АШП, воздействующие с направлений боковых лепестков. Однако, в случае, когда пространственные отличия уменьшаются и источник шумовой помехи начинает действовать по главному лучу ДНА, то, вследствие увеличения весовых коэффициентов пространственного фильтра при компенсации помехи, происходит искажение главного луча. При этом ухудшается точность измерения угловых координат целей, а также чувствительность приемного устройства РЛС.

Цель работы – повышение эффективности работы РЛС при смещении источника АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известны многоканальные автокомпенсаторы помех с корреляционной обратной связью, которые обеспечивают защиту РЛС при воздействии нескольких источников АШП, разнесенных в пространстве [1]. Основным недостатком таких устройств является низкое быстродействие при формировании весовых коэффициентов [3–5]. Это обусловлено двумя причинами, в частности: использованием многих контуров обратной связи, которые тормозят процесс адаптации, а также взаимной корреляцией помех в компенсационных каналах РЛС. Еще одним недостатком является уменьшение быстродействия таких устройств при существенном разбросе собственных значений корреляционной матрицы помех.

Известны также многоканальные системы помехозащиты, построенные по методу Грама-Шмидта, использующие автокомпенсаторы без корреляционных обратных связей [5]. Такие устройства с прямым вычислением весовых коэффициентов позволяют обеспечить ортогонализацию АШП в компенсационных каналах приема и существенно повысить быстродействие формирования весовых коэффициентов пространственного фильтра. Недостатком таких пространственных фильтров является ухудшение точности измерения угловых координат целей, а также чувствительности основного канала РЛС при смещении источника помехи с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча. Это обусловлено искажением главного луча ДНА при компенсации АШП, действующей по главному лучу [6, 7]. В статье [8] также отмечается, что в случае совпадения направлений воздействия полезного сигнала и АШП возникает эффект «ослепления» РЛС. Видимо, это можно объяснить тем, что в этом случае, формируемые пространственным фильтром весовые коэффициенты при компенсации АШП одновременно компенсируют и полезный сигнал.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известная структурная схема ортогонализации АШП по методу Грама-Шмидта приведена на рис. 1 [5, 9]. В структурной схеме реализован случай, когда на РЛС по боковым лепесткам ДНА действуют три источника АШП, разнесенные в пространстве. Соответственно, при этом на структурную схему на вход основного канала поступают помеховые сигналы  $\dot{U}_0$ , а на входы компенсационных каналов поступают АШП от разнесенных в пространстве источников  $\dot{U}_{k1}$ ,  $\dot{U}_{k2}$  и  $\dot{U}_{k3}$ . Устройство содержит первый, второй и третий каскады декорреляции. Из рис. 1 следует, что в блоках 2, 3, 5 происходит ортогонализация действующих помех  $\dot{U}_{k1}$ ,  $\dot{U}_{k2}$  и  $\dot{U}_{k3}$ . В блоках 1, 4 и 6 выполняется последовательная компенсация помех  $\dot{U}_{k3}$ ,  $\dot{U}_{k21}$ ,  $\dot{U}_{k12}$ .

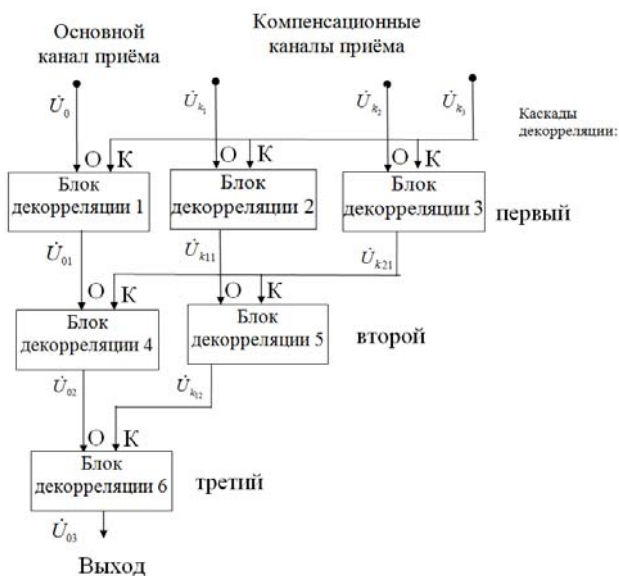


Рисунок 1 – Структурная схема ортогонализации АШП по методу Грама-Шмидта

В качестве блоков декорреляции в структурной схеме используются одноканальные автокомпенсаторы с прямым вычислением весовых коэффициентов. Структурная схема такого автокомпенсатора приведена на рис. 2 [5, 10]. Структурная схема содержит умножители 1, 7, 9, блок комплексного сопряжения 2, интеграторы 3 и 6, линии задержки 4 и 8, делитель 5 и сумматор 10. Непосредственно из рис. 2 следует, что оптимальное значение весового коэффициента  $\dot{k}_{\text{опт}}$  для полного подавления АШП в блоках компенсации 1, 4 и 6 формируется на выходе делителя 5 по выражению:

$$\dot{k}_{\text{опт}} = \frac{\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}}{\dot{U}_k \dot{U}_k^*} \quad (1)$$

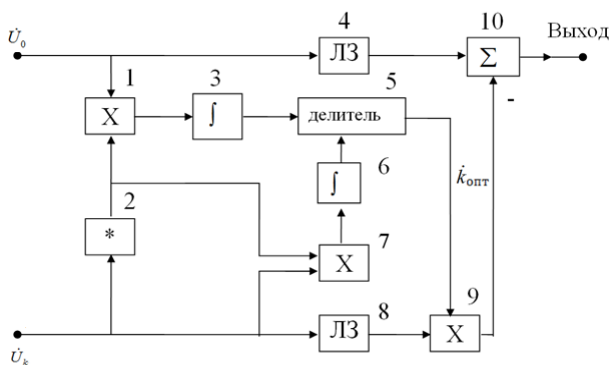


Рисунок 2 – Структурная схема блока ортогонализации

При этом усредненное значение корреляционного момента  $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_k^*}$  формируется на выходе интегратора 3, а дисперсия помехи  $\sigma_k^2 = \overline{\dot{U}_k \dot{U}_k^*}$ , которая действу-

ет в компенсационном канале, формируется на выходе интегратора 6. Мгновенные значения напряжений, действующих на выходах каждого блока компенсации и на его входе (см. рис.1), связаны выражениями:

$$\dot{U}_{01} = \dot{U}_0 - \dot{k}_{\text{опт}1} \dot{U}_{k3}, \quad \dot{U}_{02} = \dot{U}_{01} - \dot{k}_{\text{опт}4} \dot{U}_{k21}, \quad (2)$$

$$\dot{U}_{03} = \dot{U}_{02} - \dot{k}_{\text{опт}6} \dot{U}_{k12},$$

где  $\dot{k}_{\text{опт}1}$ ,  $\dot{k}_{\text{опт}4}$ ,  $\dot{k}_{\text{опт}6}$  – весовые коэффициенты блоков компенсации 1, 4, 6.

Выражение (1) можно представить в следующем виде:

$$\dot{k}_{\text{опт}} = \dot{\rho} \frac{\sigma_0 \sigma_k}{\sigma_k^2} = \dot{\rho} \frac{\sigma_0}{\sigma_k}, \quad (3)$$

где  $\dot{\rho}$  – комплексное значение коэффициента межканальной корреляции АШП, а  $\sigma_0$  и  $\sigma_k$  – среднеквадратические значения помехи в основном и компенсационном каналах приема.

Из выражения (3) непосредственно следует, что модуль весового коэффициента  $|\dot{k}_{\text{опт}}|$  может быть признаком смещения источника АШП с направления боковых лепестков на направление главного луча ДНА. Для формирования такого признака в процессе синтеза структурной схемы при усовершенствовании метода Грама-Шмидта в каждый автокомпенсатор, в котором компенсируются помехи, действующие в основном канале, дополнительно введена цепь, содержащая последовательно соединенные вычислитель модуля 13, формирователь порога 12 и коммутатор 11 (см. рис. 3). Такая цепь может обеспечить структурную адаптацию многоканального пространственного фильтра при смещении источников АШП с направления боковых лепестков ДНА на направление главного луча и исключить его искажение. При этом блок компенсации помех в отличие от блока ортогонализации (см. рис. 2) имеет вид, представленный на рис. 3.

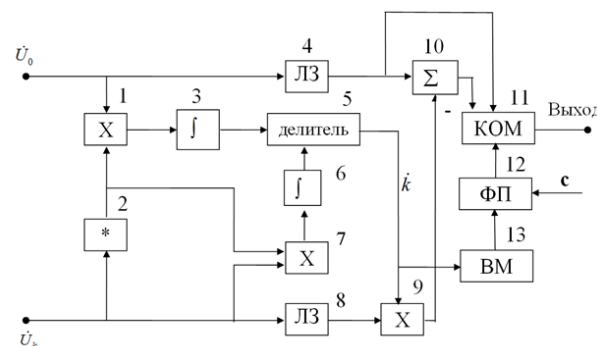


Рисунок 3 – Структурная схема блока компенсации

Рассмотрим алгоритм работы на примере первого каскада обработки сигналов усовершенствованного

многоканального просторового фільтра со структурно-параметричної адаптацією [10], представлений на рис. 4.

На входи першого каскаду обробки сигналів, який містить блок компенсації 1 і блоки декореляції 2 і 3, к основному входу О блока компенсації 1 поступають помехи з основного каналу прийому  $\dot{U}_0$ . К основним входам О блоків декореляції з номерами 2 і 3 поступають помехи  $\dot{U}_{k1}$  і  $\dot{U}_{k2}$ , відповідно. Помеха  $\dot{U}_{k3}$  поступає на компенсаційні входи К блока компенсації 1 і блоків декореляції з номерами 2 і 3. В відповідності з формулою (1) і структурними схемами рис. 2 або рис. 3 на виходах інтеграторів 3 в блока компенсації 1 і в блоках декореляції з номерами 2 і 3 вичисляються кореляційні моменти  $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_{k3}^*}$ ,  $\overline{\dot{U}_{k1} \dot{U}_{k3}^*}$  і  $\overline{\dot{U}_{k2} \dot{U}_{k3}^*}$ , які поступають на делітеля 5 в якості числителя. В якості знаменателя з виходів інтеграторів 6 поступає дисперсія помехи, яка діє на входах К блока компенсації і блоків декореляції. При цьому в блоках декореляції 2 і 3 декорелюється помеха  $\dot{U}_{k3}$ , а в блока компенсації з номером 1, що відповідає структурній схемі, представленій на рис. 4, компенсується помеха  $\dot{U}_{k3}$ , яка діє в основному каналі прийому. Якщо активна помеха діє по боковим лепесткам ДНА, то значення модуля вагового коефіцієнта на виході вичислителя модуля 13 (см. рис. 3) не перевищує поріг  $\epsilon$  в формувателі порога 12 і результат компенсації з виходу сумматора 10 через комутатор 11 поступає на вихід блока компенсації з номером 1.

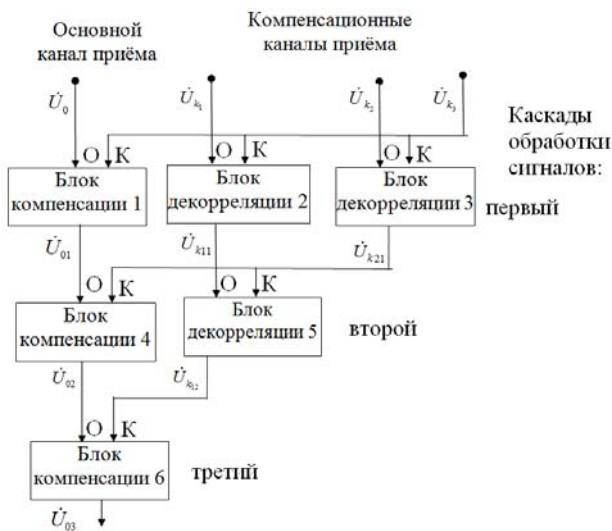


Рисунок 4 – Усовершенствованный многоканальный пространственный фильтр со структурно-параметрической адаптацией

В случае, когда при смещении источника помехи в пространстве или в результате сканирования антенны, АШП смещается и начинает действовать по главному

лучу ДНА, то уровень помехи в основном канале увеличивается, в соответствии с выражением (3), и модуль вагового коэффициента превышает порог  $\epsilon$  в формувателе порога 12. Коммутатор 11 подключает на выход блока компенсации с номером 1 помеху, действующую на основном входе сумматора 10. При этом помеха на выходе блока компенсации 1 не компенсируется и  $\dot{U}_{01} = \dot{U}_0$ . В этом случае АШП продолжает поступать на основной и компенсаційний входы блока компенсации 1, ваговые коэффициенты автокомпенсатора формируются и цепь структурной адаптации отслеживает момент, когда помеха снова сместится на направление боковых лепестков ДНА. После смещения главного луча ДНА с направления на источник АШП модуль вагового коэффициента на выходе вычислителя модуля 13 не превышает уровень порога  $\epsilon$  и процесс компенсации помехи, действующей по боковым лепесткам, продолжается. При этом коммутатор 11 подключает выход сумматора 10 к выходу блока компенсации с номером 1. В блоках декореляции с номерами 2 и 3, которые соответствуют структурной схеме, приведенной на рис. 4, ортогонализуются помехи  $\dot{U}_{k1}$  и  $\dot{U}_{k2}$  относительно помехи  $\dot{U}_{k3}$ . В результате этого корреляционные моменты  $\overline{\dot{U}_0 \dot{U}_{k3}^*}$  и  $\overline{\dot{U}_{k1} \dot{U}_{k3}^*}$  равняются нулю. Вторая цифра в индексах помех на выходах каскадов определяет номер каскада обработки помехи, в котором она получена.

Для исследования эффективности предложенного метода обработки радиолокационных сигналов разработаны математические модели, соответствующие структурным схемам блоков компенсации и ортогонализации, представленным на рис. 2 и 3. При создании моделей просторового фильтра в качестве основной антенны использована антенна с амплитудным распределением  $\frac{\sin x}{x}$  с уровнем первого бокового лепестка, равным 13 дБ. В качестве компенсаційной антенны использована слабонаправленная антенна, которая «накрывает» боковые лепестки основной антенны.

Реализация предложенного алгоритма работы просторового фильтра и его исследование обеспечивалось использованием пакета графического расширения SimuLink системы математического моделирования MatLab. Была сформирована конкретная помеховая обстановка для проведения исследований просторового фильтра как с параметрической, так и со структурно-параметрической адаптацией. При сканировании антенной системы, в зависимости от азимута  $\alpha$ , дисперсия АШП в основном канале изменялась по закону  $\frac{\sin x}{x}$ . Это моделировалось последовательно-

стью импульсов АШП длительностью 1,5 мкс. При этом максимальная относительная дисперсия АШП составляла 40дБ в максимуме главного луча ДНА.

Дисперсія АШП в компенсаційному каналі вирівнялась 25 дБ в максимумах бокових лепестків.

#### 4 РЕЗУЛЬТАТИ

В процесі моделювання досліджена як відома схема блоку компенсації просторового фільтра з параметричною адаптацією (рис. 2), так і запропонована авторами і запатентована схема структурно-параметричної адаптації (рис. 3). В прийнятих умовах моделювання при дослідженні, в залежності від азимута дії АШП, отримані результати, які представлені на рис. 5–9, отримані при параметричній адаптації просторового фільтра.

На рис. 5 представлена АШП, діюча на вході основного каналу просторового фільтра. Сигнал імітує процес сканування антенної системи РЛС в діапазоні азимутального сектора кутів  $[-2,4^\circ \dots +2,4^\circ]$ , відносно азимута головного луча ДНА, рівного нулю.

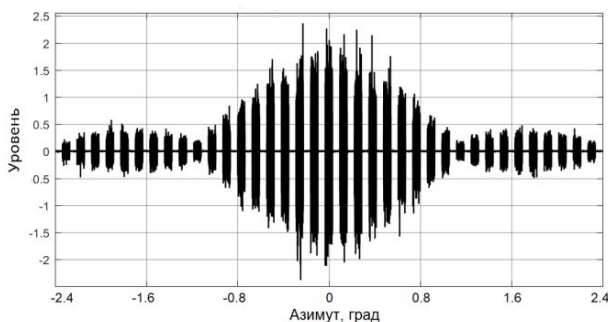


Рисунок 5 – Сигнал, діючий, на вході основного каналу просторового фільтра

На рис. 6 приведена осцилограма коефіцієнта подавлення АШП, діючої на виході просторового фільтра з параметричною адаптацією. Аналіз рис. 6 дозволяє зробити висновок, що коефіцієнт подавлення  $K_n$  АШП, яка діє з напрямлення головного луча, обмежується на рівні 26 дБ при її максимальному рівні, рівному 40 дБ. Це обмеження обумовлено збільшенням модуля вагових коефіцієнтів просторового фільтра і відповідним збільшенням власних шумів компенсаційного каналу на вході суматора 10 (см. рис. 2), що погіршує чутливість прийомного пристрою РЛС. З рис. 6 також слід, що максимальний коефіцієнт подавлення  $K_n$  АШП, діючої по боковим лепесткам, вирівняється 23 дБ, що відповідає теоретичному пределу при її максимальному рівні, рівному 25 дБ.

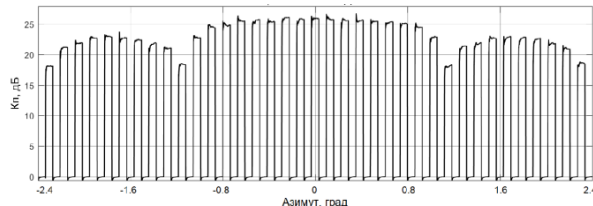


Рисунок 6 – Коефіцієнт подавлення АШП при параметричній адаптації просторового фільтра

На рис. 7 представлена осцилограма модуля вагового коефіцієнта просторового фільтра в процесі сканування антени. З рис. 7 видно, що при дії АШП з напрямлення бокових лепестків: ( $\alpha = -1,6^\circ$ , або  $\alpha = +1,6^\circ$ ), максимальне значення модуля вагового коефіцієнта рівно одиниці. Коли АШП діє по головному лучу з напрямлення  $\alpha = 0^\circ$ , то ваговий коефіцієнт збільшується до 5-ти одиниць. При цьому рівень власних шумів компенсаційного каналу на виході суматора 10 суттєво збільшується. Наслідком цього є погіршення чутливості прийомного пристрою РЛС. Це також слід з рис. 8, на якому показано збільшення некомпенсованого залишку АШП на виході просторового фільтра.

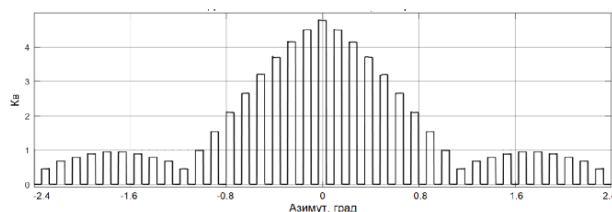


Рисунок 7 – Модуль вагового коефіцієнта блоку компенсації при параметричній адаптації просторового фільтра

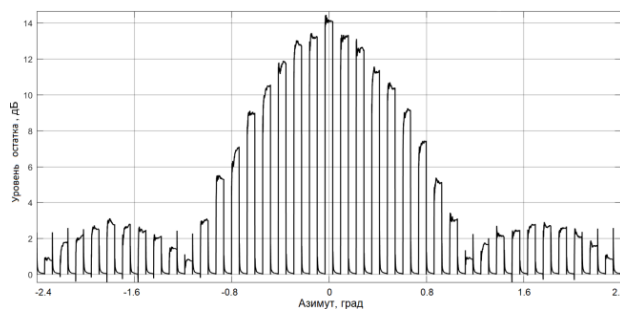


Рисунок 8 – Некомпенсований залишок АШП на виході просторового фільтра

В результаті досліджень встановлено, що використання структурно-параметричної обробки радіолокаційних сигналів виключає можливість погіршення чутливості РЛС і точності вимірювання кулових координат цілей. Дійсно, поскільки при впливі АШП по головному лучу ДНА вихід просторового фільтра підключається до основного входу суматора блоку компенсації, то компенсація АШП не відбувається і ДНА РЛС в

области главного луча не искажается, что обеспечивает нормальное функционирование РЛС.

### 5 ОБСУЖДЕНИЕ

Можно считать, что предложенный авторами метод структурно-параметрической адаптации пространственных фильтров [10] обеспечивает более высокое качество обработки радиолокационной информации. Полученные результаты определенным образом подтверждают мнение, изложенное в работе [8], относительно «ослепления» РЛС при отсутствии пространственных отличий между направлениями воздействия полезного сигнала и АШП. Это объясняется общим «провалом» в ДНА, что не позволяет вести обнаружение полезного сигнала даже при некотором несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНА. Однако, в дальнейшем представляется целесообразным оценить величину потерь в обнаружении полезного сигнала при несовпадении направлений воздействия сигнала и АШП в пределах главного луча ДНА. Такие исследования авторы планируют провести в дальнейшем.

### ВЫВОДЫ

Усовершенствован метод адаптации многоканальных пространственных фильтров, обеспечивающих эффективную работу РЛС как при воздействии АШП с направления боковых лепестков, так и при ее смещении на направление главного луча ДНА. Разработана структурная схема пространственного фильтра со структурно-параметрической адаптацией весовых коэффициентов. Создана математическая модель и проведено ее тестирование. Подтверждены возможности повышения точности измерения угловых координат, а также чувствительности приемного устройства РЛС в условиях возможного воздействия АШП по главному лучу ДНА.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Национального университета «Запорожская политехника» «Разработка и усовершенствование методов обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех» (номер регистрации 01170000614) при финансовой поддержке Министерства образования и науки Украины.

Конфликта интересов при выполнении работы нет.

УДК 621.396.95

### УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД ГРАМА-ШМІДТА ДЛЯ ОБРОБКИ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ

**Піза Д. М.** – д-р техн. наук, професор кафедри Радіотехніки та телекомунікацій, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

**Романенко С. М.** – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедри Захисту інформації, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** При захисті радіолокаційних станцій від активних шумових завод, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени, використовують просторову фільтрацію сигналів, яка реалізується шляхом застосування антен,

### ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Радиозлектронные системы: Основы построения и теории. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Перунов Ю.М. Зарубежные радиозлектронные средства / Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев ; под ред. Ю. М. Перунова; в 4-х книгах. кн.2: Системы радиозлектронной борьбы. – М. : «Радиотехника», 2010. – 352 с.
3. Леховицкий Д.И., Рябуха В.П., Семеняка А.В., Атаманский Д.В., Катюшин Е.А. Защита когерентно-импульсных РЛС от комбинированных помех. 1. Разновидности систем ПВОС и их предельные возможности / [Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, А. В. Семеняка и др.] // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2019. – №7. – С. 380–412.
4. Пиза Д. М. Повышение эффективности пространственно-временной обработки радиолокационных сигналов в условиях воздействия комбинированных помех / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2020. – Т. 63, №5. – С. 300–309. DOI: 10.20535/S0021347020050040
5. Adaptive cancellation arrangement: Patent 1 599 035 United Kingdom: IPC G01 S 7/36 13/52; index at acceptance H4D 259 265 36X 40X; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>.
6. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М. : Радио и связь, 1981. – 416 с.
7. Пиза Д. М. Метод структурно-параметрической адаптации пространственного фильтра / Д. М. Пиза, Д. С. Семенов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2020. – №3. – С. 22–30. DOI: /10.15588/1607-3274-2020-3-2.
8. Харламов А. В. Построение адаптивной пространственно-поляризационной системы защиты РЛС от активных шумовых помех с произвольной пространственной структурой / А. В. Харламов // Системы обработки информации. – 2010. – Вып. 2. – С. 182–187.
9. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки. Введение в теорию ; пер. с англ. / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; под ред. В.А. Лесаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
10. Пат. 141813 Україна, МПК G01 7/36, H04B 15/00. Багатоканальний пристрій адаптивної компенсації завод, діючих по бокових пелюстках діаграми спрямованості антени / Піза Д. М., Семенов Д. С.; заявник і патентовласник НУ «Запорізька політехніка». – № U201910675; Заявл. 01.11.2019; Опубл. 27.04.2020, Бюл. № 8.

Статья поступила в редакцию 17.09.2021.  
После доработки 02.11.2021.



рознесених в просторі. В цьому випадку при різних напрямках прийому корисного сигналу і завади вдається сформувати оптимальні значення вагових коефіцієнтів адаптивних просторових фільтрів для подавлення АШЗ. Однак, якщо джерело завади зміщується в область головного променя, то просторові відмінності між корисним сигналом і завадою зменшуються. Це приводить до суттєвого спотворення діаграми спрямованості основної антени. В результаті цього погіршується точність вимірювання кутових координат, а також чутливість приймального пристрою РЛС. В статті запропоновано структурно-параметричний метод адаптації просторового фільтра, який забезпечує ефективну роботу РЛС при дії АШЗ як з напрямку бокових пелюстків, так і з напрямку головного променя.

**Ціль.** Підвищення ефективності роботи РЛС при зміщенні джерела АШЗ з напрямку бокових пелюстків ДСА на напрям головного променя.

**Метод.** Запропонований метод дозволяє за рахунок структурної адаптації багатоканального просторового фільтра виключити спотворення головного променя ДСА РЛС і забезпечити її роботу в умовах можливої дії завади по головному променю. Структурна адаптація просторового фільтра реалізується шляхом поточного аналізу вагових коефіцієнтів блоків компенсації.

**Результати.** Розроблено структурну схему багатоканального просторового фільтра за методом Грама-Шмідта зі структурно-параметричною адаптацією, а також структурну схему блока компенсації. В результаті проведеного моделювання підтверджена можливість виключення спотворення діаграми спрямованості основної антени РЛС в умовах можливої дії АШЗ по головному променю.

**Висновки.** Наукова новизна роботи полягає в удосконаленні алгоритму обробки сигналів при просторовій фільтрації сигналів як при дії АШЗ з напрямку бокових пелюстків, так і при зміщенні джерела завади на напрям головного променя діаграми спрямованості антени РЛС. Практична новизна роботи полягає в розробці структурної схеми і математичної моделі удосконаленого просторового фільтра з структурно-параметричною адаптацією.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** структурно-параметрична адаптація, активна шумова завада, просторовий фільтр, коефіцієнт подавлення завади.

UDC 621.396.95

#### ADVANCED GRAM-SCHMIDT METHOD FOR RADAR SIGNAL PROCESSING

**Piza D. M.** – Dr. Sc., Professor of the Department of Radio Engineering and Telecommunications of the National University “Zaporozhye Polytechnic”, Zaporozhye, Ukraine.

**Romanenko S. N.** – PhD, Associate Professor of the Department of Information Security of the National University “Zaporozhye Polytechnic”, Zaporozhye, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** When protecting radar stations from active noise interference acting along the side lobes of the antenna directional pattern, spatial filtering of signals is used, which is realized by using antennas that are spaced apart in space. In this case, the difference in the directions of reception of the useful signal and the interference makes it possible to form the optimal value of the weighting coefficients of the adaptive spatial filters to suppress the interference. However, if the interfering source moves into the main beam region, then the spatial differences between the wanted signal and the interference are reduced. This leads to significant distortion of the main antenna radiation pattern. As a result, the accuracy of measuring the angular coordinates deteriorates, as well as the sensitivity of the radar receiver. The article proposes a structural-parametric method for adapting a spatial filter, which ensures effective operation of the radar when exposed to the active noise interference both from the direction of the side lobes and from the direction of the main beam.

**Goal.** Improving the efficiency of the radar when the active noise interference source is shifted from the direction to the side lobes to the direction of the main beam.

**Method.** The proposed method makes it possible, due to the structural adaptation of the multichannel spatial filter, to exclude the distortion of the main beam of the radiation pattern of the radar antenna and to ensure its operation under conditions of possible interference from the main beam. Structural adaptation of the spatial filter is realized by the current analysis of the weighting coefficients of the compensation blocks.

**Results.** The structural diagram of the multichannel spatial filter by the Gram-Schmidt method with structural-parametric adaptation, as well as the structural diagram of the compensation block, has been improved. As a result of the simulation, the possibility of eliminating distortions of the radiation pattern of the main antenna of the radar in conditions of the possible impact of the active noise interference along the main beam of the radiation pattern of the radar has been confirmed.

**Conclusions.** The scientific novelty of the work consists in the improvement of the signal-processing algorithm at spatial filtering both when exposed to the active noise interference from the direction of the side lobes, and when the interference source is shifted to the direction of the main beam of radar.

The practical novelty of the work lies in the development of a structural diagram and a mathematical model of an improved spatial filter with structural-parametric adaptation.

**KEYWORDS:** structural-parametric adaptation, active noise interference, spatial filter, suppression coefficient.

#### REFERENCES

1. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroeniya i teoriya. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop. Pod red. Ya. D. Shirmana. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
2. Perunov Yu. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. pod red. Yu. M. Perunova Zarubezhnye radioelektronnye sredstva, v 4-h knigah. kn.2: Sistemy radioelektronnoj bor'by. Moscow, "Radiotekhnika", 2010, 352 p.
3. Lekhovichij D. I., Ryabuha V. P., Semenyaka A. V., Atamanskij D. V., Katyushin E. A. Zashchita kogerentno-impul'snyh RLS ot kombinirovannyh pomekh. 1. Raznovidnosti sistem PVOS i ih predel'nye vozmozhnosti, *Izvestiya vuzov. Radioelektronika*, 2019, No. 7, pp. 380–412.
4. Piza D. M., Semenov D. S. Povyshenie effektivnosti prostranstvenno-vremennoj obrabotki radiolokacionnyh signalov v usloviyah vozdejstviya kombinirovannyh pomekh, *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2020, Vol. 63, No. 5, pp. 300–309. DOI: 10.20535/S0021347020050040
5. Adaptive cancellation arrangement, Patent 1 599 035 United Kingdom, IPC G01 S 7/36 13/52; index at acceptance H4D 259 265 36X 40X; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, Access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>.
6. Shirman Ya. D., Manzhos V. N. Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokacionnoj informacii na fone pomekh. Moscow, Radio i svyaz', 1981, 416 p.
7. Piza D. M., Semenov D. S. Metod strukturno-parametricheskoj adaptacii prostranstvennogo fil'tra, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 3, pp. 22–30. DOI: /10.15588/1607-3274-2020-3-2.
8. Harlamov A. V. Postroenie adaptivnoj prostranstvenno-polyarizacionnoj sistemy zashchity RLS ot aktivnyh shumovyh pomekh s proizvol'noj prostranstvennoj strukturoj. Sistemi obrobki informacii, 2010, Vyp. 2, pp.182–187.
9. Monzingo R. A., Miller T. U. per. s angl. pod red. V. A. Lesachenko Adaptivnye antennye reshetki. Vvedenie v teoriyu. Moscow, Radio i svyaz', 1986, 448 p.
10. Piza D. M., Semenov D. S. Pat. 141813 Ukraïna, MPK G01 7/36, N04V 15/00. Bagatokanal'nij pristirij adaptivnoï kompensacii zavud, diyuchih po bokovih pelyustkah diagrami spryamovanosti anteni; zayavnik i patentovlasnik NU "Zaporiz'ka politekhnika", № U201910675, Zayavl. 01.11.2019; Opubl. 27.04.2020, Byul. № 8.

## ОЦЕНКА МЕТОДОВ FEM И FDTD ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ С ДИАФРАГМАМИ

**Пильтяй С. И.** – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Булашенко А. В.** – старший преподаватель кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Быковский А. В.** – магистр кафедры радиоинженерии, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина.

**Булашенко А. В.** – студент электромеханического отделения Шосткинского профессионального колледжа имени Ивана Кожедуба Сумского государственного университета, Шостка, Сумская обл., Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** На сегодняшний день происходит стремительное расширение круга современных отраслей науки и техники, которые активно используют спутниковые телекоммуникационные системы для приема, обработки и передачи различной информации. Такие радиоэлектронные системы достаточно часто требуют увеличения объемов информации, которые они обрабатывают и передают. Удвоения объемов передаваемой информации можно достичь, используя двухполяризационные антенные системы и устройства. В наше время большинство специалистов, которые занимаются разработкой разных современных поляризационных устройств СВЧ, выполняют их численное моделирование и оптимизацию с помощью вариационных методов расчета, методов интегральных уравнений, метода согласования полей частичных областей. Наиболее активно применяются методы с разбиением внутренней области устройств на элементарные ячейки. Среди них во временной области наиболее часто используют метод конечных разностей с разбиением на гексагональную сетку, а в частотной области применяют метод конечных элементов с адаптивной тетраэдрической сеткой. Таким образом, актуальной задачей является оценка скорости и точности этих методов с целью определения более эффективного из них.

**Цель.** Целью исследования является сравнение скорости и точности расчетов электромагнитных характеристик волноводных поляризаторов численными методами FEM и FDTD, а также сравнение сходимости этих методов при анализе поляризационных устройств СВЧ с диафрагмами.

**Метод.** Для расчетов и анализа электромагнитных характеристик в статье использовано метод конечных разностей во временной области FDTD и метод конечных элементов в частотной области FEM. В FEM осуществляется разбиение на тетраэдрические ячейки сетки. В FDTD область расчета разбивается на гексагональные ячейки сетки.

**Результаты.** Установлено, что сходимость коэффициента стоячей волны по напряжению для волноводного поляризатора является быстрой для обоих методов. Получено, что сходимости характеристик дифференциального фазового сдвига, коэффициента эллиптичности и кроссполяризационной развязки разработанного микроволнового устройства оказались значительно более чувствительными к используемому количеству ячеек сетки. Более того, в исследовании расчетным путем получено, что время вычислений методом конечных элементов в частотной области более чем в 2 раза меньше, чем соответственное время, необходимое для расчета время вычислений методом конечных разностей во временной области. При использовании метода конечных элементов в частотной области соответствующее количество ячеек тетраэдрической сетки в 10 раз меньше, чем количество ячеек гексагональной сетки в методе конечных разностей во временной области.

**Выводы.** Проведенные исследования показали, что метод FEM в частотной области, в котором применяется адаптивная тетраэдрическая сетка, более эффективен, чем метод FDTD для расчета фазовых и поляризационных характеристик современных волноводных поляризаторов для различных применений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** FDTD6 FEM; FIT; метод конечных разностей; метод конечных элементов; численные методы; сходимость; спутниковые информационные системы; микроволновые устройства; волновод; поляризатор; диафрагма; дифференциальный фазовый сдвиг; коэффициент эллиптичности; кроссполяризационная развязка.

### АБРЕВИАТУРЫ

FEM – Finite Element Method;  
FDTD – Finite Difference Time Domain;  
FETD – Finite Element Time Domain;  
FIT – Finite Integration Technique;  
SF-FDTD – Split-Field Finite Difference Time Domain;  
XPD – Crosspolar Discrimination;  
КСВН – коэффициент стоячей волны по напряжению;  
КПР – кроссполяризационная развязка;  
СВЧ – сверхвысокие частоты.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A = S_{21,H}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны горизонтальной поляризации;  
 $B = S_{21,V}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны вертикальной поляризации;  
 $\Delta f$  – дифференциальный фазовый сдвиг, град.;  
 $\varphi_{\Sigma 21,H}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для горизонтальной поляризации, град.;  
 $\varphi_{\Sigma 21,V}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для вертикальной поляризации, град.;  
 $r$  – коэффициент эллиптичности, дБ;

$S_{\Sigma 11}$  – коэффициент отражения поляризатора;

$XPD$  – кроссполяризационная развязка, дБ;

$VSWR$  – коэффициент стоячей волны по напряжению.

## ВВЕДЕНИЕ

Волноводный поляризатор является важным элементом современных спутниковых антенных систем, которые применяют сигналы с одной или одновременно двумя ортогональными круговыми поляризациями электромагнитных волн. Все конструкции волноводных поляризаторов можно условно разделить на три основные группы. Сегодня существует множество научных статей и докладов на конференциях, посвященных разработке и оптимизации поляризаторов с диафрагмами [1–13], поляризаторов с перегородкой [14–21] и поляризаторов со штырями [22–26]. В современных антеннах с двойной поляризацией для радаров и спутниковых телекоммуникационных систем волноводные поляризаторы функционируют в сочетании с ортомодовыми преобразователями [27–41], которые осуществляют разделение сигналов с преобразованными поляризациями. Наиболее эффективными конструкциями ортомодовых преобразователей являются преобразователи на основе двухреберных переходов в прямоугольных волноводах [6, 26], четырехреберных волноводах [27], турникетных переходов [29, 31] и переходов Бойфота [28]. Кроме того, появились новые конструкции ортомодовых преобразователей [42–46] на основе коаксиальных четырехреберных [47, 48] и секторных коаксиальных гребенчатых волноводов [49–56] для двухдиапазонных систем питания антенн спутниковой связи и радиоастрономии. В настоящее время широкое применение получили волноводные поляризаторы [57, 58], которые используются в современных радиолокационных и спутниковых системах, некоторые из которых применяются в современных системах 5G [59, 60]. Кроме того, широкое применение получили и фазовращатели [61–66], которые применяются в качестве поляризаторов. Часто фазовращатели применяются в качестве основных частей фазированных антенных решеток в технологии интегрированных в подложку волноводов. Такую структуру было эффективно смоделировано с помощью метода согласования мод [61], который обеспечивает высокую скорость и большую точность вычислений. Конструкция такого фазовращателя состоит из пары цилиндрических штырей в волноводе на частоте 7.5 ГГц. Необходимый фазовый сдвиг обеспечивается за счет регулирования длины этих штырей. В [62] была предложена конструкция фазовращателя в волноводе на частоте 15.2 ГГц, который может осуществлять регулировку фазы в диапазоне от 0 до 360°. Эффективность передачи сильно зависит от зазора между регулируемой металлической пластинкой и волноводом. Авторы

[63] предложили конструкцию волноводного фазовращателя со встроенным металлическим ребром, который обеспечивает сдвиг фазы на 360°. Вторая конструкция фазовращателя с боковым щелевым волноводом реализует сдвиг фазы в 360° за счет регулировки металлической заслонки, что расположена на конце делителя мощности на 3 дБ.

**Объектами исследования** являются метод конечных разностей во временной области FDTD и метод конечных элементов в частотной области FEM, которые используются для расчета электромагнитных характеристик устройств СВЧ диапазона.

**Предметом исследования** являются сходимости дифференциального фазового сдвига, согласования и поляризационных характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами.

**Целью работы** является сравнение скорости и точности расчетов электромагнитных характеристик волноводных поляризаторов численными методами FEM и FDTD, а также сравнение сходимости этих методов при анализе поляризационных устройств СВЧ с диафрагмами.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной инженерной проблемой при разработке волноводных поляризаторов и фазовращателей СВЧ является очень высокая чувствительность их фазовых и поляризационных характеристик к неточностям определения оптимальных размеров устройств и изготовления их конструкции. Целью данной научной статьи является сравнение сходимости и скорости расчетов электродинамических методов FEM и FDTD, которые активно применяются для анализа характеристик поляризационных устройств. В данной статье будем сравнивать методы при расчете электромагнитных характеристик волноводного поляризатора на примере конструкции с пятью диафрагмами. Для точного анализа необходимо сравнить время расчета двумя методами при их одинаковой точности, которая зависит от количества используемых ячеек сетки внутри объема поляризатора. Кроме того, задачей исследования является сравнение количества необходимых тетраэдрических ячеек сетки в частотной области для метода FEM с количеством гексагональных ячеек сетки для метода FDTD во временной области при одинаковой точности расчета обоими методами.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время существует множество вариантов модификаций метода конечных разностей во временной области (FDTD) и метода конечных элементов (FEM). Каждая из модификаций имеет свои характеристики эффективности и своеобразные приложения, где ее производительность лучше по сравнению с другими методами. Гибридный метод электромагнитного моделирования во временной области, сочетающий в себе явный метод FDTD и неявный метод временной области (FETD), был

разработан в [67]. Предлагаемый подход обеспечивает преимущества гибкости моделирования метода FETD для сложных геометрических структур и эффективности метода FDTD для простых геометрических структур. В [68] авторы сравнивают различные подходы к усреднению материала в методе конечного интегрирования (FIT) для изогнутых диэлектриков. Предлагается и исследуется новый смешанный метод с использованием нормальной и тангенциальной составляющих поля. Снижены ошибки, возникающие при резких перепадах диэлектрической проницаемости.

В [69] предлагается новый более высокого порядка с большой областью FEM для решения прямых трехмерных электромагнитных задач во временной области. Этот усовершенствованный FEM применяется для анализа многопортовых волноводных устройств СВЧ с произвольными металлическими и диэлектрическими неоднородностями. В статье [70] исследуются и сравниваются вычислительные характеристики метода естественных элементов и FEM. В [77, 72] авторы оптимизируют связи подсетей для FIT в пространстве и времени. Рекомендуемый метод оптимизации позволяет эффективно уменьшить нефизические отражения волн. В [73] предлагается модификация FIT для расчета анизотропных мод, мод с потерями и открытого волновода. Численные примеры, представленные в статье [73], подтверждают, что предложенный смешанный FIT с сосредоточением массы не содержит каких-либо ложных собственных мод и обеспечивает высокую вычислительную эффективность. В статье [74] авторы представляют новый неконформный гибридный метод FDTD/FETD без гибридизации через буферную зону. Численные примеры включены в [75], чтобы продемонстрировать производительность рекомендуемого гибридного метода, который является более точным и стабильным в течение длительного времени.

В [76] авторы предлагают новый гибридный метод схемы пространственно-фильтрованной FDTD (SF-FDTD) и метод подсеток для анализа многомасштабных объектов. Приведены результаты моделирования периодической волноводной структуры, подтверждающие точность и эффективность предложенного гибридного метода. Авторы [77] разработали новый метод FDTD, основанный на пространственных преобразованиях. Этот метод преодолевает препятствия, присущие традиционному алгоритму FDTD в пространственно сложной области. Результаты моделирования подтверждаются с помощью FIT. В [78] авторы разработали стабильный, точный и быстрый численный метод, основанный на треугольной сетке и пространственных преобразованиях для задач электродинамики с произвольными границами. Предлагаемый метод намного быстрее, чем

классический FDTD при наличии искривленных границ.

Поэтому определение оптимальных численных методик для высокоточного расчета всех электромагнитных характеристик СВЧ поляризаторов является важной и актуальной научной задачей. Результаты проведенного в статье исследования позволяют получить рекомендации относительно того, какой метод расчета является более быстрым и точным для разработки волноводных поляризаторов СВЧ диапазона для современных телекоммуникационных и радиолокационных систем

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Современные широкополосные спутниковые антенные системы с двойной ортогональной круговой поляризацией используют волноводные поляризаторы с диафрагмами. Это компактное микроволновое устройство выполняет преобразование ортогональных электромагнитных волн с круговой поляризацией в ортогональные волны с линейной поляризацией. Конструкция такого поляризатора на основе квадратного волновода с 5 симметричными диафрагмами представлена на рис. 1.

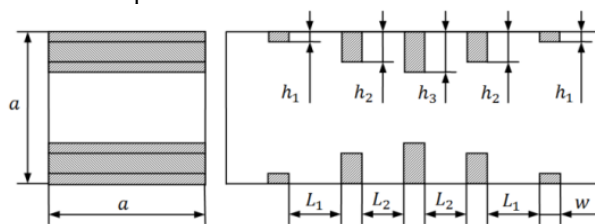


Рисунок 1 – Структура квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами

Основными характеристиками поляризационного устройства являются следующие: фазовые, согласующие и поляризационные. К фазовым характеристикам относится дифференциальный фазовый сдвиг. Согласующие характеристики поляризатора определяются коэффициентами стоячей волны по напряжению (КСВН) для волн обеих поляризаций. К поляризационным характеристикам относятся коэффициент эллиптичности и кроссполяризационная развязка (КПР).

Дифференциальный фазовый сдвиг определяется выражением

$$\Delta f = \varphi_{\Sigma 21.H} - \varphi_{\Sigma 21.V}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\Sigma 21.H}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для горизонтальной поляризации;  $\varphi_{\Sigma 21.V}$  – аргумент коэффициента передачи поляризатора для вертикальной поляризации.

КСВН горизонтальной и вертикальной поляризации определяется формулами

$$VSWR = \frac{1 + |S_{\Sigma 11}|}{1 - |S_{\Sigma 11}|}, \quad (2)$$

где  $S_{\Sigma 11}$  – коэффициент отражения поляризатора.

В логарифмической шкале коэффициент эллиптичности может быть выражен в дБ следующим образом [77]

$$r = 10 \lg \frac{A^2 + B^2 + \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}}{A^2 + B^2 - \sqrt{A^4 + B^4 + 2A^2B^2 \cos(2\Delta\varphi)}}, \quad (3)$$

где  $A = S_{21,H}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны горизонтальной поляризации;  $B = S_{21,V}$  – коэффициент передачи поляризатора для волны вертикальной поляризации.

Величина КПП обычно выражается в дБ и может быть рассчитана следующим образом

$$XPD \text{ (dB)} = 20 \lg \left( \frac{r+1}{r-1} \right), \quad (4)$$

где  $r$  – коэффициент эллиптичности, который предвзительно необходимо перевести в линейную шкалу.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Во время численной оптимизации разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами одновременно анализировались коэффициент эллиптичности и КПП на выходе поляризатора, а также дифференциальный фазовый сдвиг и КСВН для основных электромагнитных мод обеих поляризаций. Целевыми функциями оптимизации являются КСВН для основных мод обеих линейных поляризаций менее 1,15 и КПП менее –32 дБ в рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц. Характеристики оптимизированной конструкции прямогоугольного волноводного поляризатора с диафрагмами были рассчитаны с высокой точностью методом FEM в частотной области с использованием 100 000 ячеек тетраэдрической сетки, на которые внутренний объем структуры был разделен адаптивным способом.

Разработанный волноводный поляризатор обеспечивает эффективные поляризационные характеристики. Диапазон изменения дифференциального фазового сдвига составляет  $90^\circ \pm 2,6^\circ$ . КСВН для основных мод обеих линейных поляризаций меньше 1,13. Коэффициент эллиптичности разработанного поляризатора не превышает 0,4 дБ. Уровень КПП разработанного поляризатора ниже –32,9 дБ.

Во всем рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц максимальный уровень КСВН для основных мод как горизонтальной, так и вертикальной поляризации составляет примерно 1,13, что полностью удовлетворяет требованиям. Дифференциальный фазовый сдвиг оп-

тимизированного поляризатора диафрагмы прямогоугольного волновода изменяется от  $87,5^\circ$  до  $92,5^\circ$ .

Рассмотрим поляризационные характеристики разработанного волноводного поляризатора с диафрагмами. Коэффициент эллиптичности поляризатора рассчитывался с использованием результатов моделирования методом FEM и формулы (3). Коэффициент эллиптичности оптимизированного поляризатора составляет менее 0,40 дБ в полосе рабочих частот 10,7–12,8 ГГц. Соответствующий КПП был получен из выражения (4). Во всем рабочем Ку-диапазоне 10,7–12,8 ГГц КПП поляризатора менее –32,9 дБ.

Теперь исследуем зависимости согласующих, фазовых и поляризационных характеристик от количества ячеек тетраэдрической сетки, при которых внутренний объем структуры адаптивно делился для расчета методом FEM. Кроме того, мы сравним результаты, полученные с использованием FDTD с разным количеством ячеек гексаэдрической сетки.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Численные расчеты характеристик поляризатора обоими рассматриваемыми методами были осуществлены с помощью специализированного программного обеспечения CST Microwave Studio 2017 на персональном компьютере с процессором Intel Core i7-6700K с тактовой частотой 4 ГГц и объемом оперативной памяти 32 Гб. Входными параметрами расчетов, которые определяют погрешность полученных электромагнитных характеристик, является количество используемых ячеек сетки во внутреннем объеме волноводного поляризатора.

Результаты численного моделирования с использованием FEM были получены для количества ячеек тетраэдрической сетки от 20 000 до 200 000. Шаг увеличения числа ячеек сетки составлял 20 000 ячеек сетки. Рассчитанные электромагнитные характеристики поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами в зависимости от количества ячеек сетки и времени расчета показаны в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что при количестве тетраэдрических ячеек сетки, равном 200 000, электромагнитные характеристики поляризатора практически перестают изменяться. Поэтому для сравнения погрешностей расчета электромагнитных характеристик двумя рассматриваемыми методами в качестве наиболее точных значений возьмем характеристики, полученные методом FEM при использовании 200 000 тетраэдрических ячеек сетки.

Из таблицы 1 видно, что абсолютная погрешность расчетов КСВН методом FEM не превышает 0,004 в линейном масштабе (меньше 0,4% относительно точного значения 1,132). Из нижней части таблицы 1 (при количестве тетраэдрических ячеек сетки от 100 000 до 200 000) видно, что абсолютная погрешность определения точного значения дифференциального фазового сдвига находится в пределах  $0,2^\circ$ , а коэффициент эллиптичности и КПП поляризатора

были рассчитаны с абсолютными погрешностями 0,02 дБ и 0,6 дБ, соответственно.

На рис. 2 представлены результаты численного расчета фазовых и поляризационных характеристик разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами с использованием FEM в частотной области. На этих рисунках мы можем сравнить результаты, полученные с использованием грубой тетраэдрической сетки с 20 000 ячеек, с результатами, полученными с использованием средней сетки со 100 000 тетраэдров, и с результатами, рассчитанными с использованием плотной тетраэдрической сетки с 200 000 ячеек.

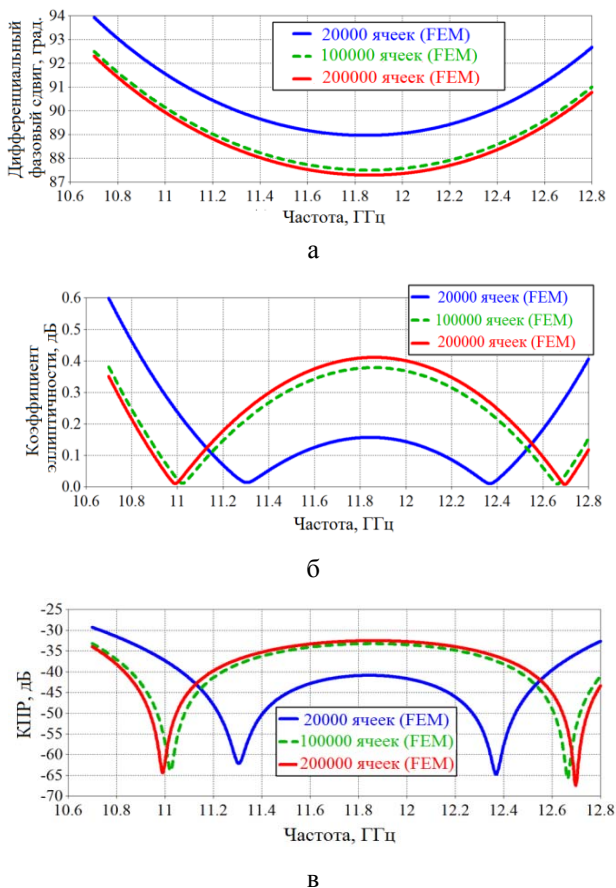


Рисунок 2 – Зависимость электромагнитных характеристик от частоты для метода FEM: а – дифференциального фазового сдвига; б – коэффициента эллиптичности; в – КПР

Результаты численного моделирования с использованием FDTD были получены для количества ячеек гексаэдрической сетки от 100 000 до 1500 000. Шаг приращения сетки составлял 100 000 ячеек сетки. Рассчитанные с помощью FDTD электромагнитные характеристики поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами в зависимости от количества используемых ячеек гексаэдрической сетки и времени расчета показаны в таблице 2.

Анализ изменения рассчитанных электромагнитных характеристик поляризатора в таблицах 1 и 2 в зависимости от используемого метода и количества

ячеек сетки указывает на то, что наиболее точным является расчет методом FEM при количестве ячеек тетраэдрической сетки, равным 200 000. Сравнение с этими результатами метода FEM данных расчета методом FDTD, которые приведены в таблице 2, показывает, что абсолютная погрешность расчетов КСВН методом FDTD не превышает 0,002 в линейном масштабе (меньше 0,2% относительно точного значения 1,132). Из нижней части таблицы 2 (при количестве ячеек гексаэдрической сетки от 800 000 до 1500 000) видно, что абсолютная погрешность определения точного значения дифференциального фазового сдвига находится в пределах 0,2°, а коэффициент эллиптичности и КПР поляризатора были рассчитаны с абсолютными погрешностями 0,03 дБ и 0,6 дБ, соответственно.

На рис. 3 представлены результаты численного расчета фазовых и поляризационных характеристик разработанного квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами методом FDTD. На этих рисунках мы можем сравнить результаты, полученные с использованием грубой шестигранной сетки с 100 000 ячеек, с результатами, полученными с использованием средней сетки с 800 000 тетраэдрами, и с результатами, рассчитанными с использованием плотной гексаэдрической сетки с 1500 000 ячеек.

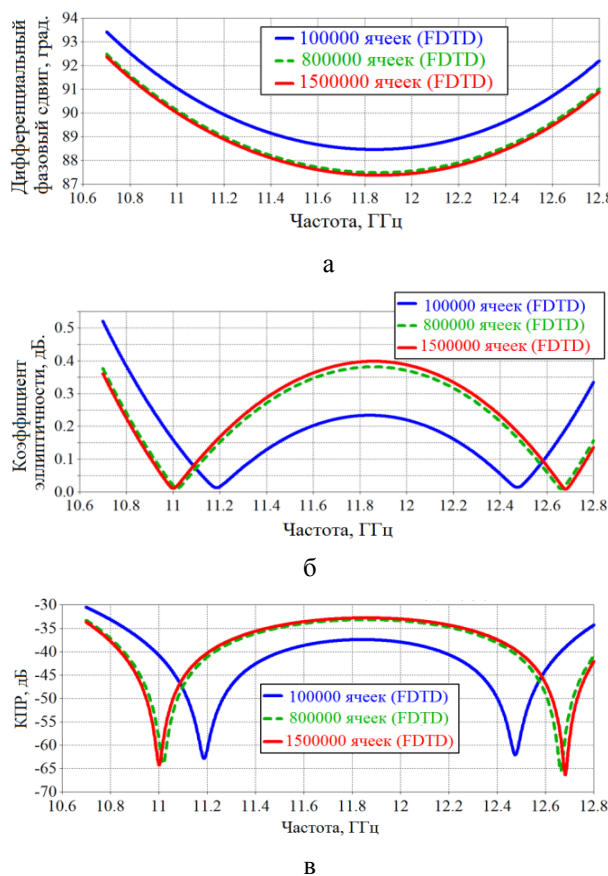


Рисунок 3 – Зависимость электромагнитных характеристик от частоты для метода FDTD: а – дифференциального фазового сдвига; б – коэффициента эллиптичности; в – КПР

Таблица 1 – Зависимость характеристик поляризатора и времени расчета от количества ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM

<i>Число тетраэдрических ячеек сетки</i>	<i>Время вычислений FEM, сек.</i>	<i>Максимальный КСВН</i>	<i>Дифференциальный фазовый сдвиг, град.</i>	<i>Коэффициент эллиптичности, дБ</i>	<i>КПР, дБ</i>
20 000	28	1,136	90°±3,95°	0,60	-29,2
40 000	46	1,134	90°±3,11°	0,47	-31,3
60 000	64	1,133	90°±2,77°	0,42	-32,3
80 000	76	1,133	90°±2,62°	0,40	-32,8
100 000	100	1,132	90°±2,51°	0,39	-33,1
120 000	117	1,132	90°±2,55°	0,39	-33,0
140 000	139	1,132	90°±2,60°	0,40	-32,8
160 000	172	1,132	90°±2,65°	0,40	-32,7
180 000	205	1,132	90°±2,69°	0,41	-32,6
200 000	227	1,132	90°±2,70°	0,41	-32,5

Таблица 2 – Зависимость характеристик поляризатора и времени расчета от количества ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD

<i>Число ячеек гексаэдрической сетки</i>	<i>Время вычислений FDTD, сек.</i>	<i>Максимальный КСВН</i>	<i>Дифференциальный фазовый сдвиг, град.</i>	<i>Коэффициент эллиптичности, дБ</i>	<i>КПР, дБ</i>
100 000	24	1,134	90°±3,43°	0,52	-30,5
200 000	34	1,132	90°±3,06°	0,46	-31,5
300 000	57	1,132	90°±2,85°	0,43	-32,1
400 000	79	1,132	90°±2,66°	0,40	-32,7
500 000	95	1,132	90°±2,58°	0,39	-32,9
600 000	118	1,132	90°±2,54°	0,39	-33,1
700 000	144	1,132	90°±2,52°	0,38	-33,1
800 000	165	1,132	90°±2,51°	0,38	-33,1
900 000	194	1,132	90°±2,50°	0,38	-33,2
1 000 000	219	1,132	90°±2,55°	0,39	-33,1
1 100 000	243	1,132	90°±2,56°	0,39	-33,0
1 200 000	267	1,132	90°±2,58°	0,39	-33,0
1 300 000	293	1,132	90°±2,59°	0,39	-32,9
1 400 000	304	1,132	90°±2,61°	0,40	-32,8
1 500 000	322	1,132	90°±2,63°	0,40	-32,8

Таблица 3 – Сравнение методов FEM и FDTD для расчета характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами

<i>Время вычислений FEM, сек.</i>	<i>Время вычислений FDTD, сек.</i>	<i>Число тетраэдрических ячеек сетки</i>	<i>Число ячеек гексаэдрической сетки</i>	<i>Коэффициент эллиптичности, дБ</i>	<i>КПР, дБ</i>
100	219	100 000	1 000 000	0.39	-33.1
117	243	120 000	1 100 000	0.39	-33.0
139	304	140 000	1 400 000	0.40	-32.8

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ таблиц 1 и 2 показывает, что время расчетов зависит от количества ячеек тетраэдрической сетки, используемых в FEM, и количества ячеек гексаэдрической сетки, используемых в FDTD, приблизительно как линейная функция. Сходимость КСВН к

точному значению происходит очень быстро. Для метода FDTD это объясняется хорошим соответствием используемой декартовой гексаэдральной сетки структуре квадратного волноводного поляризатора с диафрагмами. Следовательно, расчет КСВН с помощью методов FEM и FDTD достаточно точен даже



для относительно неплотных сеток. На грубой сетке максимальный уровень КСВН составляет 1,134–1,136 и сходится к значению 1,132 на мелких сетках. Таким образом, по мере того, как используемая сетка становится более плотной, максимальный уровень КСВН немного уменьшается.

Из таблиц 1 и 2 видно, что на грубых сетках расчет дифференциального фазового сдвига, коэффициента эллиптичности и КПП волноводного поляризатора с диафрагмами является довольно неточным для обоих методов. Хотя разработанная конструкция поляризатора обеспечивает требуемый КПП менее –32 дБ, результаты расчетов методом FEM на грубых сетках от 20 000 до 60 000 ячеек тетраэдрической сетки предсказывают КПП на уровнях всего от –29 дБ до –31 дБ, а методом FDTD на грубых сетках от 100 000 до 200 000 ячеек гексаэдрической сетки — на уровнях от –30 дБ до –31 дБ.

Как видно из таблицы 1, для метода FEM увеличение количества ячеек тетраэдрической сетки с 20000 до 100000 приводит к уменьшению коэффициента эллиптичности поляризатора с 0,60 дБ до 0,37 дБ и одновременному уменьшению его КПП с –29,2 дБ до –33,1 дБ. Дальнейшее увеличение количества ячеек тетраэдрической сетки со 100000 до 200000 приводит к увеличению коэффициента эллиптичности разработанного поляризатора с 0,37 дБ до 0,40 дБ и одновременному увеличению его КПП с –33,1 дБ до –32,5 дБ.

Данные, приведенные в таблице 2, подтверждают такую же тенденцию для метода FDTD. Увеличение количества ячеек гексаэдрической сетки от 100 000 до 900 000 ведет к уменьшению коэффициента эллиптичности поляризатора с 0,52 дБ до 0,38 дБ и одновременному снижению пикового уровня его КПП с –30,5 дБ до –33,2 дБ. Последующее увеличение количества ячеек гексаэдрической сетки с 900 000 до 1500 000 приводит к небольшому увеличению коэффициента эллиптичности разработанного поляризатора с 0,38 дБ до 0,40 дБ и одновременному повышению его КПП с –33,2 дБ до –32,8 дБ.

Как видно на рис. 2 и 3, численные результаты сходятся относительно быстро при увеличении количества ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM от 20 000 до 100 000 и при увеличении количества ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD от 100 000 до 800 000. Дальнейшее увеличение количества ячеек сетки приводит к гораздо более медленному изменению рассчитанных фазовых и поляризационных характеристик поляризатора.

Следовательно, объем конструкции поляризатора необходимо разделять на более чем 100 000 ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM и на более чем 800 000 ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD, если расчет коэффициента эллиптичности поляризатора и КПП выполняются с требуемой точностью менее 0,5 дБ. В случае применения FEM со 100 000 ячеек тетраэдрической сетки время расчета на персональном компьютере, используемом для численного анализа, составило 100 секунд. Для метода FDTD с © Пильтай С. И., Булашенко А. В., Быковский А. В., Булашенко А. В., 2021  
DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-4

применением 800 000 ячеек гексаэдрической сетки соответствующее время расчета на том же персональном компьютере составило 165 секунд.

Сравним численные характеристики методов FEM и FDTD при расчете электромагнитных параметров поляризатора на основе квадратного волновода с диафрагмами. Для этого мы объединяем и анализируем несколько строк Таблиц 1 и 2, содержащих результаты, рассчитанные на одном и том же персональном компьютере, в новую Таблицу 3.

Из таблицы 3 видно, что при той же точности расчета фазовых и поляризационных характеристик СВЧ волноводных устройств время вычислений, необходимое для FEM в частотной области, более чем в 2 раза меньше, чем время, необходимое для метода FDTD. Кроме того, соответствующее количество ячеек тетраэдрической сетки в FEM в 10 раз меньше, чем количество ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD. Это приводит к снижению требований к памяти компьютера, необходимой для расчетов. Следовательно, метод FEM в частотной области, в котором применяется тетраэдрическая сетка, более эффективен, чем метод FDTD для расчета электромагнитных характеристик современных волноводных поляризаторов с диафрагмами.

## ВЫВОДЫ

В выполненном исследовании решено актуальную задачу определения оптимального численного сеточного метода расчета электромагнитных характеристик волноводных устройств преобразования поляризации с диафрагмами. Результаты проведенного в статье исследования позволили получить рекомендации относительно того, какой метод расчета является более быстрым и точным для разработки волноводных поляризаторов СВЧ диапазона для современных телекоммуникационных и радиолокационных систем.

**Научной новизной** есть то, что впервые было осуществлено сравнение времени расчета и сходимости электромагнитных характеристик волноводного поляризатора с диафрагмами при их расчете методом конечных элементов (FEM) в частотной области и методом конечных разностей во временной области (FDTD). Впервые показано, что время вычислений, необходимое для расчета с помощью FEM в частотной области, более чем в 2 раза меньше, чем соответствующее время, необходимое для расчета методом FDTD. Установлено, что при этом количество ячеек тетраэдрической сетки в методе FEM в 10 раз меньше, чем необходимое количество ячеек гексаэдрической сетки в методе FDTD.

**Практическая ценность** заключается в том, что было определено необходимое минимальное количество ячеек сетки для методов FEM и FDTD, которое необходимо использовать для расчета поляризационных характеристик волноводного преобразователя поляризации с диафрагмами с заданной точностью.

Было показано, что необходимо применять более 100 000 ячеек тетраэдрической сетки на объем конст-

рукции волноводного поляризатора, если расчет кроссполаризационной развязки выполняется методом FEM в частотной области с требуемой точностью 0,5 дБ. Если расчет поляризационных характеристик выполняется методом FDTD с требуемой точностью 0,5 дБ, то необходимо использовать более 800 000 ячеек гексаэдрической сетки на весь объем структуры волноводного поляризатора.

Следовательно, для расчета фазовых и поляризационных характеристик волноводных поляризаторов с диафрагмами метод FEM в частотной области, в котором применяется тетраэдрическая сетка, является более быстрым и эффективным, чем метод FDTD.

**Перспективы дальнейших исследований** заключаются в сравнении сеточных численных методов анализа с методом интегральных уравнений, методом согласования мод и другими аналитическими методами, которые применяются для расчета волноводных поляризаторов сверхвысоких частот.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на кафедре радиоинженерии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского».

### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Optimum iris set concept for waveguide polarizers / [G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverinin, R. Orta] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2007. – Vol. 17, No. 3. – P. 202–204. DOI:10.1109/LMWC.2006.890474.
2. Hwang S. New design method for a dual band waveguide iris polarizer / S. Hwang, B.-C. Ahn // IEEE International symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, Hangzhou, China, 16–17 of August 2007 : proceedings. – Hangzhou : IEEE, 2007. – P. 435–438. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
3. Combined-phase-shift waveguide polarizer / [G. Virone, R. Tascone, O. A. Peverinin et al.] // IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters. – 2008. – Vol. 18, No. 8. – P. 509–511. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
4. Hwang S.-M. Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication / S.-M. Hwang, J.-M. Kim, K.-H. Lee // IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation, Singapore, 27–29 of August 2012: proceedings. – Singapore: IEEE, 2012. – P. 153–154. DOI: 10.1109/APCAP.2012.6333202.
5. Yang D.-Y. Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds / D.-Y. Yang, M.-S. Lee // Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society. – 2012. – Vol. 13, No. 7. – P. 3201–3206. DOI:10.5762/KAIS.13.7.3201.
6. Dubrovka F.F. A novel wideband coaxial polarizer / F. F. Dubrovka, S.I. Piltyay // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques, Odesa, Ukraine, 16–20 of September 2013: proceedings. – Odesa: IEEE, 2013. – P. 473–474. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
7. Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots / [D. Yu. Kulik, L. P. Mospan, A. O. Perov, N. G. Kolmakova] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, No. 1. – P. 1–9. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
8. Piltyay S. I. High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system / S. I. Piltyay // XI International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT), Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017: proceedings. – Kyiv: IEEE, 2017. – P. 284–287. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644.
9. Zhang N. Design of K/Ka-band duplex circular polarizer with high isolation / [N. Zhang, Y.-L. Wang, J.-Z. Chen et al.] // International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology, Chengdu, China, 7–11 of December 2018: proceedings. DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563363.
10. A tunable compact polarizer in a circular waveguide / [A. A. Kirilenko, S. O. Steshenko, V. N. Derkach, Y. M. Ostryzhnyi] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 2. – P. 592–596. DOI:10.1109/TMTT.2018.2881089.
11. Piltyay S. Development and optimization of microwave guide polarizers using equivalent network method / S. Piltyay, A. Bulashenko, V. Shuliak, O. // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. – 2021. – Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1980913.
12. Comparative analysis of compact satellite polarizers based on a guide with diaphragms / [S. Piltyay, A. Bulashenko, I. Fesyuk, O. Bulashenko] // Advanced Electromagnetics. – 2021. – Vol. 10, No. 2. – P. 44–55. DOI: 10.77167aem.v10i2.1713
13. Bulashenko A. V. Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development / A. V. Bulashenko, S. I. Piltyay // Visnyk NTUU KPI Seria – Radio-tehnika Radioaparotobuduvannia. – 2020. – Вип. 83. – P. 17–28. DOI: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
14. Waveguide antenna feeders with integrated reconfigurable dual circular polarization / [J. A. Ruiz-Cruz, M. M. Fahmi, S. A. Fouladi, R. R. Mansour] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2011. – Vol. 59, No. 12. – P. 3365–3374. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2170581.
15. Wang X. Novel square/rectangle waveguide septum polarizer / X. Wang, X. Huang, X. Jin // IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband, Nanjing, China, 16–19 of October 2016: proceedings. – Nanjing: IEEE, 2016. – P. 725–726. DOI: 10.1109/ICUWB.2016.7790510.
16. Mrnka M. Antenna range illuminator based on a septum polarizer and dual-mode horn / M. Mrnka, M. Pavlovic, Z. Raida // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2016. – Vol. 58, No. 4. – P. 82–86. DOI: 10.1109/MAP.2016.2569444.
17. A septum polarizer with integrated square to circular tapered waveguide / [N. Nikolic, A. Weily, I. Kekic et al.] // International Symposium on Antennas and Propagation, Boston, USA, 8–13 of July 2018: proceedings, P. 725–726. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608909.
18. Deutschmann B. Broadband septum polarizer with triangular common port / B. Deutschmann, A.F. Jacob // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2020. – Vol. 68, No. 2. – P. 693–700. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2951138.
19. Compact X-band stepped-thickness septum polarizer / [F. F. Dubrovka, S.I. Piltyay, O. Sushko et al.] // IEEE Ukrainian Microwave Week, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings. – Kharkiv: IEEE, 2020. – P. 135–138. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.

20. Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station / [F. F. Dubrovka, S. Martunyuk, R. Dubrovka, et al.] // IEEE Ukrainian Microwave Week, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings – Kharkiv: IEEE, 2020. – P. 196–202. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
21. Cano J. L. On the accurate full characterization of septum polarizers through simple amplitude measurements in back-to-back configuration / J. L. Cano, A. Mediavilla // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – Vol. 69, No. 1. – P. 179–188. DOI: 10.1109/TMTT.2020.302063.
22. Subbarao B. Compact coaxial-fed CP polarizer / B. Subbarao, V. F. Fusco // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2004. – Vol. 3. – P. 145–147. DOI: 10.1109/LAWP.2004.831084.
23. Mohseni S. H. A new profile for metal post circular waveguide polarizer / S. H. Mohseni, F. H. Kashani, M. Fallah // Progress in Electromagnetics Research Symposium, Cambridge, USA, 5–8 of July 2010 : proceedings. – P. 703–705. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
24. Chittora A. A compact circular waveguide polarizer with higher order mode excitation / A. Chittora, S. V. Yadav // IEEE Int. Conf. on Electronics, Computing and Com. Technologies, Bangalore, India, 2–4 of July 2020 : proceedings DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
25. Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer / [S. Pilyay, A. Bulashenko, O. Sushko et al.] // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2021. – Vol. 34, No. 5. – P. 1–27. DOI: 10.1002/jnm.2890.
26. Electromagnetic simulation of new tunable guide polarizers with diaphragms and pins / [S. Pilyay, A. Bulashenko, V. Suliak, O. Bulashenko] // Advanced Electromagnetics. – 2021. – Vol. 10, No. 3. – P. 24–30. DOI: 10.7716/aem.v10i3.1737.
27. Development of a submillimeter double-ridged waveguide ortho-mode transducer (OMT) for the 385–500 GHz band / [M. Kamikura, M. Naruse, S. Asayama et al.] // Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves. – 2010. – Vol. 31, No. 6. – P. 697–707. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10762-010-9632-1>.
28. Dubrovka F. F. A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it / F. F. Dubrovka, S. I. Pilyay // VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques. – Kyiv, Ukraine, 20–23 of September 2011: proceedings. – P. 176–178. DOI: 10.1109/ICATT.2011.6170737.
29. Development of a wideband compact orthomode transducer for the 180–270 GHz band / [C. A. Leal-Sevillano, T. J. Reck, G. Chattopadhyay] // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2014. – Vol. 4, No. 5. – P. 634–636. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2336540.
30. W-Band orthomode transducer for dense focal-plane clusters / [G. Virone, O. A. Peverinin, M. Lumia et al.] // IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters. – 2015. – Vol. 25, No. 2. – P. 85–87. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2373638.
31. A compact L-band orthomode transducer for radio astronomical receivers at cryogenic temperature / [G. Valente, G. Montisci, T. Pisanu et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2015. – Vol. 63, No. 10. – P. 3218–3227. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2464809.
32. Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds / [J. A. Ruiz-Cruz, J. R. Montejo-Garai, C. A. Leal-Sevillano, J. M. Rebolgar] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, No. 3. – P. 1160–1168. DOI: 10.1109/TAP.2018.2794364.
33. Menargues E. Four-port broadband orthomode transducer enabling arbitrary interelement spacing / [E. Menargues, S. Capdevila, T. Debogovic et al.] // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2018. – Vol. 66, No. 12. – P. 5521–5530. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2878208.
34. Pollak A. W. A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth / A. W. Pollak, M. E. Jones // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2018. – Vol. 17, No. 3. – P. 422–425. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
35. Sakr A. A. Theory of polarization-selective coupling and its application to design of orthomode transducers / A. A. Sakr, W. M. Dyab, K. Wu // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2018. – Vol. 66, No. 2. – P. 749–762. DOI: 10.1109/TAP.2017.2778015.
36. Gomez-Torrent A. Compact silicon-micromachined wideband 220–330-GHz turnstile orthomode transducer / A. Gomez-Torrent, U. Shah, J. Oberhammer // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2019. – Vol. 9, No. 1. – P. 38–46. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2882745.
37. Compact symmetric opposed port orthomode transducer / [L. Gerhardt, F. Castro, C. Muller, M. Castro] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2019. – Vol. 29, No. 7. – P. 471–473. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2917770.
38. Abdelaal M. A. Ka-band 3-D-printed wideband groove gap waveguide orthomode transducer / M. A. Abdelaal, A. A. Kishk // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 8. – P. 3361–3369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2919630.
39. Molero C. Circuit modeling of 3-D cells to Design versatile full-metal polarizers / C. Molero, M. Garcia-Vigueras // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2019. – Vol. 67, No. 4. – P. 1357–1369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2898828.
40. A simple asymmetric orthomode transducer based on groove gap waveguide / [Yu. Quan, J. Yang, H. Wang, A. U. Zaman] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2020. – Vol. 30, No. 10. – P. 953–956. DOI: 10.1109/LMWC.2020.3016333.
41. Ultra-compact taper branching orthomode transducer / [Q. Wu, C. Fan, Y. Yang, X. Shi] // International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering. – 2020. – Vol. 3. – P. 1–6. DOI: 10.1002/MMCE.22215.
42. Manshari S. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communication / S. Manshari, S. Koziel, L. Leifsson // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 68, No. 7. – P. 5122–5129. DOI: 10.1109/TAP.2020.2980337.
43. Dubrovka F. F. Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds / F. F. Dubrovka, S. I. Pilyay // XI Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques, Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017: proceedings. – P. 277–280. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642.
44. Jazani G. Design of dual-polariswd (RHCP/LHCP) quad-ridged antenna with wideband septum polarizer waveguide feed / G. Jazani, A. Pirhadi // IET Microwaves, Antennas &

- Propagations. – 2018. – Vol. 12, No. 9. – P. 1541–1545. DOI: 10.1049/iet-map.2017.0611.
45. Piltyay S. I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer / S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2014. – Vol. 58. – P. 27–34. DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
46. Granet C. The designing, manufacturing, and testing of a dual-band feed system for the Parkes radio telescope / [C. Granet, H. Z. Zhang, A. R. Forsyth et al.] // *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. – 2005. – Vol. 47, No. 3. – P. 13–19. DOI: 10.1109/MAP.2005.1532537.
47. Dubrovka F.F. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2014. – Vol. 57, No. 1, P. 1–30. DOI: 10.3103/S0735272714010014.
48. Dubrovka F.F. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical Results / F.F. Dubrovka, S.I. Piltyay // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2014. – Vol. 57, No. 2. – P. 59–69. DOI: 10.3103/S0735272714020010.
49. Piltyay S. I. Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides / S. I. Piltyay // *14-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kyiv, Ukraine, 28–30 of August 2012*. – P. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195.
50. Piltyay S. I. Radiation of the thin-walled circular waveguide aperture at co- and crosspolarization / S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2009. – Vol. 39. – P. 70–76. DOI: 10.20535/RADAP.2009.39.70-76.
51. Naydenko V. Evolution of radiopulses radiated by Hertz's dipole in vacuum / V. Naydenko, S. Piltyay // *12th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Odessa, Ukraine, 1–2 of July 2008*. – P. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2008.4580972.
52. Dubrovka F. F. Prediction of eigenmodes cutoff frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides / F. F. Dubrovka, S. I. Piltyay // *XI Int. Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecomm. and Computer Science, Slavske, Ukraine, 21–24 of February 2012: proceedings*. – P. 191.
53. Piltyay S. I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory / S. I. Piltyay, F. F. Dubrovka // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2013. – Vol. 54. – P. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
54. Dubrovka F. F. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Results / F. F. Dubrovka, S. I. Piltyay // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*. – 2013. – Vol. 55. – P. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23.
55. Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers / [A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, S. A. Pricolotin et al.] // *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech., Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013: proceedings*. – P. 470–472. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
56. Design and optimization of broadband ridged coaxial waveguide polarizers / [A. A. Kirilenko, D. Yu. Kulik, S. A. Pricolotin et al.] // *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves, Kharkov, Ukraine, 23–28 of June 2013: proceedings*. – P. 445–447. DOI: 10.1109/MSMW.2013.6622082.
57. Волноводный поляризатор для радиолокационных и спутниковых систем / [А. В. Булашенко, С. И. Пильтяй, Е. И. Калиниченко, И. В. Забегалов] // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*. – 2021. – Вып. 86. – P. 5–13. DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.5-13.
58. Bulashenko A. FDTD and wave matrix simulation of adjustable DBS-band waveguide polarizer / [A. Bulashenko, S. Piltyay, I. Dikhtyaruk, O. Bulashenko] // *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*. – 2021. – Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1995897.
59. Булашенко А. В. Оцінка зв'язності D2D комунікацій у мережах 5G / А. В. Булашенко // *Visnyk NTUU KPI Serii – Radiotekhnika Radioaparato-buduvannia*. – 2020. – № 81. – С. 21–29. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
60. Булашенко А.В. Комбінований критерій вибору маршрутизації на основі D2D технологій / А. В. Булашенко // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2021. – № 1. – P. 7–13. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
61. Zhao C. Mode-matching analysis of phase shifter in substrate-integrated waveguide technology / C. Zhao, C. Fumeaux // *IX International Conference on Computational Electromagnetics, Shanghai, China, 20–22 of March 2019: proceedings*. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779223.
62. Ku-band rectangular waveguide wide side dimension adjustable phase shifter / [Y.-M. Yang, C.-W. Yuan, G.-X. Cheng, B.-L. Qian] // *IEEE Transactions on Plasma Science*. – 2015. – Vol. 43, No. 5, P. 1666–1669. DOI: 10.1109/TPS.2014.2370074.
63. Zhang Q. Studies on mechanical tunable waveguide phase shifters for phased-array antenna applications / Q. Zhang, C. Yan, L. Liu // *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology, Waltham, USA, 18–21 of October 2016: proceedings*. DOI: 10.1109/TPS.2016.7832555.
64. Muneer B. A broadband tunable multilayer substrate integrated waveguide phase shifter / B. Muneer, Z. Qi, X. Shanjia // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2015. – Vol. 25, No. 4, P. 220–222. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2400923.
65. Ibrahim A. A. A Sub-THz rectangular waveguide phase shifter using piezoelectric-based tunable artificial magnetic conductor / A. A. Ibrahim, H. N. Shaman, K. Sarabandi // *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. – 2018. – Vol. 8, No. 6, P. 666–680. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2866018.
66. Der E. T. Miniaturized 4\*4 Butler matrix and tunable phase shifter using ridged half-mode substrate integrated waveguide / E. T. Der, T. R. Jones, M. Daneshmand // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2020. – Vol. 68, No. 8. – P. 3379–3388. DOI: 10.1109/TAP.2020.2989798.
67. Zhu B. A hybrid finite-element / finite-difference method with implicit-explicit time stepping scheme for Maxwell's equations / B. Zhu, J. Chen, W. Zhong // *IEEE Int. Conference on Microwave Technology and Computational Electromagnetics, Beijing, China, 22–25 of May 2011*. – P. 481–484: proceedings. DOI: 10.1109/ICMTC.2011.5915564.
68. Classen C. Local approximation based material averaging approach in the finite integration technique / C. Classen, B. Bandlow, R. Schuhmann // *IEEE Transactions on Magnetics*. – 2012. – Vol. 48, No. 2. – P. 447–450. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176317.
69. Šekeljčić N. J. Higher order time-domain finite-element method for microwave device modeling with generalized

- hexahedral elements / N. J. Šekeljić, M. M. Ilić, B. M. Notoš // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 2013. – Vol. 61, No. 4. – P. 1425–1434. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2246186.
70. Marechal Y. Computational performances of natural element and finite element methods / Y. Marechal, B. Ramdane, D. P. Botelho // IEEE Transactions on Magnetics. – 2014. – Vol. 50, No. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285259.
71. Sakata T. Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique / T. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo // IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Miami, USA, 13–16 of November 2016: proceedings. DOI: 10.1109/CEFC.2016.7816159.
72. Sakata Y., Mifune T., Matsuo T. Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique / Y. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo // IEEE Transactions on Magnetics, 2017. – Vol. 53, No. 6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2655626.
73. Liu N. The mixed finite element method with mass lumping for computing optical waveguide modes / [N. Liu, G. Cai, C. Zhu et al.] // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 22, No. 2. DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2473689.
74. Sun Q. 3-D implicit–explicit hybrid finite difference/spectral element/finite element time domain method without a buffer zone / [Q. Sun, R. Zhang, Q. Zhan, Q. H. Liu] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2019. – Vol. 67, No. 8. – P. 5469–5476. DOI: 10.1109/TAP.2019.2913740.
75. Xu J. A novel hybrid method of spatially filtered FDTD and subgridding technique / J. Xu, G. Xie // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7. – P. 85622–85626. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2925835.
76. Kazemzadeh M. Faster and more accurate time domain electromagnetic simulation using space transformation / M. Kazemzadeh, W. Xu, N.G.R. Broderick // IEEE Photonics Journal. – 2020. – Vol. 12, No. 4. – P. 1–13. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3005704.
77. Kazemzadeh M. R. Novel time-domain electromagnetic simulation using triangular meshes by applying space curvature / M. R. Kazemzadeh, N.G.R. Broderick, W. Xu // IEEE Open Journal on Antennas and Propagation. – 2020. – Vol. 1. – P. 387–395. DOI: 10.1109/OJAP.2020.3011920.
78. Milligan T. A. Modern Antenna Design / T. A. Milligan. – Hoboken, New Jersey : John Wiley and Sons, 2005.

Received 23.11.2020.

Accepted 29.11.2021.

УДК 621.39

## ОЦІНКА МЕТОДІВ FEM И FDTD ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИБОРІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЇ ІЗ ДІАФРАГМАМИ

**Пильтій С. І.** – канд. техн. наук, доцент кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Булашенко А. В.** – старший викладач кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Быковський О. В.** – магістр кафедри радіоінженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

**Булашенко А. В.** – студент електромеханічного відділення Шосткінського фахового коледжу імені Івана Кожедуба Сумського державного університету, Шостка, Сумська обл., Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** На сьогоднішній день відбувається стрімке розширення кола сучасних галузей науки і техніки, які активно використовують супутникові телекомунікаційні системи для прийому, оброблення та передачі різної інформації. Такі радіоелектронні системи досить часто вимагають збільшення обсягів інформації, які вони обробляють та передають. Подвоєння обсягів переданої інформації можна досягти, використовуючи двополяризаційні антенні системи та пристрої. У наш час більшість спеціалістів, котрі займаються розробленням різних сучасних поляризаційних пристроїв НВЧ, виконують їх чисельне моделювання та оптимізацію за допомогою варіаційних методів розрахунку, методів інтегральних рівнянь, методу узгодження полів часткових областей. Найбільш активно використовують методи із розбиттям внутрішньої області пристрою на елементарні комірки. Серед них у часовій області найбільш часто використовують метод скінченних різниць із розбиттям на гексагональну сітку, а в частотній області застосовують метод скінченних елементів із адаптивною тетраедричною сіткою. Таким чином, актуальною задачею є оцінка швидкості та точності цих методів з метою визначення більш ефективного із них.

**Мета.** Метою дослідження є порівняння швидкості та точності розрахунків електромагнітних характеристик хвилевідних поляризаторів чисельними методами FEM і FDTD, а також порівняння збіжності цих методів при аналізі поляризаційних пристроїв НВЧ із діафрагмами.

**Метод.** Для розрахунків і аналізу електромагнітних характеристик у статті використано метод скінченних різниць у часовій області FDTD та метод скінченних елементів у частотній області FEM. У FEM здійснюється розбиття на тетраедричні комірки сітки. У FDTD область розрахунку розбивається на гексагональні комірки сітки.

**Результати.** Установлено, що збіжність коефіцієнта стійкої хвилі за напругою для хвилевідного поляризатора є швидкою для обох методів. Отримано, що збіжності характеристик диференційного фазового зсуву, коефіцієнта еліптичності та кросполяризаційної розв'язки розробленого мікрохвильового пристрою виявилися значно більш чутливими до використаної кількості комірок сітки. До того ж, у дослідженні розрахунковим шляхом отримано, що час обчислень методом скінчених елементів в частотній області більш ніж в 2 рази менший, ніж відповідний час, що необхідний для обчислень методом скінчених різниць у часовій області. При використанні методу скінчених елементів у частотній області відповідна кількість

комірок тетраедричної сітки в 10 разів менша, ніж кількість комірок гексагональної сітки методі скінчених різниць у часовій області.

**Висновки.** Проведені дослідження показали, що метод FEM у частотній області, в якому використовується адаптивна тетраедрична сітка, більш ефективний, ніж метод FDTD для розрахунку фазових та поляризаційних характеристик сучасних хвилевідних поляризаторів та інших мікрохвильових пристроїв для різних застосувань.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** FDTD; FEM; FIT; метод скінчених різниць; метод скінчених елементів; збіжність; супутникові інформаційні системи; мікрохвильові пристрої; хвилевід; поляризатор; діафрагма; диференційний фазовий зсув; коефіцієнт еліптичності; кросполяризаційна розв'язка.

UDC 621.39

## ESTIMATION OF FEM AND FDTD METHODS FOR SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF POLARIZATION TRANSFORMING DEVICES WITH DIAPHRAGMS

**Piltyay S. I.** – PhD, Associate Professor of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bulashenko A. V.** – Senior Lecturer of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bykovskiy O. V.** – Student of the Department of Radio Engineering of National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine.

**Bulashenko O. V.** – Student of the Electromechanical Department of Ivan Kozhedub Shostka Professional College of Sumy State University, Shostka, Sumy region, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** Today, there is a rapid expansion of the range of modern branches of science and technology, which actively use satellite telecommunication systems to receive, process and transmit various information. These radioelectronic systems quite often require an increase of the volumes of information, which they are processing and transmitting. Increase of the volumes of transmitted information in two times can be achieved by using dual-polarization antenna systems and devices. Nowadays, most part of the specialists, who are engaged in the development of various modern polarization-processing microwave devices, carry out their numerical modeling and optimization using variational techniques, methods of integral equations, method of fields matching in partial regions. The methods with division of the internal region of the device into elementary cells are applied most actively. Among them in the time domain the most often used approach is finite difference method with the decomposition at hexagonal mesh, while and in the frequency domain the finite elements method with the adaptive tetrahedral mesh is applied. Therefore, the estimation of the speed and accuracy of these methods with the purpose of determination of more effective among them is a relevant problem.

**Objective.** The goal of the research is comparison of speed and accuracy of the calculations of electromagnetic characteristics of waveguide polarizers using FEM and FDTD methods, as well as the comparison of the convergence of these methods for the analysis of polarization-processing microwave devices with diaphragms.

**Method.** For the calculations and analysis of electromagnetic characteristics in the article we used the method of finite differences in the time domain (FDTD) and the method of finite elements in the frequency domain (FEM). In FEM the volume is split into the tetrahedral mesh cells. In FDTD the computational domain is divided into hexagonal mesh cells.

**Results.** It was found that the convergence of voltage standing wave ratio for the waveguide polarizer is fast for both methods. It was obtained that the convergence of the characteristics of differential phase shift, axial ratio, and crosspolar discrimination of the developed microwave device turned out to be much more sensitive to the number of mesh cells used. Moreover, in the research it was obtained by calculations that the computation time by the finite elements method in the frequency domain is more than 2 times less than the corresponding time required for calculations by the finite difference time domain method. When using the finite elements method in the frequency domain the corresponding number of tetrahedral mesh cells is 10 times less than the number of hexagonal mesh cells, which are used in the finite difference time domain method.

**Conclusions.** Performed investigations have shown that FEM in the frequency domain, which applies an adaptive tetrahedral mesh, is more efficient than the FDTD method for the calculations of phase and polarization characteristics of modern waveguide polarizers and other microwave devices for various applications.

**KEYWORDS:** FDTD; FEM; FIT; finite differences method; finite elements method; numerical techniques; convergence; satellite information systems; microwave devices; waveguide; polarizer; diaphragm; differential phase shift; axial ratio; crosspolar discrimination.

### REFERENCES

1. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Orta R. Optimum iris set concept for waveguide polarizers, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2007, Vol. 17, No. 3, pp. 202–204. DOI:10.1109/LMWC.2006.890474.
2. Hwang S., Ahn B.-C. New design method for a dual band waveguide iris polarizer, *IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, Hangzhou, China, 16–17 of August 2007: proceedings, pp. 435–438. DOI: 10.1109/MAPE.2007.4393644.
3. Virone G., Tascone R., Peverinin O.A., Addamo G., Orta R. Combined-phase-shift waveguide polarizer, *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, 2008, Vol. 18, No. 8, pp. 509–511. DOI: 10.1109/LMWC.2008.2001005.
4. Hwang S.-M., Kim J.-M., Lee K.-H. Study on design parameters of waveguide polarizer for satellite communication, *IEEE Asia-Pacific Conf. on Antennas and Propagation*, Singapore, 27–29 of August 2012: proceedings, pp. 153–154. DOI: 10.1109/APCAP.2012.6333202.
5. Yang D.-Y., Lee M.-S. Waveguide iris polarizers for Ku-band satellite antenna feeds, *Journal of the Korea Acade-*

- mia-Industrial cooperation Societly*, 2012, Vol. 13, No. 7, pp. 3201–3206. DOI:10.5762/KAIS.13.7.3201.
6. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. A novel wideband coaxial polarizer, *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013, proceedings, pp. 473–474. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650816.
  7. Kulik D. Yu., Mospan L. P., Perov A. O., Kolmakova N. G. Compact-size polarization rotators on the basis of irises with rectangular slots, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, Vol. 75, No. 1, pp. 1–9. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v75.i1.10
  8. Piltyay S.I. High performance extended C-band 3.4–4.8 GHz dual circular polarization feed system, *XI Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017, proceedings, pp. 284–287. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972644.
  9. Zhang N., Wang Y.-L., Chen J.-Z., Wu B., Li G. Design of K/Ka-band duplex circular polarizer with high isolation, *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology*, Chengdu, China, 7–11 of December 2018, proceedings. DOI: 10.1109/ICMMT.2018.8563363.
  10. Kirilenko A. A., Steshenko S. O., Derkach V. N., Ostryzhnyi Y. M. A tunable compact polarizer in a circular waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 2, pp. 592–596. DOI:10.1109/TMTT.2018.2881089.
  11. Piltyay S., Bulashenko A., and Shuliak V., Development and optimization of microwave guide polarizers using equivalent network method, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, Vol. 35. DOI: 10.1080/09205071.2021.1980913.
  12. Piltyay S., Bulashenko A., Fesyuk I., Bulashenko O. Comparative analysis of compact satellite polarizers based on a guide with diaphragms, *Advanced Electromagnetics*, 2021, Vol. 10, No. 2, pp. 44–55. DOI: 10.77167/aem.v10i2.1713.
  13. Bulashenko A.V., Piltyay S.I. Equivalent microwave circuit technique for waveguide iris polarizers development, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannya*, 2020, Vol. 83, pp. 17–28. DOI: 10.20535/RADAP.2020.83.17-28.
  14. Ruiz-Cruz J.A., Fahmi M.M., Fouladi S.A., Mansour R.R. Waveguide antenna feeders with integrated reconfigurable dual circular polarization, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2011, Vol. 59, No. 12, pp. 3365–3374. DOI: 10.1109/TMTT.2011.2170581.
  15. Wang X., Huang X., Jin X. Novel square/rectangle waveguide septum polarizer, *IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband*, Nanjing, China, 16–19 of October 2016, proceedings, pp. 725–726. DOI: 10.1109/ICUWB.2016.7790510.
  16. Mrnka M., Pavlovic M., Raida Z. Antenna range illuminator based on a septum polarizer and dual-mode horn, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, Vol. 58, No. 4, pp. 82–86. DOI: 10.1109/MAP.2016.2569444.
  17. Nikolic N., Weily A., Kekic I., Smith S. L., Smart K. W. A septum polarizer with integrated square to circular tapered waveguide, *Int. Symposium on Antennas and Propagation*, Boston, USA, 8–13 of July 2018, proceedings, pp. 725–726. DOI: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2018.8608909.
  18. Deutschmann B., Jacob A.F. Broadband septum polarizer with triangular common port, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, Vol. 68, No. 2, pp. 693–700. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2951138.
  19. Dubrovka F. F., Piltyay S. I., Sushko O., Dubrovka R. R., Lytvyn M. M., Lytvyn S. M. Compact X-band stepped-thickness septum polarizer, *IEEE Ukrainian Microwave Week*. Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020, proceedings, pp. 135–138. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252583.
  20. Dubrovka F., S. Martunyuk, R. Dubrovka et al. Circularly polarised X-band H11- and H21-modes antenna feed for monopulse autotracking ground station, *IEEE Ukrainian Microwave Week*, Kharkiv, Ukraine, 21–25 of September 2020: proceedings, pp. 196–202. DOI: 10.1109/UkrMW49653.2020.9252600.
  21. Cano J.L., Mediavilla A. On the accurate full characterization of septum polarizers through simple amplitude measurements in back-to-back configuration, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 69, no. 1, pp. 179–188. DOI: 10.1109/TMTT.2020.3020639.
  22. Subbarao B., Fusco V.F. Compact coaxial-fed CP polarizer, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2004, Vol. 3, pp. 145–147. DOI: 10.1109/LAWP.2004.831084.
  23. Mohseni S. H., Kashani F. H., Fallah M. A new profile for metal post circular waveguide polarizer, *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, 5–8 of July 2010: proceedings, pp. 703–705. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
  24. Chittora A., Yadav S. V. A compact circular waveguide polarizer with higher order mode excitation, *IEEE Int. Conf. on Electronics, Computing and Com. Technologies*, Bangalore, India, 2–4 of July 2020, proceedings. DOI: 10.1109/CONECCT50063.2020.9198499.
  25. Piltyay S., Bulashenko A., Sushko O., Bulashenko O., Demchenko I. Analytical modeling and optimization of new Ku-band tunable square waveguide iris-post polarizer, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2021, Vol. 34, No. 5, pp. 1–27. DOI: 10.1002/jnm.2890.
  26. Piltyay S., Bulashenko A., Shuliak V., Bulashenko O., Electromagnetic simulation of new tunable guide polarizers with diaphragms and pins, *Advanced Electromagnetics*, 2021, Vol. 10, No. 3, pp. 24–30. DOI: 10.7716/aem.v10i3.1737.
  27. Kamikura M., Naruse M., Asayama S., Satou N., Shan W., Sekimoto Y. Development of a submillimeter double-ridged waveguide ortho-mode transducer (OMT) for the 385–500 GHz band, *Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves*, 2010, Vol. 31, No. 6, pp. 697–707. DOI: https://doi.org/10.1007/s10762-010-9632-1.
  28. Dubrovka F.F., Piltyay S.I. A high performance ultrawideband orthomode transducer and a dual-polarized quad-ridged horn antenna based on it, *VIII Int. Conf. on Antenna Theory and Techniques*. Kyiv, Ukraine, 20–23 of September 2011, proceedings, pp. 176–178. DOI: 10.1109/ICATT.2011.6170737.
  29. Leal-Sevillano C. A., Reck T. J., Chattopadhyay G., Ruiz-Cruz J. A., Montejó-Garai J. R., Rebollar J. M. Development of a wideband compact orthomode transducer for the 180–270 GHz band, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, Vol. 4, No. 5, pp. 634–636. DOI: 10.1109/TTHZ.2014.2336540.
  30. Virone G., Peverinin O. A., Lumia M., Farooqui M. Z., Addamo G., Tascone R. W-Band orthomode transducer for dense focal-plane clusters, *IEEE Microwave and Wireless Comp. Letters*, 2015, Vol. 25, No. 2, pp. 85–87. DOI: 10.1109/LMWC.2014.2373638.
  31. Valente G., Montisci G., Pisanu T., Navarrini A., Marongiu P., Casula G.A. A compact L-band orthomode transducer for radio astronomical receivers at cryogenic temperature, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2015,

- Vol. 63, No. 10, pp. 3218–3227. DOI: 10.1109/TMTT.2015.2464809.
32. Ruiz-Cruz J.A., Montejo-Garai J.R., Leal-Sevillano C.A., Rebollar J. M. Orthomode transducers with folded double-symmetry junctions for broadband and compact antenna feeds, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Vol. 66, no. 3, pp. 1160–1168. DOI: 10.1109/TAP.2018.2794364.
33. Menargues E., Capdevila S., Debogovic T., Dimitriadis A.I., Simon L., Garcia-Vigueras M., Mosing J.R., Skrivervik A.K., Rijk E. Four-port broadband orthomode transducer enabling arbitrary interelement spacing, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, Vol. 66, No. 12, pp. 5521–5530. DOI: 10.1109/TMTT.2018.2878208.
34. Pollak A. W., Jones M. E. A compact quad-ridge orthogonal mode transducer with wide operational bandwidth, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2018, Vol. 17, No. 3, pp. 422–425. DOI: 10.1109/LAWP.2018.2793465.
35. Sakr A. A., Dyab W. M., Wu K. Theory of polarization-selective coupling and its application to design of orthomode transducers, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, Vol. 66, No. 2, pp. 749–762, 2018. DOI: 10.1109/TAP.2017.2778015.
36. Gomez-Torrent A., Shah U., Oberhammer J. Compact silicon-micromachined wideband 220-330-GHz turnstile orthomode transducer, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2019, Vol. 9, No.1, pp. 38–46. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2882745.
37. Gerhardt L., Castro F., Muller C., Castro M. Compact symmetric opposed port orthomode transducer, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2019, vol. 29, no.7, pp. 471–473. DOI: 10.1109/LMWC.2019.2917770.
38. Abdelaal M.A., Kishk A.A. Ka-band 3-D-printed wideband groove gap waveguide orthomode transducer, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 8, pp. 3361–3369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2919630.
39. Molero C., Garcia-Vigueras M. Circuit modeling of 3-D cells to Design versatile full-metal polarizers, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2019, Vol. 67, No. 4, pp. 1357–1369. DOI: 10.1109/TMTT.2019.2898828.
40. Quan Yu., Yang J., Wang H., Zaman A.U. A simple asymmetric orthomode transducer based on groove gap waveguide, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2020, Vol. 30, No. 10, pp. 953–956. DOI: 10.1109/LMWC.2020.3016333.
41. Wu Q., Fan C., Yang Y., Shi X. Ultra-compact taper branching orthomode transducer, *International Journal of RF and Microwave Computer-aided Engineering*, 2020, Vol. 3, pp. 1–6. DOI: 10.1002/MMCE.22215.
42. Manshari S., Koziel S., Leifsson L. Compact dual-polarized corrugated horn antenna for satellite communication, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2020, Vol. 68, No. 7, pp. 5122–5129. DOI: 10.1109/TAP.2020.2980337.
43. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Novel high performance coherent dual-wideband orthomode transducer for coaxial horn feeds, *XI Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Kyiv, Ukraine, 24–27 of May 2017, proceedings, pp. 277–280. DOI: 10.1109/ICATT.2017.7972642.
44. Jazani G., Pirhadi A. Design of dual-polariswd (RHCP/LHCP) quad-ridged antenna with wideband septum polarizer waveguide feed, *IET Microwaves, Antennas & Propagations*, 2018, Vol. 12, No. 9, pp.1541–1545. DOI: 10.1049/iet-map.2017.0611.
45. Pilyay S. I. Enhanced C-band coaxial orthomode transducer, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2014, Vol. 58, pp. 27–34. DOI: 10.20535/RADAP.2014.58.27-34.
46. Granet C., Zhang H. Z., Forsyth A. R., Graves G. R., Doherty P., Greence K. J., James G. L., Sykes P., Bird T. S., Sinclair M. W., Moore G. The designing, manufacturing, and testing of a dual-band feed system for the Parkes radio telescope, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2005, Vol. 47, No. 3, pp. 13–19. DOI: 10.1109/MAP.2005.1532537.
47. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Theory, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2014, Vol. 57, No. 1, pp. 1–30. DOI: 10.3103/S0735272714010014.
48. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes of coaxial quad-ridged waveguides. Numerical Results, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2014, Vol. 57, No. 2, pp. 59–69. DOI: 10.3103/S0735272714020010.
49. Pilyay S. I. Numerically effective basis functions in integral equation technique for sectoral coaxial ridged waveguides, *14-th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*. Kyiv, Ukraine, 28–30 of August 2012, pp. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2012.6331195.
50. Pilyay S. I. Radiation of the thin-walled circular waveguide aperture at co- and crosspolarization, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2009, Vol. 39, pp. 70–76. DOI: 10.20535/RADAP.2009.39.70-76.
51. Naydenko V., Pilyay S. Evolution of radiopulses radiated by Hertz’s dipole in vacuum, *12th Int. Conf. on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory*, Odessa, Ukraine, 1–2 of July 2008: proceedings, pp. 492–495. DOI: 10.1109/MMET.2008.4580972.
52. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Prediction of eigenmodes cut-off frequencies of sectoral coaxial ridged waveguides, *XI Int. Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecomm. and Computer Science*. Slavske, Ukraine, 21–24 of February 2012, proceedings, P. 191.
53. Dubrovka F. F., Pilyay S. I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 1. Theory, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2013, Vol. 54, pp. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.54.13-23.
54. Dubrovka F.F., Pilyay S.I. Eigenmodes analysis of sectoral coaxial ridged waveguides by transverse field-matching technique. Part 2. Numerical results, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato-buduvannia*, 2013, Vol. 55, pp. 13–23. DOI: 10.20535/RADAP.2013.55.13-23.
55. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Pricolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. Stepped approximation technique for designing coaxial waveguide polarizers, *IX Int. Conf. on Antenna Theory and Tech.* Odessa, Ukraine, 16–20 of September 2013, proceedings, pp. 470–472. DOI: 10.1109/ICATT.2013.6650815.
56. Kirilenko A. A., Kulik D. Yu., Prikolotin S. A., Rud L. A., Steshenko S. A. Design and optimization of broadband ridged coaxial waveguide polarizers, *International Kharkov Symposium on Physics and Engineering of Microwaves Millimeter and Submillimeter Waves*. Kharkov, Ukraine, 23–28 of June 2013, proceedings, pp. 445–447. DOI: 10.1109/MSMW.2013.6622082.
57. Bulashenko A. V., Pilyay S. I., Kalinichenko Y. I., Zabegalov I. V. Waveguide polarizer for radar and satellite systems,



- Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika Radioaparato- buduvannya*, 2021, Vol. 86, pp. 5–13. DOI: 10.20535/RADAP.2021.86.5-13
58. Bulashenko A., Pilyay S., Dikhtyaruk I., and Bulashenko O. FDTD and wave matrix simulation of adjustable DBS-band waveguide polarizer, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 2021, Vol. 35, DOI: 10.1080/09205071.2021.1995897.
59. Bulashenko A.V. Evaluation of D2D Communications in 5G, *Visnyk NTUU KPI Seriya – Radiotekhnika, Radioaparato- buduvannya*, 2020, Vol. 81, pp. 21–29. DOI: 10.20535/RADAP.2020.81.21-29.
60. Bulashenko A. V. Combined criterion for the choice of routing based on D2D technology, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, No. 1, pp. 7–13. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-1.
61. Zhao C., Fumeaux C. Mode-matching analysis of phase shifter in substrate-integrated waveguide technology, *IX International Conference on Computational Electromagnetics*, Shanghai, China, 20–22 of March 2019, proceedings. DOI: 10.1109/COMPEM.2019.8779223.
62. Yang Y.-M., Yuan C.-W., Cheng G.-X., Qian B.-L. Ku-band rectangular waveguide wide side dimension adjustable phase shifter, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2015, Vol. 43, No. 5, pp. 1666–1669. DOI: 10.1109/TPS.2014.2370074.
63. Zhang Q., Yan C., Liu L. Studies on mechanical tunable waveguide phase shifters for phased-array antenna applications, *IEEE International Symposium on Phased Array Systems and Technology*. Waltham, USA, 18–21 of October 2016. proceedings. DOI: 10.1109/TPS.2016.7832555.
64. Muneer B., Qi Z., Shanjia X. A broadband tunable multi-layer substrate integrated waveguide phase shifter, *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2015, Vol. 25, No. 4, pp. 220–222. DOI: 10.1109/LMWC.2015.2400923.
65. Ibrahim A.A., Shaman H.N., Sarabandi K. A Sub-THz rectangular waveguide phase shifter using piezoelectric-based tunable artificial magnetic conductor, *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2018, Vol. 8, No. 6, pp. 666–680. DOI: 10.1109/TTHZ.2018.2866018.
66. Der E.T., Jones T.R., Daneshmand M. Miniaturized 4\*4 Butler matrix and tunable phase shifter using ridged half-mode substrate integrated waveguide, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, Vol. 68, No. 8, pp. 3379–3388. DOI: 10.1109/TAP.2020.2989798.
67. Zhu B., Chen J., Zhong W. A hybrid finite-element / finite-difference method with implicit-explicit time stepping scheme for Maxwell’s equations, *IEEE Int. Conference on Microwave Technology and Computational Electromag- netic*, Beijing, China, 22–25 of May 2011, pp. 481–484, proceedings. DOI: 10.1109/ICMTCE.2011.5915564.
68. Classen C., Bandlow B., Schuhmann R. Local approximation based material averaging approach in the finite integration technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2012, Vol. 48, No. 2, pp. 447–450. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2176317.
69. Šekeljić N. J., Ilić M. M., Notaroš B. M. Higher order time-domain finite-element method for microwave device modeling with generalized hexahedral elements, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 1425–1434. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2246186.
70. Marechal Y., Ramdane B., Botelho D. P. Computational performances of natural element and finite element methods, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2014, Vol. 50, No. 2. DOI: 10.1109/TMAG.2013.2285259.
71. Sakata T., Mifune T., Matsuo T. Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique, *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Miami, USA, 13–16 of November 2016, proceedings. DOI: 10.1109/CEFC.2016.7816159.
72. Sakata Y., T. Sakata, T. Mifune, T. Matsuo Optimal subgrid connection for space-time finite integration technique, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2017, Vol. 53, No. 6. DOI: 10.1109/TMAG.2017.2655626.
73. Liu N., Cai G., Zhu C., Huang Y., Liu Q.H. The mixed finite element method with mass lumping for computing optical waveguide modes, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, Vol. 22, No. 2. DOI: 10.1109/JSTQE.2015.2473689.
74. Sun Q., Zhang R., Zhan Q., Liu Q. H. 3-D implicit-explicit hybrid finite difference/spectral element/finite element time domain method without a buffer zone, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019, Vol. 67, No. 8, pp. 5469–5476. DOI: 10.1109/TAP.2019.2913740.
75. Xu J., G. Xie. A novel hybrid method of spatially filtered FDTD and subgridding technique, *IEEE Access*, 2019, Vol. 7, pp. 85622–85626. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2925835.
76. Kazemzadeh M., Xu W., N.G.R. Broderick Faster and more accurate time domain electromagnetic simulation using space transformation, *IEEE Photonics Journal*, 2020, Vol. 12, No. 4, pp. 1–13. DOI: 10.1109/JPHOT.2020.3005704.
77. Kazemzadeh M. R., Broderick N.G.R., Xu W. Novel time-domain electromagnetic simulation using triangular meshes by applying space curvature, *IEEE Open Journal on Antennas and Propagation*, 2020, Vol. 1, pp. 387–395. DOI: 10.1109/OJAP.2020.3011920.
78. Milligan T. A. *Modern Antenna Design*. Hoboken, New Jersey, John Wiley and Sons, 2005.

**МАТЕМАТИЧНЕ  
ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ**

**MATHEMATICAL  
AND COMPUTER MODELING**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ  
И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**

UDC 621.391.1: 621.395

**QUEUEING SYSTEMS WITH TIME LAG**

**Tarasov V. N.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Software and Management in Technical Systems of Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.

**Bakhareva N. F.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Informatics and Computer Engineering of Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.

**ABSTRACT**

**Context.** In the queueing theory of a research of the G/G/1 systems are relevant because it is impossible to receive decisions for the average waiting time in queue in a final form in case of arbitrary laws of distributions of an input flow and service time. Therefore, the study of such systems for particular cases of input distributions is important. The problem of deriving solutions for the average waiting time in a queue in closed form for systems with distributions shifted to the right from the zero point is considered.

**Objective.** Getting solutions for the main characteristics of the systems – the average waiting time of requirements in the queue for queueing systems (QS) of type G/G/1 with shifted input distributions.

**Methods.** To solve this problem, we used the classical method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation. This method allows to obtaining a solution for the average waiting time for the systems under consideration in a closed form. The method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation plays an important role in the theory of systems G/G/1. For the practical application of the results obtained, the well-known method of moments of probability theory is used.

**Results.** For the first time, spectral expansions are obtained for the solution of the Lindley integral equation for systems with delay, which are used to derive formulas for the average waiting time in a queue in closed form. The paper presents the final studies for the remaining eight delay systems.

**Conclusions.** It is shown that in systems with delay, the average waiting time is less than in the usual systems. The obtained formula for the average waiting time expands and complements the well-known queueing theory incomplete formula for the average waiting time for G/G/1 systems. This approach allows us to calculate the average latency for these systems in mathematical packages for a wide range of traffic parameters. In addition to the average waiting time, such an approach makes it possible to determine also moments of higher orders of waiting time. Given the fact that the packet delay variation (jitter) in telecommunications is defined as the spread of the waiting time from its average value, the jitter can be determined through the variance of the waiting time.

**KEYWORDS:** delayed system, shifted distributions, Laplace transform, Lindley integral equation, spectral decomposition method.

**ABBREVIATIONS**

LIE is a Lindley integral equation;  
QS is a queueing system;  
PDF is a probability distribution function.

**NOMENCLATURE**

$a(t)$  is a density function of the distribution of time between arrivals;

$A^*(s)$  is a Laplace transform of the function  $a(t)$ ;

$b(t)$  is a density function of the distribution of service time;

$B^*(s)$  is a Laplace transform of the function  $b(t)$ ;

$c_\lambda$  is a coefficient of variation of time between arrivals;

$c_\mu$  is a coefficient of variation of service time;

$E_2$  is a Erlang distribution of the second order;

$E_2^-$  is a shifted Erlang distribution of the second order;

G is a arbitrary distribution law;

$H_2$  is a hyperexponential distribution of the second order;

$H_2^-$  is a shifted hyperexponential distribution of the second order;

$HE_2$  is a hypererlangian distribution of the second order;

$HE_2^-$  is a shifted hypererlangian distribution of the second order;

$M$  is a exponential distribution law;

$M^-$  is a shifted exponential distribution law;

$\bar{W}$  is a average waiting time in the queue;

$W^*(s)$  is a Laplace transform of waiting time density function;

$\lambda$  is a Erlang (exponential) distribution parameter for input flow;

$\lambda_1, \lambda_2$  are parameters of the hyperexponential (hyperrelangian) distribution law of the input flow;

$\mu$  is a Erlang (exponential) distribution parameter for of service time;

$\mu_1, \mu_2$  are parameters of the hyperexponential (hyperrelangian) distribution law of service time;

$\rho$  is a system load factor;

$\bar{\tau}_\lambda$  is a average time between arrivals;

$\bar{\tau}_\lambda^2$  is a second initial moment of time between arrivals;

$\bar{\tau}_\mu$  is a average service time;

$\bar{\tau}_\mu^2$  is a second initial moment of service time;

$\Phi_+(s)$  is a Laplace transform of the PDF of waiting time;

$\psi_+(s)$  is a first component of spectral decomposition;

$\psi_-(s)$  is a second component of spectral decomposition.

## INTRODUCTION

In the study of G/G/1 systems, an important role is played by the method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation (LIE) and most of the results in the queueing theory are obtained using this method. The most accessible this method with specific examples is described in the classic queueing theory [1].

This article is devoted to the analysis of QS with time lag, i.e. systems with input distributions shifted to the right from the zero point. The latest results on such systems are published in [2–7]. This article summarizes the research results for the remaining eight out of sixteen possible systems. In [2–7], as well as in previous works of the authors, it was shown that the average waiting time for a request in the queue in systems with time lag is less than in conventional systems with the same load factor. This is achieved due to the fact that the numerical characteristics  $c_\lambda$  and  $c_\mu$  decrease with the introduction of the delay parameter  $t_0 > 0$ . Thus, the operation of shifting the distribution law transforms Markov systems into non-Markov systems.

The results of works [2–7] together with [1] allowed to develop the method of spectral decomposition of the solution (LIE) for the study of systems  $HE_2^- / M^- / 1$ ,

$M^- / HE_2^- / 1$ ,  $H_2^- / E_2^- / 1$ ,  $E_2^- / HE_2^- / 1$ ,  $E_2^- / HE_2^- / 1$ ,  $HE_2^- / H_2^- / 1$ ,  $HE_2^- / E_2^- / 1$  и  $H_2^- / HE_2^- / 1$ . Hereinafter, the superscript “-” will mean the operation of shifting the distribution law.

All the QS considered in the article, formed of the four most known shifted laws of distributions  $M^-$ ,  $E_2^-$ ,  $H_2^-$ ,  $HE_2^-$  are of type G/G/1.

In the queueing theory, the studies of G/G/ systems are relevant due to the fact that they are actively used in modern teletraffic theory, moreover, it is impossible to obtain solutions for such systems in the final form for the general case.

**The object of study** is the queueing systems type G/G/1.

**The subject of study** is the main characteristics of the systems – the average waiting time of requirements in the queue.

**The purpose of the work** is obtaining a solution for the average waiting time of requirements in the queue in closed form for the above-mentioned systems.

## 1 PROBLEM STATEMENT

The paper poses the problem of finding the solution of the average waiting time of claims in a queue in the queueing systems, formed by four distribution laws shifted to the right from the zero point:  $M^-$ ,  $E_2^-$ ,  $H_2^-$ ,  $HE_2^-$ . These four laws of distributions form  $4 \times 4 = 16$  different QS G/G/1. The results for the first eight QS are presented in [2].

When using the method of spectral decomposition of a LIE solution to determine the average waiting time, we will follow the approach and symbolism of the author of the classical queueing theory [1]. To solve the problem, it is necessary to find the law of waiting time distribution in the system through the spectral decomposition of the form:  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$ , where  $\psi_+(s)$  and  $\psi_-(s)$  are some fractional rational functions of  $s$  that can be factorized. Functions  $\psi_+(s)$  and  $\psi_-(s)$  must satisfy special conditions according to [1], which are omitted here.

To solve this problem, it is first necessary to construct spectral expansions of the form  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$  for these systems, considering special conditions in each case.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation was first presented in detail in the classic queueing theory [1], and was subsequently used in many papers, including [8, 9, 13]. A different approach to solving Lindley’s equation has been used in the Russian-language scientific literature. That work used factorization instead of the term “spectral

decomposition” and instead of the functions  $\psi_+(s)$  and  $\psi_-(s)$  it used factorization components  $\omega_+(z, t)$  and  $\omega_-(z, t)$  of the function  $1 - z \cdot \chi(t)$ , where  $\chi(t)$  is the characteristic function of a random variable  $\xi$  with an arbitrary distribution function  $C(t)$ , and  $z$  is any number from the interval  $(-1, 1)$ . This approach for obtaining end results for systems under consideration is less convenient than the approach described and illustrated with numerous examples in [1].

The practical application of the method of spectral decomposition of the LIE solution for the study of systems with different input distributions is shown in [2–7], as well as in previous works of the authors.

In [10, 11] presents the results of the approach of queues to the Internet and mobile services as queues with a delay in time. It is shown that if information is delayed long enough, a Hopf bifurcation can occur, which can cause unwanted fluctuations in the queues. However, it is not known how large the fluctuations are when the Hopf bifurcation occurs. This is the first publications in the English-language journals about queues with a delay. Approximate methods with respect to the laws of distributions are described in detail in [9, 13, 14, 23, 24], and similar studies in queuing theory have recently been carried out in [15–22].

### 3 MATERIALS AND METHODS

Consider the class of density functions  $f(t)$ , which are Laplace-convertible, that is, for which there is a function  $F^*(s) = \int_0^\infty e^{-st} f(t) dt \equiv L[f(t)]$ . Next, we use the delay theorem as a property of the Laplace transform: for any  $t_0 > 0$ , the equality will be satisfied

$$L[f(t - t_0)] = e^{-st_0} \cdot F^*(s), \quad (1)$$

where  $\text{Re}(s) > 0$ . The considered density functions  $M, E_2, H_2, HE_2$  belong to this class.

In [2–7], using equality (1), obtained spectral decompositions  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$  and derived formulas for the average waiting time for eight systems. Based on these results, we can now formulate a general statement.

**Statement.** Spectral expansions  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$  of the LIE solution for all with delay formed by the distribution laws from Table. 1 completely coincide with the spectral expansions for the corresponding usual systems. Thus, the main expression  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$  of the spectral decomposition is invariant to the operation of the time shift of the density function.

**Corollary.** The formulas for the average waiting time for all systems with shifted distributions will have exactly the same form as for the corresponding systems with ordinary distributions, but with changed parameters due to the time shift operation [2–7]. Consequently, the average waiting time for systems with lag actually depends on the magnitude of the shift parameter  $t_0 > 0$ .

Next, we present the main results obtained for the systems  $HE_2^- / M^- / 1, M^- / HE_2^- / 1, H_2^- / E_2^- / 1, E_2^- / HE_2^- / 1, E_2^- / HE_2^- / 1, HE_2^- / H_2^- / 1, HE_2^- / E_2^- / 1$  и  $H_2^- / HE_2^- / 1$ . To do this, we first summarize in Table 1 the numerical characteristics of the considered distribution laws, which are used in [2–7].

The numerical characteristics of the shifted distributions (Table 1) clearly indicate a significant influence on them of the shift parameter  $t_0$ . Now it is necessary to determine the unknown parameters of these distributions. These parameters were also obtained in [2–7] and for the cases of density functions of the distribution of intervals of input flows  $a(t)$  are given in Table 2. Similar parameters for the service time distributions  $b(t)$  will take place by replacing  $\lambda$  with  $\mu$ .

Table 1 – Numerical Characteristics of Distributions

Distribution laws	$\bar{\tau}_\lambda$	$\bar{\tau}_\lambda^2$	$c_\lambda^2$
M	$1/\lambda$	$2/\lambda^2$	1
$E_2$	$1/\lambda$	$3/(2\lambda^2)$	1/2
$H_2$	$p/\lambda_1 + (1-p)/\lambda_2$	$2[p/\lambda_1^2 + (1-p)/\lambda_2^2]$	$\frac{(1-p^2)\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2p(1-p) + p(2-p)\lambda_2^2}{[(1-p)\lambda_1 + p\lambda_2]^2}$
$HE_2$	$p/\lambda_1 + (1-p)/\lambda_2$	$3p/(2\lambda_1^2) + 3(1-p)/(2\lambda_2^2)$	$\frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[(1-p)\lambda_1 + p\lambda_2]^2}$
$M^-$	$\frac{1}{\lambda} + t_0$	$2(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{t_0}{\lambda}) + t_0^2$	$\frac{1}{(1 + \lambda t_0)^2}$
$E_2^-$	$\frac{1}{\lambda} + t_0$	$\frac{3}{2\lambda^2} + 2\frac{t_0}{\lambda} + t_0^2$	$\frac{1}{2(1 + \lambda t_0)^2}$
$H_2^-$	$\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2} + t_0$	$t_0^2 + 2t_0[\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}] + 2[\frac{p}{\lambda_1^2} + \frac{(1-p)}{\lambda_2^2}]$	$\frac{(1-p^2)\lambda_1^2 - 2\lambda_1\lambda_2p(1-p) + p(2-p)\lambda_2^2}{[t_0\lambda_1\lambda_2 + (1-p)\lambda_1 + p\lambda_2]^2}$
$HE_2^-$	$\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2} + t_0$	$t_0^2 + 2t_0[\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}] + \frac{3p}{2\lambda_1^2} + \frac{3(1-p)}{2\lambda_2^2}$	$\frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_2(\lambda_1 - \lambda_2) + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[t_0\lambda_1\lambda_2 - p(\lambda_1 - \lambda_2) + \lambda_1]^2}$

Table 2 – The parameters of the shifted distributions obtained by the method of moments

Distribution laws	Density function $a(t)$	Parameters $p, \lambda, \lambda_1, \lambda_2$		
$M^-$	$\lambda e^{-\lambda(t-t_0)}$	$\lambda = \frac{1}{\bar{c}_\lambda - t_0}$		
$E_2^-$	$4\lambda^2(t-t_0)e^{-2\lambda(t-t_0)}$	$\lambda = \frac{1}{\bar{c}_\lambda - t_0}$		
$H_2^-$	$p\lambda_1 e^{-\lambda_1(t-t_0)} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2(t-t_0)}$	$p = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{(\bar{c}_\lambda - t_0)^2}{2[(\bar{c}_\lambda - t_0)^2 + c_\lambda^2 \bar{c}_\lambda^2]}}$	$\lambda_1 = \frac{2p}{(\bar{c}_\lambda - t_0)}$	$\lambda_2 = \frac{2(1-p)}{(\bar{c}_\lambda - t_0)}$
$HE_2^-$	$4p\lambda_1^2(t-t_0)e^{-2\lambda_1(t-t_0)} + 4(1-p)\lambda_2^2(t-t_0)e^{-2\lambda_2(t-t_0)}$	$p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{3(\bar{c}_\lambda - t_0)^2}{8[(\bar{c}_\lambda - t_0)^2 + c_\lambda^2 \bar{c}_\lambda^2]}}$	$\lambda_1 = \frac{2p}{(\bar{c}_\lambda - t_0)}$	$\lambda_2 = \frac{2(1-p)}{(\bar{c}_\lambda - t_0)}$

Table 3 – The Laplace transform of the waiting time density function, the components of the spectral decompositions of the LIE solution, the expressions for the mean waiting time

QS	The Laplace transform of the waiting time density function and the components of the spectral decompositions	The expressions for the average waiting time
$HE_2^- / M^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1(s+\mu)}{\mu(s+s_1)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)}{(\mu+s)}, \psi_-(s) = -\frac{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}{(s-s_2)(s-s_3)(s-s_4)}$	$\bar{W} = 1/s_1 - 1/\mu$ , where $s_1$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$M^- / HE_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4(2\mu_1+s)^2(2\mu_2+s)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)(s+\sigma_3)(s+\sigma_4)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)(s+\sigma_3)(s+\sigma_4)}{(2\mu_1+s)^2(2\mu_2+s)^2}, \psi_-(s) = \lambda - s$	$\bar{W} = \frac{\lambda}{2(1-p)}$
$H_2^- / E_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1s_2(s+2\mu)^2}{4\mu^2(s+s_1)(s+s_2)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)}{(s+2\mu)^2}, \psi_-(s) = -(\lambda_1-s)(\lambda_2-s)/(s-s_3)$	$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu}$ , where $s_1, s_2$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$E_2^- / HE_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{\sigma_1\sigma_2\sigma_3\sigma_4(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)(s+\sigma_3)(s+\sigma_4)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+\sigma_1)(s+\sigma_2)(s+\sigma_3)(s+\sigma_4)}{(2\mu_1+s)^2(2\mu_2+s)^2}, \psi_-(s) = -\frac{(2\lambda-s)^2}{(s-\sigma_5)}$	$\bar{W} = \frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2} + \frac{1}{\sigma_3} + \frac{1}{\sigma_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}$ , where $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$E_2^- / H_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1s_2(s+\mu_1)(s+\mu_2)}{(s+s_1)(s+s_2)\mu_1\mu_2}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)}{(s+\mu_1)(s+\mu_2)}, \psi_-(s) = -\frac{(2\lambda-s)^2}{s-s_3}$	$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}$ , where $s_1, s_2$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$HE_2^- / H_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1s_2(s+\mu_1)(s+\mu_2)}{\mu_1\mu_2(s+s_1)(s+s_2)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)}{(s+\mu_1)(s+\mu_2)}, \psi_-(s) = -\frac{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}{(s-s_3)(s-s_4)(s-s_5)}$	$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}$ , where $s_1, s_2$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$HE_2^- / E_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1s_2(s+2\mu)^2}{4\mu^2(s+s_1)(s+s_2)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)}{(2\mu+s)^2}, \psi_-(s) = -\frac{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2}{(s-s_3)(s-s_4)(s-s_5)}$	$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu}$ , where $s_1, s_2$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .
$H_2^- / HE_2^- / 1$	$W^*(s) = \frac{s_1s_2s_3s_4(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}, \psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}{[(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2]}, \psi_-(s) = -\frac{(\lambda_1-s)(\lambda_2-s)}{(s-s_5)}$	$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \frac{1}{s_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}$ , where $s_1, s_2, s_3, s_4$ absolute values of negative zeros of the function numerator $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ .

Table 3 shows the Laplace transformations of the waiting time density function in the queues in the systems under consideration, the components of the spectral expansions of the LIE solution, as well as the expressions for the average waiting time in the corresponding systems.

A detailed description of the algorithms for calculating the average waiting time for the systems under consideration can be found in [2–7]. Thus, the published results for the last eight of the sixteen systems are presented here.

#### 4 EXPERIMENTS

The results of numerical simulation are presented to confirm the adequacy of the proposed QS models with time lag. Tables 4–6 below show the data of calculations in the Mathcad package for three systems  $HE_2^- / M^- / 1$ ,  $E_2^- / H_2^- / 1$ ,  $H_2^- / HE_2^- / 1$  for cases of low, medium and high load  $\rho = 0.1; 0.5; 0.9$  for a wide range of  $c_\lambda$ ,  $c_\mu$  and a shift parameter  $t_0$ .

Table 4 – Results of experiments for QS  $HE_2^- / M^- / 1$  and  $HE_2 / M / 1$

Input parameters		Average waiting time			
$\rho$	$c_\mu$ $c_\lambda$	For QS $HE_2^- / M^- / 1$			For QS $HE_2 / M / 1$
		$c_\mu = 0,1$ ( $t_0=0.9$ )	$c_\mu = 0,5$ ( $t_0=0.5$ )	$c_\mu = 0,99$ ( $t_0=0.01$ )	
0.1	0.71	0.000	0.005	0.029	0.03
	2	0.000	0.013	0.078	0.08
	4	0.000	0.016	0.094	0.10
	8	0.000	0.017	0.099	0.11
0.5	0.71	0.005	0.181	0.610	0.62
	2	0.008	0.458	1.966	2.00
	4	0.009	0.599	4.503	4.62
	8	0.009	0.655	9.706	10.15
0.9	0.71	0.344	2.956	6.516	6.61
	2	0.805	16.002	22.465	22.59
	4	1.102	60.607	77.044	77.28
	8	1.260	238.99	295.29	295.96

Table 5 – Results of experiments for QS  $E_2^- / H_2^- / 1$  at  $c_\mu = 2$  for the  $E_2 / H_2 / 1$  system

Input parameters			Average waiting time		
$\rho$	$c_\lambda$	$c_\mu$	$t_0$	For QS $E_2^- / H_2^- / 1$	For QS $E_2 / H_2 / 1$
0.1	0.637	1.005	0.99	0.055	0.160
	0.672	1.333	0.5	0.065	
	0.700	1.818	0.1	0.128	
	0.706	1.980	0.01	0.156	
	0.707	1.998	0.001	0.159	
0.5	0.357	1.005	0.99	0.504	2.094
	0.530	1.333	0.5	0.877	
	0.672	1.818	0.1	1.716	
	0.704	1.980	0.01	2.051	
	0.707	1.998	0.001	2.089	
0.9	0.077	1.005	0.99	4.544	20.072
	0.389	1.333	0.5	8.473	
	0.643	1.818	0.1	16.538	
	0.701	1.980	0.01	19.674	
	0.707	1.998	0.001	20.031	

Table 6 – Results of experiments for QS  $H_2^- / HE_2^- / 1$  and  $H_2 / HE_2 / 1$

Input parameters		Average waiting time			
$\rho$	$(c_\lambda; c_\mu)$	For QS $H_2^- / HE_2^- / 1$			For QS $H_2 / HE_2 / 1$
		$t_0=0.99$	$t_0=0.5$	$t_0=0.01$	
0.1	(1;0.71)	0.03	0.04	0.09	0.09
	(1;1)	0.06	0.07	0.11	0.11
	(2;2)	0.23	0.36	0.44	0.45
	(4;4)	0.93	1.56	1.79	1.79
	(8;8)	3.74	6.38	7.16	7.17
0.5	(1;0.71)	0.26	0.48	0.75	0.76
	(1;1)	0.51	0.75	0.99	1.00
	(2;2)	2.04	3.15	4.03	4.04
	(4;4)	8.15	12.73	16.17	16.24
	(8;8)	32.62	51.07	64.58	64.84
0.9	(1;0.71)	2.49	6.00	6.77	6.77
	(1;1)	4.73	8.29	9.06	9.08
	(2;2)	18.92	33.20	36.14	36.17
	(4;4)	75.69	123.39	144.63	144.77
	(8;8)	302.78	528.43	577.29	577.88

Results for systems with a delay are compared with results for usual systems. It is obvious that the average waiting time in a system with a delay depends on the shift parameter  $t_0$ . The load factor  $\rho$  in both tables is determined by the ratio of average intervals  $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda$ . The calculations used the normalized service time  $\bar{\tau}_\mu = 1$ .

#### 5 RESULTS

The paper presents mathematical models of eight systems with time lag. As one would expect, a decrease in the coefficients of variation  $c_\lambda$  and  $c_\mu$  due to the introduction of the shift parameter  $t_0 > 0$  into the laws of the distributions of the input flow and service time, entails a decrease in the average waiting time in systems with a delay several times. This is the main result of the presented models.

The adequacy of the presented results is fully confirmed by the fact that when the shift parameter  $t_0$  tends to zero, the average waiting time in the delayed system tends to its value in the usual system.

If conventional systems, including exponential and Erlang distributions, are applicable only for point values of the input parameters, then systems with delay are applicable for interval values of these parameters. This is the second most important result and the advantage of the presented systems.

The above calculation results are in good agreement with the results of work [25] in the range of parameters in which the systems under consideration are valid.

#### 6 DISCUSSION

The operation of the shift in time on the one hand, leads to an increase in system load with a delay.

The time shift operation, on the other hand, reduces the variation coefficients of the interval between receipts and of the service time of requirements. Since the average waiting time in the system  $G/G/1$  is related to the

coefficients of variation of the arrival and servicing intervals by a quadratic dependence, the average waiting time in the delayed system will be less than in the usual system under the same load factor.

For example, for the  $E_2^-/H_2^-/1$  system when loading  $\rho=0.9$  and the shift parameter  $t_0=0.99$ , the variation coefficient  $c_\lambda$  of the interval between receipts decreases from  $1/\sqrt{2}$  for a usual system to 0.077. The service time variation coefficient  $c_\mu$  decreases from 2 to 1.005, and the waiting time decreases from 20.072 units of time for a usual system to almost 4.544 units of time for a delayed system (Table 5).

In addition, the introduction of the shift parameter leads to a fairly wide range of variation in the coefficients of variation  $c_\lambda$  and  $c_\mu$ , in contrast to usual systems, which are applicable only in the case of fixed values of the coefficients of variation. Therefore, systems with delay extend the range of their applicability in the modern theory of teletraffic.

### CONCLUSIONS

The paper presents the spectral expansions of the solution of the Lindley integral equation for eight systems with delay, which are used to derive expressions for the average waiting time in the queue for these systems in closed form.

**The scientific novelty** of the results is that spectral expansions of the solution of the Lindley integral equation for the systems under consideration are obtained and with their help the calculated expressions for the average waiting time in the queue for systems with delay in closed form are derived. These expressions complement and expands the well-known incomplete formula for the average waiting time in the G/G/1 systems with arbitrary laws of input flow distribution and service time.

**The practical significance** of the work lies in the fact that the obtained results can be successfully applied in the modern theory of teletraffic, where the delays of incoming traffic packets play a primary role. For this, it is necessary to know the numerical characteristics of the incoming traffic intervals and the service time at the level of the first two moments, which does not cause difficulties when using modern traffic analyzers [12].

**Prospects for further research** are seen in the continuation of the study of systems of type G/G/1 with other common input distributions and in expanding and supplementing the formulas for average waiting time.

### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out as part of the author's scientific school "Methods and Models for the Research of Computing Systems and Networks", registered at the Russian Academy of Natural Sciences on 31.03.2015 and was supported by the University of PSUTI.

### REFERENCES

1. Kleinrock L. Queueing Systems, Vol. I. Theory. New York, Wiley, 1975, 417 p.

2. Tarasov V. N. Queueing systems with delay, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 3, pp. 55–63. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-7
3. Tarasov V. N. The analysis of two queueing systems HE2/M/1 with ordinary and shifted input distributions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 2, pp. 71–79. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-8
4. Tarasov V. N., Bakhareva N. F. Comparative analysis of two queueing systems M/HE2/1 with ordinary and with the shifted input distributions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 4, pp. 50–58. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-5
5. Tarasov V. N. Analysis of H-2/E-2/1 system and her of the analog with shifted input distributions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 1, pp. 90–97. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-10
6. Tarasov V. N., Bakhareva N. F. Model of teletraffic based on queueing systems E-2/HE2/1 with ordinary and shifted input distributions, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, No. 2, pp. 65–74. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-7
7. Tarasov V. N. Research of two systems E-2/H-2/1 with ordinary and shifted distributions by the spectral decomposition method, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, №3, pp. 69–77. DOI 10.15588/1607-3274-2020-3-6
8. Brannstrom N. A. Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004, 79 p.
9. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods, *Operation Research*, 1982, Vol. 30, No. 1, pp. 125–147.
10. Novitzky S., Pender J., Rand R.H., Wesson E. Limiting the oscillations in queues with delayed information through a novel type of delay announcement, *Queueing Systems*, 2020, Vol. 95, pp. 281–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-020-09657-9>
11. Novitzky S., Pender J., Rand R. H., Wesson E. Nonlinear Dynamics in Queueing Theory: Determining the Size of Oscillations in Queues with Delay, *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.*, 18–1 2019, Vol. 18, No. 1, pp. 279–311. DOI: <https://doi.org/10.1137/18M1170637>
12. RFC 3393 [IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)] Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393>. (accessed: 26.02.2016).
13. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. Teletraffic and datatrafic in a Period of Change. ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683–688.
14. Aliev T. I. Approximation of Probability Distributions in Queueing Models, *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*, 2013, № 2, pp. 88–93.
15. Aras A. K., Chen X. & Liu Y. Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment, *Queueing Systems*, 2018, Vol. 89, No. 1, pp. 81–125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0>
16. Jennings O.B. & Pender J. Comparisons of ticket and standard queues, *Queueing Systems*, 2016, Vol. 84, No. 1, pp. 145–202. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-016-9493-y>
17. Gromoll H.C., Terwilliger B. & Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times, *Queueing*

- Systems*, 2018, Vol. 89, No. 3, pp. 213–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9560-z>
18. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates, *Queueing Systems*, 2018, Vol. 89, No. 3, pp. 269–301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9557-7>
19. Bazhba M., Blanchet J., Rhee CH., et al. Queue with heavy-tailed Weibull service times, *Queueing Systems*, 2019, Vol. 93, No. 11, pp. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09640-z/>
20. Adan I., D'Auria B., Kella O. Special volume on 'Recent Developments in Queueing Theory' of the third ECQT conference. *Queueing Systems*, 2019, Vol. 93, No. 1, pp. 1–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09630-1>
21. Adan I., D'Auria B., Kella O. Special volume on 'Recent Developments in Queueing Theory' of the third ECQT conference: part 2, *Queueing Systems*, 2019, pp. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09637-8>
22. Tibi D. Martingales and buffer overflow for the symmetric shortest queue model. *Queueing Systems*, 2019, Vol. 93, pp. 153–190. DOI: [10.1007/s11134-019-09628-9](https://doi.org/10.1007/s11134-019-09628-9)
23. Jacobovic R., Kella O. Asymptotic independence of regenerative processes with a special dependence structure. *Queueing Systems*, 2019, Vol. 93, pp. 139–152. DOI: [10.1007/s11134-019-09606-1](https://doi.org/10.1007/s11134-019-09606-1)
24. Wang L., Kulkarni V. Fluid and diffusion models for a system of taxis and customers with delayed matching. *Queueing Systems*, 2020, Vol. 96, pp. 101–131. DOI: [10.1007/s11134-020-09659-7](https://doi.org/10.1007/s11134-020-09659-7)
25. Kruglikov V. K., Tarasov V. N. Analysis and calculation of queueing-networks using the two-dimensional diffusion-approximation, *Automation and Remote Control*, 1983, Vol. 44, No. 8, pp. 1026–1034.

Received 08.08.2021  
Accepted 15.10.2021

УДК 621.391.1:621.395

### СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З ЗАПІЗНЕННЯМ У ЧАСІ

**Тарасов В. Н.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення та управління в технічних системах Поволзького державного університету телекомунікацій та інформатики, Російська Федерація.

**Бахарєва Н. Ф.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики та обчислювальної техніки Поволзького державного університету телекомунікацій та інформатики, Російська Федерація.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** У теорії масового обслуговування дослідження систем G/G/1 актуальні через те, що не можна отримати рішення для часу очікування в кінцевому вигляді в загальному випадку при довільних законах розподілів вхідного потоку і часу обслуговування. Тому є важливими дослідження таких систем для окремих випадків вхідних розподілів. Розглянуто задачу виведення рішень для середнього часу очікування в черзі у замкнутій формі для систем зі зсунутими вправо від нульової точки вхідними розподілами.

**Мета роботи.** Отримання рішення для основної характеристики системи – середнього часу очікування вимог у черзі для двох систем масового обслуговування типу G/G/1 зі зсунутими вхідними розподілами.

**Метод.** Для вирішення поставленого завдання був використаний класичний метод спектрального розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі. Цей метод дозволяє отримати рішення для середнього часу очікування для розглянутих систем у замкнутій формі. Метод спектрального розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі грає важливу роль у теорії систем G/G/1. Для практичного застосування отриманих результатів було використано відомий метод моментів теорії ймовірностей.

**Результати.** Вперше отримано спектральні розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі для розглянутих систем, за допомогою яких виведені розрахункові вирази для середнього часу очікування в черзі у замкнутій формі. У роботі подані завершальні дослідження для решти восьми систем з запізненням.

**Висновки.** Показано, що у системах з запізненням у часі середній час очікування менше, ніж у звичайних системах. Отримані розрахункові вирази для часу очікування розширюють і доповнюють відому незавершену формулу теорії масового обслуговування для середнього часу очікування для систем G/G/1. Такий підхід дозволяє розрахувати середній час очікування для зазначених систем в математичних пакетах для широкого діапазону зміни параметрів трафіку. Отримані результати з успіхом можуть бути застосовані в сучасній теорії телетрафіку, де затримки пакетів вхідного трафіку відіграють першорядну роль. Крім середнього часу очікування, такий підхід дає можливість також визначити моменти вищих порядків часу очікування. З огляду на той факт, що варіація затримки пакетів (джиттер) в телекомунікації визначається як дисперсія часу очікування від його середнього значення, то джиттер можна буде визначити через дисперсію часу очікування.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** система з запізненням, зсунуті розподіли, перетворення Лапласа, інтегральне рівняння Ліндлі, метод спектрального розкладання.



## СИСТЕМЫ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

**Тарасов В. Н.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация.

**Бахарева Н. Ф.** – д-р техн. наук, профессор, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В теории массового обслуживания исследования систем G/G/1 актуальны в связи с тем, что нельзя получить решения для времени ожидания в конечном виде в общем случае при произвольных законах распределений входного потока и времени обслуживания. Поэтому важны исследования таких систем для частных случаев входных распределений. Рассмотрена задача вывода решений для среднего времени ожидания в очереди в замкнутой форме для систем со сдвинутыми вправо от нулевой точки входными распределениями.

**Цель работы.** Получение решения для основной характеристики систем – среднего времени ожидания требований в очереди для систем массового обслуживания (СМО) типа G/G/1 со сдвинутыми входными распределениями.

**Метод.** Для решения поставленной задачи использован классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли. Данный метод позволяет получить решение для среднего времени ожидания для рассматриваемых систем в замкнутой форме. Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли играет важную роль в теории систем G/G/1. Для практического применения полученных результатов использован известный метод моментов теории вероятностей.

**Результаты.** Впервые получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для систем, с помощью которых выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди в замкнутой форме. В работе представлены заключительные исследования для оставшихся восьми систем с запаздыванием во времени.

**Выводы.** Получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемых систем и с их помощью выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для этих систем в замкнутой форме. Показано, что в системах с запаздыванием во времени среднее время ожидания меньше, чем в обычных системах. Полученные расчетные выражения для времени ожидания расширяют и дополняют известную незавершенную формулу теории массового обслуживания для среднего времени ожидания для систем G/G/1. Такой подход позволяет рассчитать среднее время ожидания для указанных систем в математических пакетах для широкого диапазона изменения параметров трафика. Кроме среднего времени ожидания, такой подход дает возможность определить и моменты высших порядков времени ожидания. Учитывая тот факт, что вариация задержки пакетов (джиттер) в телекоммуникациях определяется как разброс времени ожидания от его среднего значения, то джиттер можно будет определить через дисперсию времени ожидания.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** система с запаздыванием, сдвинутые распределения, преобразование Лапласа, интегральное уравнение Линдли, метод спектрального разложения.

### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Kleinrock L. *Queueing Systems, Vol. I: Theory* / L. Kleinrock. – New York : Wiley, 1975. – 417 p.
2. Tarasov V. N. *Queueing systems with delay* / V. N. Tarasov // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – Vol. 50, No. 3. – P. 55–63. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-7
3. Tarasov V. N. *The analysis of two queueing systems HE2/M/1 with ordinary and shifted input distributions* / V. N. Tarasov // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – No. 2. – P. 71–79. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-8
4. Tarasov V. N. *Comparative analysis of two queueing systems M/HE2/1 with ordinary and with the shifted input distributions* / V. N. Tarasov, N. F. Bakhareva // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – No. 4. – P. 50–58. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-5
5. Tarasov V. N. *Analysis of H-2/E-2/1 system and her of the analog with shifted input distributions* / V. N. Tarasov // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 52, No. 1. – P. 90–97. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-1-10
6. Tarasov V. N. *Model of teletraffic based on queueing systems E-2/HE2/1 with ordinary and shifted input distributions* / V. N. Tarasov, N. F. Bakhareva // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 53, No. 2. – P. 65–74. DOI: 10.15588/1607-3274-2020-2-7
7. Tarasov V. N. *Research of two systems E-2/H-2/1 with ordinary and shifted distributions by the spectral decomposition method* / V. N. Tarasov // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2020. – Vol. 54, №3. – P. 69–77. DOI 10.15588/1607-3274-2020-3-6
8. Brannstrom N. *A Queueing Theory analysis of wireless radio systems* / N. Brannstrom. – Applied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004. – 79 p.
9. Whitt W. *Approximating a point process by a renewal process: two basic methods* / W. Whitt // *Operation Research.* – 1982. – № 1. – P. 125–147.
10. *Limiting the oscillations in queues with delayed information through a novel type of delay announcement* / [S. Novitzky, J. Pender, R. H. Rand, E. Wesson] // *Queueing Systems.* – 2020. – Vol. 95. – P. 281–330. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-020-09657-9>
11. *Nonlinear Dynamics in Queueing Theory: Determining the Size of Oscillations in Queues with Delay* / [S. Novitzky, J. Pender, R. H. Rand, E. Wesson] // *SIAM J. Appl. Dyn. Syst.* – 2019. – № 1. – P. 279–311. DOI: <https://doi.org/10.1137/18M1170637>
12. [HTTPS://tools.ietf.org/html/rfc3393](https://tools.ietf.org/html/rfc3393). RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) (дата обращения: 26.02.2016).

13. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals / A. Myskja // *Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13*. Elsevier Science Publishers. – 1991. – P.683–688.
14. Aliev T. I. Approximation of Probability Distributions in Queuing Models / T. I. Aliev // *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics*. – 2013. – № 2. – P. 88–93.
15. Aras A. K. Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment / A.K. Aras, X. Chen, Y. Liu // *Queueing Systems*. – 2018. – Vol. 89, No. 1. – P. 81–125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0>
16. Jennings O. B. Comparisons of ticket and standard queues / O. B. Jennings, J. Pender // *Queueing Systems*. – 2016. – Vol. 84, No. 1. – P. 145–202. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-016-9493-y>
17. Gromoll H. C., Terwilliger B. & Zwart B. Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times / H. C. Gromoll, B. Terwilliger, B. Zwart // *Queueing Systems*. – 2018. – Vol. 89, No. 3. – P. 213–241. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9560-z>
18. Legros B. M/G/1 queue with event-dependent arrival rates / B. Legros // *Queueing Systems*. – 2018. – Vol. 89, No. 3. – P. 269–301. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9557-7>
19. Bazhba M. Queue with heavy-tailed Weibull service times / M. Bazhba, J. Blanchet, C. H. Rhee // *Queueing Systems*. – 2019. – Vol. 93, No. 11. – P. 1–32. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09640-z/>
20. Adan I. Special volume on ‘Recent Developments in Queueing Theory’ of the third ECQT conference / I. Adan, B. D’Auria, O. Kella // *Queueing Systems*. – 2019. – Vol. 93, No. 1. – P. 1–190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09630-1>
21. Adan I. Special volume on ‘Recent Developments in Queueing Theory’ of the third ECQT conference: part 2 / I. Adan, B. D’Auria, O. Kella // *Queueing Systems*. – 2019. – P. 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-019-09637-8>
22. Tibi D. Martingales and buffer overflow for the symmetric shortest queue model / D. Tibi // *Queueing Systems*. – 2019. – Vol. 93. – P. 153–190. DOI: [10.1007/s11134-019-09628-9](https://doi.org/10.1007/s11134-019-09628-9)
23. Jacobovic R. Asymptotic independence of regenerative processes with a special dependence structure / R. Jacobovic, O. Kella // *Queueing Systems*. – 2019. – Vol. 93. – P. 139–152. DOI: [10.1007/s11134-019-09606-1](https://doi.org/10.1007/s11134-019-09606-1)
24. Wang L. Fluid and diffusion models for a system of taxis and customers with delayed matching / L. Wang, V. Kulkarni // *Queueing Systems*. – 2020. – Vol. 96. – P. 101–131. DOI: [10.1007/s11134-020-09659-7](https://doi.org/10.1007/s11134-020-09659-7)
25. Kruglikov V. K., Tarasov V. N. Analysis and calculation of queuing-networks using the two-dimensional diffusion-approximation / V. K. Kruglikov, V. N. Tarasov // *Automation and Remote Control*. – 1983. – Vol. 44, № 8. – P. 1026–1034.

# НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

### НЕЙРОІНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

UDC 004.932.2:004.93'1

#### STATISTICAL DATA ANALYSIS TOOLS IN IMAGE CLASSIFICATION METHODS BASED ON THE DESCRIPTION AS A SET OF BINARY DESCRIPTORS OF KEY POINTS

**Gadetska S. V.** – PhD, Associated Professor of Dep. of Higher Mathematics, Kharkiv National Automobile and Road University, Kharkiv, Ukraine.

**Gorokhovatskyi V. O.** – Dr. Sc., Professor of the Department of Informatics, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

**Stiahlyk N. I.** – PhD, Head of the Department of Information Technologies and Mathematical Modeling, Educational and Scientific Institute “Karazin Banking Institute” V. N. Karazin Kharkiv National University., Kharkiv, Ukraine.

**Vlasenko N. V.** – PhD, Associated Professor of Dep. of Informatics and computer Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine.

#### ABSTRACT

**Context.** Modern computer vision systems require effective classification solutions based on the research of the the processed data nature. Statistical distributions are currently the perfect tool for representing and analyzing visual data in image recognition systems. If the description of a recognized object is represented by a set of vectors, the statistical apparatus becomes fundamental for making a classification decision. The study of data distributions in the feature blocks systems for key point descriptors has shown its effectiveness in terms of achieving the necessary quality of classification and processing speed. There is a need for in-depth study of the descriptor sets statistical properties in terms of the main aspect – the multidimensional data separation for classification. This task becomes especially important for constructing new effective feature spaces, for example, by aggregating a set of descriptors by their constituent components, including individual bits. To do this, it is natural to use the apparatus of statistical criteria designed to compare the parameters of the distribution of the studied samples. Despite the widespread use and applied effectiveness of the feature descriptors apparatus for image classification, the statistical basis of these methods in their implementation in aggregate visual data systems and the choice of effective means to assess their effectiveness for distinguishing real images in application databases remains insufficiently studied.

**Objective.** Development of an effective images classification method by introducing aggregate statistical features for the description components.

**Method.** A metric image classifier based on feature aggregation for a set of image descriptors using statistical criteria for assessing the classification decision significance is proposed.

**Results.** The synthesis of the classification method on the basis of the introduction of aggregated statistical features for a set of image description descriptors is carried out. The efficiency and effectiveness of the developed classifier are confirmed. On examples of application of a method for system of real images features its efficiency is experimentally estimated.

**Conclusions.** The study makes possible to evaluate the applied effectiveness of the key points descriptors apparatus and build on its basis an aggregate features system for the effective visual objects classification implementation. Our research has shown that the available information in the form of a bit descriptors representation is sufficient for a significant statistical distinction between visual objects descriptions. Analysis of pairs and other blocks for descriptor bits provides a promising opportunity to reduce processing time.

The scientific novelty of the study is the development of a method of image classification based on an integrated statistical features system for structural description, confirmation of the effectiveness of the method and the importance of the created features classification system in the image database.

The practical significance of the work is to confirm the efficiency of the proposed methods on the real image descriptions examples.

**KEYWORDS:** computer vision, key point, descriptor, data aggregation, statistical distribution, significance of classification decision, processing speed.

### ABBREVIATIONS

KP – key point;  
ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF) – detector that forms the descriptors of key points;  
BRISK (Binary Robust Invariant Scalable Key-points) – detector that forms the descriptors of key points.

### NOMENCLATURE

$n$  – dimension of the descriptor KT;  
 $B^n$  – space of binary dimension vectors  $n$  ;  
 $E_j$  – reference descriptor with the number  $j$  ;  
 $E$  – reference set;  
 $Z$  – description of the visual object;  
 $\{z_{v,i}\}_{v=1}^s\}_{i=1}^n$  – binary description matrix;  
 $E1, E2, E3, E4$  – descriptions of reference images in the experiment;  
 $S$  – the number of description descriptors;  
 $m$  – number of classes;  
 $\theta$  – aggregate feature vector;  
 $\theta^{(1)}$  – aggregate feature vector for the first processing method;  
 $\theta^{(2)}$  – aggregate feature vector for the second processing method;  
 $P_s^{(i)}(v)$  – probability of occurrence  $v$  units in place of the  $i$ -th bit in the description of the  $s$  vectors;  
 $p_i$  – the probability of occurrence of one in place of the  $i$ -th bit in the set of descriptor descriptors;  
 $D^{(j)}$  – normalized measure of similarity of vectors;  
 $d^{(j)}$  – Manhattan distance between vectors  $\theta^{(1)}$  for  $j$ -th reference and object;  
 $k$  – fragment number;  
 $u_k$  – the value of the highest level attribute for the fragment with the number  $k$  ;  
 $b$  – fragment size in bits;  
 $q$  – dimension of the vector  $u_k$  ;  
 $K$  – classifier.

### INTRODUCTION

Statistical data science tools usage to build visual objects images classifiers in computer vision systems is aimed at providing the necessary performance based on the study of properties, content, structure of reference data and the introduction of obtained knowledge into the classification process [1–6]. An element of the image space in a vector data environment with real or binary components in the implementation of structural recognition methods is a finite set of key point descriptors (KP) of the image [2]. Recently, BRISK and ORB descriptors with binary components have become popular due to low computational costs [3–6, 13].

Gadetska S. V., Gorokhovatsky V. O., Stiahlyk N. I., Vlasenko N. V., 2021  
DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-6

Statistical data distributions are perfect tools for representing and analyzing visual data in image recognition systems. If the description of a recognized object is given by a set of vectors, the statistical apparatus becomes fundamental for making a classification decision. Data distributions research in the blocks systems for KP descriptors have shown their effectiveness in terms of providing the required quality of classification and processing speed [2]. There is a need for in-depth study of statistical properties descriptor sets in terms of the main problem – the multidimensional data separation for classification. This task becomes especially important when constructing new effective feature spaces, for example, by aggregating a set of descriptors by vector components [3, 4, 10]. For this purpose, it is natural to use the apparatus of statistical criteria designed to compare the parameters of the distribution of the studied samples.

The aggregator classifier organizes a new data space to describe as a set of descriptors, which evaluates the similarity of the feature vectors of the recognized object and a single reference image, and the classification is done by optimizing the degree of this similarity.

Probabilistic model of generating visual object descriptors vector data is a practical approach to formalize the process of classifier constructing, the essence of which is to build and study statistical distributions of objects or their components with the introduction of aggregation and optimization procedures on multiple classes [1, 6].

Despite the widespread use and practical effectiveness of the apparatus of KP descriptors for the visual objects classification [2–5], there is still remains unexplored statistical basis of these methods and the choice of effective means to assess their effectiveness for real datasets [1, 2].

The object of this research is the introduction of a statistical data analysis apparatus to build the image classifier based on the aggregate data representation as a set of KP descriptors and confirm its effectiveness.

The subject of the research is the synthesis of the classifier on the basis of aggregated features and statistical proof of the separation properties of these features for reference classes and examples of input images.

The aim is to develop a performance-efficient method of image classification by introducing aggregate features for the composition of the description components.

### 1 PROBLEM STATEMENT

Consider a multidimensional space  $B^n$  of any binary vectors of dimension  $n$  , where we will construct the object descriptions and reference images. Description  $Z$  is defined on the basis of the KP descriptor set of the visual object in the form of a finite set of binary vectors of dimension  $S$

$$Z = \{z_v\}_{v=1}^S, z_v \in B^n .$$

In a more detailed view, we will consider and analyze the description  $Z = \{\{z_{v,i}\}_{v=1}^s\}_{i=1}^n$  as a matrix of binary values with  $s \times n$  size.

We will traditionally consider classification as a reflection

$$K : Z \rightarrow [1, \dots, m],$$

where each class is represented by a reference descriptor in  $E_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , which are available for analysis [2].

Let's study the visual objects classification as assigning their description to one of the reference classes, based on the aggregate representation of the description data using the tools and criteria of mathematical statistics. In a general case, the classification problem is formally reduced to establishing the degree of similarity of two vector sets with binary components of equivalent size. We will build a secondary integrated system of features  $\theta = \{\theta_k\}_{k=1}^N$  on the basis of descriptions  $Z$ ,  $\{E_j\}_{j=1}^m$  and implement it in the classification solution.

We use a metric approach to determine the degree of similarity of feature values  $\theta$  for object and reference images. The introduction of aggregate features contributes to a significant acceleration of the classifier decision process, the gain in comparison with the traditional method of voting descriptors reaches hundreds of times [5, 6]. Another task is to investigate the separation properties of the newly created system of features using traditional statistical criteria.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The formal definition of the classification problem with the description of the image as a set of KP descriptors is formulated in [2–4], which also studies the advantages of implementing a structural description model in the methods of statistical classification [1, 5–9]. It is noted that the primary problem is the excessive computational costs caused by large arrays of vector data. Articles [4–6, 9, 16, 17, 26] investigate statistical models for the synthesis of feature space modifications to reduce the amount of computation, in particular, the application of data aggregation methods by forming distributions and defining statistical data centers. Works [1, 2, 8, 14] are devoted directly to the analysis of learning models for the fixed base of descriptions used in computer vision and the definition of the function of belonging to a fixed system of classes.

Articles [9, 13, 19, 21, 25] discuss the principle of construction feature detectors for the binary descriptors of KP.

Studies [1, 2, 8, 15, 23] contain results on the applied implementation of statistical approaches to the visual images classification using an ensemble processing. In [1, 6–8, 17–20] methods of evaluating the effectiveness of intelligent systems using statistical and metric measures of similarity are described. The advantages of statistical solutions such as high processing speed, sufficient distortions resistance and ensuring the required level of classification efficiency are discussed.

Works [11, 12] are used as sources of traditional and modern methods of statistical evaluation, the book [15] contains a description of applied features of software modeling, and sources [2–6, 10, 23] include the results of authors' research in implementing statistical approaches to develop structural methods image classification. In particular, [2] proposed technologies of component analysis and spatial processing for the classification of visual objects using statistical characteristics of the structural description of the image.

Works [11, 12] are used as sources of traditional and modern methods of statistical evaluation, the book [15] contains a description of applied features of software modeling, and sources [2–6, 10, 23] include the results of authors' research in implementing statistical approaches to develop structural methods image classification. In particular, [2] proposed technologies of component analysis and spatial processing for the classification of visual objects using statistical characteristics of the structural description of the image.

## 3 MATERIALS AND METHODS

We introduce a mapping  $Z \rightarrow \theta, Z \subset B^n$ , from a fixed set  $Z$  of binary vectors – KP descriptors for a given object into an integer vector  $\theta = \{\theta_k\}_{k=1}^N$ , the components of which will be calculated by some rule, according to which  $N = n$  or  $N = s$ . This will make it possible to identify and distinguish visual objects on the basis of smaller data, as set of vectors is transformed into a single vector [4].

We will classify on the basis of estimating the differences in the values of vectors  $\theta$  for different descriptions, the calculation of which is proposed in two different ways, which aims to take into account the structural features of the studied data and, as a result, ensure the efficiency of the recognition process.

According to the first method of determining vectors  $\theta$ , we find the sum of binary values (number of units) consecutively for each bit with the number separately, based on the complete set of object descriptions  $Z$ . For a fixed description we obtain vectors of the form:

$$\theta^{(1)} = \{\theta_i^{(1)}\}_{i=1}^n, \theta_i^{(1)} = \sum_{v=1}^s z_{v,i}, 0 \leq \theta_i^{(1)} \leq s. \quad (1)$$

The vector (1) is an aggregate parameter formed on a set of descriptor descriptors by bitwise analysis of data in the form of adding the values of the corresponding bits (matrix columns  $Z = \{\{z_{v,u}\}_{v=1}^s\}_{u=1}^n$ ).

If we consider the distribution of values by the  $i$ -th bit from the description of the object close to binomial, which is determined by the Bernoulli formula:

$$P_s^{(i)}(v) = C_s^v p_i^v (1 - p_i)^{s-v}$$

for which we calculate  $p_i = \frac{\theta_i^{(1)}}{s}$ , the value

$\theta_i^{(1)}, i = 1, \dots, n$  as it known in mathematical statistics [11], can be interpreted as the average value of the appearance of the corresponding number of units in place of the  $i$ -th bit:  $\theta_i^{(1)} = p_i s$ .

In general case, the tuple of values  $\theta^{(1)} = (\theta_1^{(1)}, \dots, \theta_n^{(1)})$  obtained on the basis of the description  $Z$  can be considered as an aggregated parametric representation of the description, where the parameters are the probabilities  $p_i$  of occurrence of single bits for the  $i$ -th component in the set  $Z$ . We introduce the representation  $\theta^{(1)}$  into the classification process, as it significantly reduces computational costs by transforming data from a set of vectors into a single parameter-vector [2–4].

Consider  $\theta^{(1j)}, j = 1, \dots, m$  – a vector aggregated by columns of the matrix for the binary description of the reference  $E_j$  with the number  $j = 1, \dots, m$ , according to (1) and  $\theta^{(10)}$  – an aggregate vector for the description of the studied object  $O$ .

To compare the aggregate descriptions of objects of type (1) and, accordingly, to solve the classification problem, we introduce the classifier [2]

$$K : k = \arg \max_{j \in [1; m]} D^{(j)}, \quad (2)$$

$$D^{(1)} = 1 - \frac{d^{(j)}}{s \cdot n}, \quad d^{(j)} = \sum_{i=1}^n \left| \theta_i^{(1j)} - \theta_i^{(10)} \right|, \quad j = 1, \dots, m. \quad (3)$$

Classifier (2) implements the principle of analysis “object – reference image” based on the aggregate vector representation  $\theta$  [2]. We emphasize that expression (2) can be considered as a decisive rule, which is based on the likelihood function, presented, in contrast to its classical probabilistic representation [1], in terms of metrics, in particular, Manhattan.

To confirm the significance of the decision, as well as to control the obtained result of the classifier (2) with the involvement of aggregate vectors, we use methods of mathematical statistics, namely, a paired two-sample t-test for averages [11, 12], which provides pairwise (coordinate) comparison of the studied objects – vectors  $\theta$  for a statistically significant difference in their average values. When using this test, two samples of the same volume are considered, in which the elements have a fixed location (as coordinates).

In the process of testing the null hypothesis regarding the equality of the averages in these samples, Student’s statistics is used [11]; a level of significance  $\alpha$  is established, equal to the probability of making an error of the I kind, i.e. rejecting the null hypothesis if it was correct; based on the initial data, the p-value is calculated as the maximum possible probability of error of the I kind. Then, if the p-value is less than the established  $\alpha$ , then the null hypothesis is rejected, and an alternative hypothesis is accepted regarding the significant difference of the means (at the level of significance  $\alpha$ ). Otherwise, there is no reason to reject the null hypothesis of no statistically significant differences between the means [11].

Based on the features  $\theta_i$ , it is possible to calculate higher-level features  $u_k$  for data blocks as sets of columns [1]

$$u_k = \sum_{i=k}^{k+b-1} \theta_i. \quad (4)$$

In relation (4) the relation is established  $b = n/q$ ,  $k = 1, b+1, 2b+1, \dots, n-b+1$ .

Features (4) implement cross-correlation processing of the matrix  $Z$  with a rectangular mask size  $b \times s$  [1, 14]. As a result of calculation (4) we obtain an integer vector  $u_k$  of dimension  $q$ . The parameter  $q$  is a characteristic of the newly created system of fragments, it varies from  $n$  to 1 with increasing fragment size from 1 to  $n$ .

The values of the vector  $u = (u_1, \dots, u_k, \dots, u_q)$  can be used for classification as independent structural features of the statistical type. Given a simple model for calculating functions (4), they are all easy to determine for an arbitrary fragment size (logically or by adding integers).

Based on representation (4), a hierarchical recognition method can also be used, which uses a system of features  $u_k$  with different degrees of data integration to compare with reference set [2, 16]. The range of integer values for features  $u_k$  can be directly determined by the size of the fragment  $u_k \in \{0, \dots, sb\}$  as Model (4) implements the procedure of reducing the information redundancy of the spatial signal due to the allowable resolution reduction of the feature system [2, 14].

Note also that for the sake of universality of the study, it may be appropriate to perform analysis of variance of aggregate vectors constructed from reference  $E_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ , in order to ensure that the reduction of data dimensionality did not affect the difference in the references set. In this case, since the structure of the vectors aggregated by formula (1) involves the consideration of paired samples, in this case it is possible to use only non-parametric analysis of variance, for example, in the form of the Friedman test [11].

The second way to calculate vectors  $\theta$  is to represent the components of the vector as the sum of unit bits separately for each binary descriptor of the description. In this case, by adding the elements of the rows of the matrix (1) we obtain aggregate description vectors in the form:

$$\theta^{(2)} = \{\theta_v^{(2)}\}_{v=1}^s, \quad \theta_v^{(2)} = \sum_{i=1}^n z_{vi}, \quad 0 \leq \theta_v^{(2)} \leq n. \quad (5)$$

Then  $\theta^{(2j)}, j = 1, \dots, m$  – is a vector aggregated along the rows of the matrix of the description of the reference  $E_j$  with the number  $j = 1, \dots, m$  by expression (5); where

$\theta^{(2O)}$  – aggregated vector according to the description of the studied object O.

Note that the process of formation of aggregate vectors in the form (5) leads to the creation of already independent samples, the study of which does not involve a coordinate comparison. In this case, due to the independent nature of the data, it is proposed to check for a significant difference only by statistical methods. The essence of the introduction in this situation of a two-sample t-test for averages for two independent samples is to compare the averages of two sets of disordered elements, which are the number of units calculated separately for each binary descriptor description, the sequence of which obviously does not matter. The procedure for implementing the test remains the same as for the case of dependent (paired) samples, and differs only in the formula, according to which the relevant statistics are calculated on the basis of the studied data [11].

Note that here it may also be appropriate to perform analysis of variance of aggregate vectors (5), built on the references  $E_j, j = 1, \dots, m$ ; in order to verify the fact of statistically significant differences  $\theta^{(2j)}, j = 1, \dots, m$  in the set of these vectors. Here, the structure of aggregate vectors involves the consideration of independent samples, which involves the use of methods of both parametric and nonparametric variance analysis (for example, in the form of the Kruskal-Wallis test) [11].

#### 4 EXPERIMENTS

Consider an example with experimental descriptions of three fixed reference images E1, E2, E3, and E4, obtained from E1 by rotation. Examples of images based on the results of software modeling with the formed coordinates of the BRISK KP descriptors are shown in Fig. 1 [13, 15, 21]. For the descriptions of these images in the form of a set of descriptors, our calculations are performed.

In the calculation example,  $n = 512$  is the dimension of the descriptor,  $s = 500$  is the number of descriptors in

the description,  $m$  is the number of reference images or classes ( $m = 3$ ).

We proceed to the implementation of the proposed classification approach based on the values of the parameters  $\theta$  in the database of three reference images E1, E2, E3 (Fig. 1) and the image E4, transformed by rotation of E1. Note that the representation using KP descriptors provides invariance to the transformations of displacement, rotation and scale of the analyzed object [2].

Fragments of the calculation results for aggregate vectors  $\theta^{(1j)}, j = 1, 2, 3, 4$ , of the form (1) for objects E1, E2, E3, E4 are given in Table 1.

According to formulas (2, 3) with the substitution of indicators E4 we have:

$$D^{(1)} = 0.983 ; ; D^{(2)} = 0.929 ; D^{(3)} = 0.895 .$$

Table 1 – Fragments of component vectors

$$\theta^{(1j)} = \{\theta_i^{(1j)}\}_{i=1}^{512}, j = 1, 2, 3, 4$$

Component number	$\theta^{(11)}$	$\theta^{(12)}$	$\theta^{(13)}$	$\theta^{(14)}$
1	448	397	369	430
2	318	305	394	312
3	410	371	341	395
4	391	365	325	378
5	290	250	385	278
6	306	306	293	305
7	224	162	343	234
...	...	...	...	...
507	213	242	265	220
508	237	247	276	235
509	205	292	303	210
510	145	235	257	154
511	220	299	295	240
512	195	299	298	203



Figure 1 – Reference images with marked KP

We see that the use of classifier (2) leads to the correct recognition of the object E4 as a transformed reference image E1, as its similarity with the first reference image is the greatest.

For the hierarchical features obtained by expression (4) at the size of the fragment  $b = 2$  obtained the following values of these indicators: 0,986; 0,934; 0,908.

As you can see, they differ slightly from the values for the full description ( $b = 1$ ), but the data vector is reduced by 2 times, which allows for further reduction of computational volumes.

Confirmation of the fact of statistically significant proximity of E4 to E1, as well as statistically significant difference of E4 from other reference images E2, E3 is obtained using a paired two-sample t-test for averages applied to samples represented by aggregate vectors  $\theta^{(1j)} = \{\theta_i^{(1j)}\}_{i=1}^{512}, j = 1,2,3,4$ , from (1), the results of which are shown in table 2

Table 2 – The results of the application of a paired two-sample t-test

Samples	E1, E4	E2, E4	E3, E4
P-value	0,252	0,002	0,0000000006
Significance	no	yes	yes

In this case, for the hierarchical features obtained by expression (4) at the size  $b = 2$  of the fragment, the value of the P-index was obtained: 0.330; 0.022; 0.000001.

Let's move on to consider the vectors aggregated by the second method.

Fragments of the results of the calculation of the components of the vectors  $\theta^{(2j)}, j = 1,2,3,4$  of the form (5) for objects E1, E2, E3, E4 are given in table 3.

Table 3 – Fragments of component vectors  
 $\theta^{(2j)} = \{\theta_v^{(2j)}\}_{v=1}^{500}, j = 1,2,3,4$

Component number	$\theta^{(21)}$	$\theta^{(22)}$	$\theta^{(23)}$	$\theta^{(24)}$
1	301	332	248	194
2	272	313	320	273
3	239	311	234	303
4	272	327	344	250
5	302	253	237	137
6	241	318	308	221
7	305	245	298	260
...	....	....	...	...
495	200	277	196	253
496	298	269	237	268
497	281	291	268	245
498	213	171	282	267
499	280	196	286	279
500	235	197	268	295

The confirmation of statistically significant proximity of E4 to E1, as well as statistically significant differences of E4 from other reference images E2, E3, obtained using a two-sample t-test for averages with different variances  $\theta^{(2j)}, j = 1,2,3,4$ , are shown in table 4.

Table 4 – The results of the two-sample t-test

Samples	E1, E4	E2, E4	E3, E4
P-value	0.843	0.024	0,0000000005
Significance	no	yes	yes

In order to assess the stability of the studied approach to the application of description variations that may occur under the influence of noise, we performed calculations for descriptions transformed by expression (4), where generalization  $b = 2$  for the case occurred by adding pairs of values  $\theta^{(2j)}$ . This corresponds to the calculation of hierarchical features when performing a merge for pairs of descriptors that appeared next to each other in the description. At the same time, the amount of data is also halved.

The obtained P-values for this case were 0.886; 0.034; 0,0000000007. This fact in comparison with the data of tab. 4 indicates the resistance of the considered methods to accidental interference, as the previous classification conclusions are fully confirmed.

## 5 RESULTS

The main result of this study is the development of images classification models based on the statistical analysis of component sets in the images descriptions and metric means of class selection. The proposed variants of data analysis models are based on the degree of similarity between the object and reference images, are workable and provide sufficient classification efficiency. Computational simulation performed on the example with 3 reference images confirmed efficiency of the proposed approach with use of significant data difference statistical criteria. Variants of the generalized features system synthesis that implies the further compression of the description sets and acceleration of classification procedures are also analyzed.

## 6 DISCUSSION

The synthesis of an aggregate feature system based on KP descriptor set makes possible to build a classifier that works successfully for the real images database.

As you can see, the first P-value (Table 2) for both options  $b = 1, b = 2$  significantly exceeds the significance level  $\alpha = 0.05$  (equal to the probability of error of the first kind), which indicates the absence of statistically significant differences between  $\theta^{(11)}$  and  $\theta^{(14)}$  (i.e. between the first reference image E1 and E4, which is transformed from E1); other obtained P-values are significantly less than 0.05, confirming a statistically significant difference in pairs between  $\theta^{(14)}, \theta^{(12)}$  and  $\theta^{(13)}, \theta^{(14)}$  (ie between E4, E2 and E4, E3).



Note, that for a large sample size (in the example we have  $n = 512$ ), checking the data for compliance with the normal distribution law when using a paired t-test is not mandatory [11].

Note also, that the visual comparison of bar charts, which is a graphical representation of the vectors aggregated by formula (1), is a clear confirmation of the results obtained on the difference of objects (Fig. 2) (similarity between  $\theta^{(14)}$  and  $\theta^{(11)}$  and significant difference between pairs  $\theta^{(14)}, \theta^{(12)}$  and  $\theta^{(14)}, \theta^{(13)}$ ).

We also see that the first P-value is equal to 0.843 (Table 4) and significantly exceeds the level of significance  $\alpha = 0.05$ , which indicates the absence of statistically significant differences between  $\theta^{(21)}$  and  $\theta^{(24)}$  (ie between E1 and E4); other P-values, which are significantly less than 0.05, confirm a statistically significant difference in pairs between  $\theta^{(24)}, \theta^{(22)}$  and  $\theta^{(24)}, \theta^{(23)}$  (ie between E4, E2 and E4, E3).

Similarly to the previous one, the visual comparison of bar diagrams, which are a graphical interpretation of the vectors aggregated by formula (5), confirms the obtained results (Fig. 3).

The proposed classifier construction method allows further generalization in terms of fragment size aggregation that implies reduction of processing time.

### CONCLUSIONS

The urgent problem of mathematical support Statistical data analysis is a powerful research tool for intelligent

decision making, machine learning and data science. The study makes possible to assess the applied effectiveness of the key points descriptors apparatus and build on its basis an aggregate features system for the effective visual objects classifier implementation. Our research has shown that the available information in the form of a bit representation of the descriptors is sufficient for statistical separation of data for different visual objects. Analysis of pairs and other blocks of bits reduces the processing time.

The scientific novelty of the study is the development of a method of image classification based on an integrated statistical features system for structural description, confirmation of the effectiveness of the method and the importance of the created features classification system in the image database.

The practical significance of the work is to confirm the efficiency and effectiveness of the proposed methods on the examples of real images descriptions.

Prospects for the study are related to the further enhancement and application of the developed classifiers in large-scale visual data bases.

### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed within the framework of the state budget research of Kharkiv National University of Radio Electronics “Deep hybrid systems of computational intelligence for data flow analysis and their rapid learning” (№ ДР0119U001403).

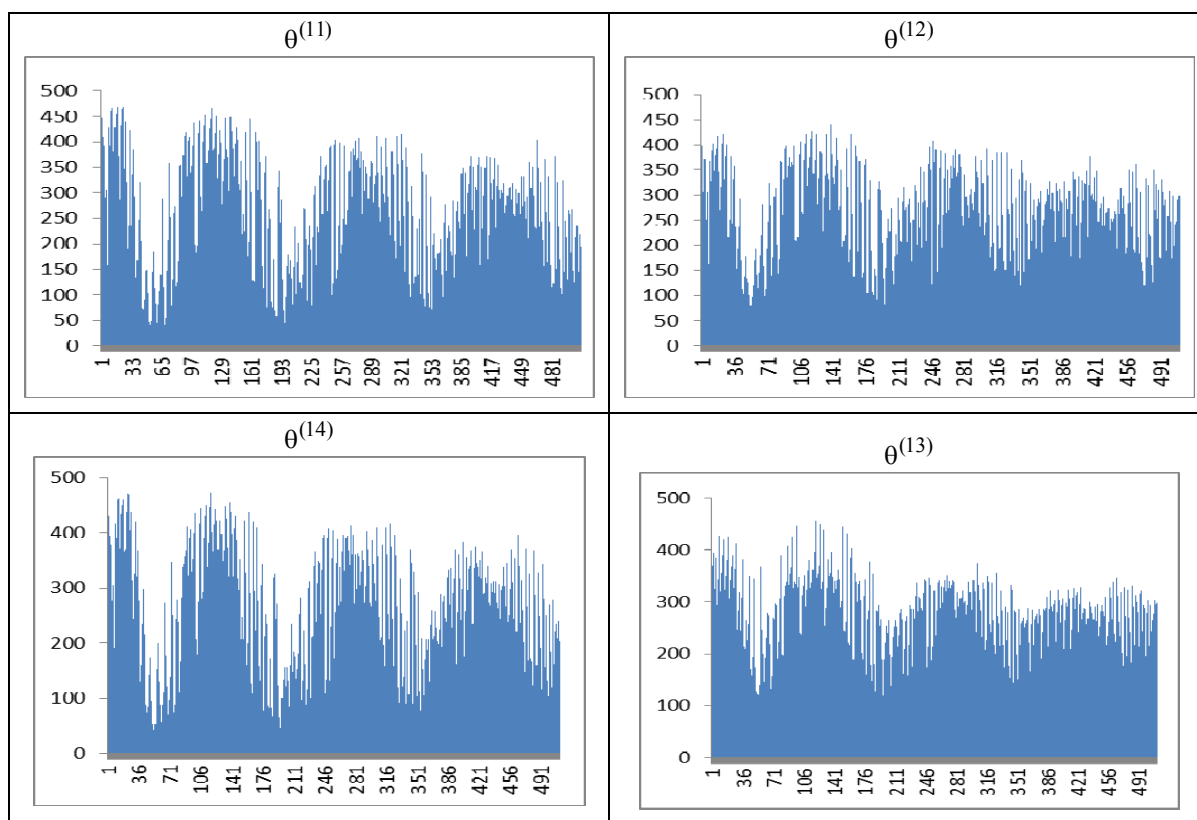


Figure 2 – Graphical representation of vectors  $\theta^{(1j)} = \{\theta_i^{(1j)}\}_{i=1}^{512}, j = 1,2,3,4$

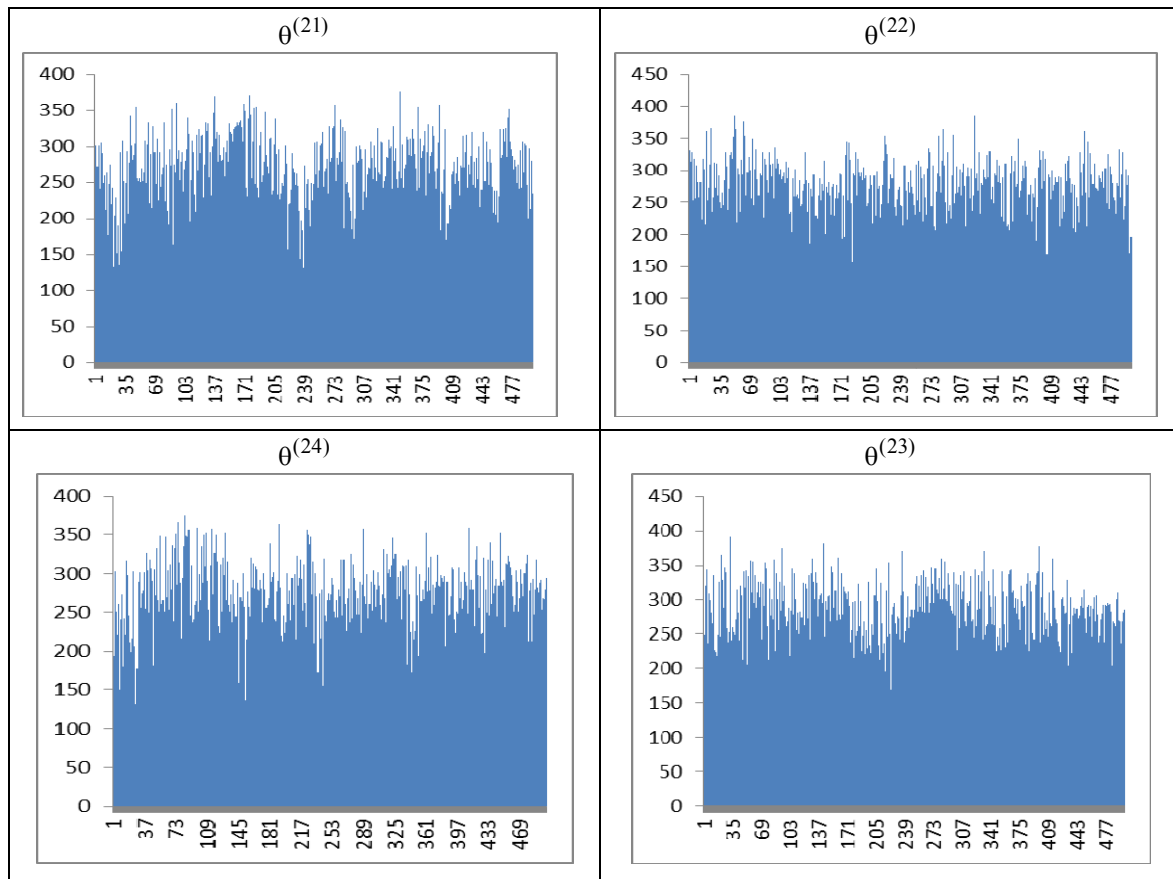


Figure 3 – Graphical representation of vectors  $\theta^{(2j)} = \{\theta_v^{(2j)}\}_{v=1}^{500}, j = 1, 2, 3, 4$

### REFERENCES

1. Flach P. Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2012. DOI: 10.1017/CBO9780511973000
2. Gorokhovatskyi V., Gadetska S. Statistical processing and data mining in structural image classification methods. Kharkiv, Ukraine, FOP Panov A.N., 2020, 128 p.
3. Gorokhovatsky V. O., Gadetska S. V., Stiahlyk N. I. Vivchennja statistichnih vlastivostej modeli blochnogo podannja dlja mnozhini deskriptoriv kljuhovih tochok zobrazen', *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019, No. 2, pp. 100–107. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-11.
4. Gorokhovatsky V., Gadetska S. Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, No. 78 (3), pp. 211–220. – DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.20
5. Daradkeh Y. I., Gorokhovatskyi V., Tvoroshenko I., Gadetska S., and Al-Dhaifallah M. Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components, *IEEE Access*, 2021, No. 9, pp. 92964–92973. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3093457
6. Gorokhovatskyi V., Gadetska S., Stiahlyk N. Image structural classification technologies based on statistical analysis of descriptions in the form of bit descriptor set, *In CEUR Workshop Proceedings: Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, 2608, pp. 1027–1039. Available online: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/>
7. Oliinyk A., Subbotin S., Lovkin V. et al. A The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 4, pp. 85–96. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-4-10
8. Peters J. F. Foundations of computer vision: Computational Geometry, Visual Image Structures and Object Shape Detection. Cham, Switzerland, Springer International Publisher, 2017, 417 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52483-2
9. Hietanen A. and et al. A comparison of feature detectors and descriptors for object class matching, *Neurocomputing*, 2016 No. 184, pp. 3–12. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.08.106
10. Gadetska S. V., Gorokhovatsky V. O. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2018, Vol. 77 (12), pp. 1041–1053. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i12.30
11. Kobzar' A. I. Prikladnaja matematicheskaja statistika. Dlja inzhenerov i nauchnyh rabotnikov, uchebnoe posobie, 2-e izd. Moscow, FIZMATLIT, 2012, 816 p.
12. Berk K., Kjejri P. Analiz dannyh s pomoshh'ju Microsoft Excel, Per. s angl. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2005, 560 p.
13. Leutenegger S., Chli M., Roland Y. Siegwart. BRISK, Binary Robust Invariant Scalable Keypoints, *Computer Vision (ICCV)*, 2011, pp. 2548–2555.
14. Shapiro L., Stockman J. Computer vision. Moscow, Russia, Binom, Knowledge Laboratory, 2013, 752 p.

15. Prohorenok N. A. OpenCV i Java. Obrabotka izobrazhenij i komp'juternoe zrenie. SPb., BHV-Peterburg, 2018, 320 p.
16. Adelson E. H., Anderson C., Bergen J., Burt P., Ogdan J. Pyramid methods in image processing, *RCA Engineer*, Vol. 29(6), pp. 33–41. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: [http://persci.mit.edu/pub\\_pdfs/RCA84.pdf](http://persci.mit.edu/pub_pdfs/RCA84.pdf)
17. Fazal Malik, Baharum Baharudin Analysis of distance metrics in content-based image retrieval using statistical quantized histogram texture features in the DCT domain. [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157812000444>.
18. Muja M., Lowe D. G. Fast Matching of Binary Features, *Conference on Computer and Robot Vision*, 2012, pp. 404–410. DOI: 10.1109/CRV.2012.60.
19. Kim S., Kweon I.-S. Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature, *In Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06)*, 2006, pp. 305–314. DOI: 10.1007/11612704\_31
20. Grosse K., Manoharan P., Papernot N., Backes M., and McDaniel P. On the (statistical) detection of adversarial examples. arXiv preprint arXiv:1702.06280, 2017.
21. Open CV Open Source Computer Vision, <https://docs.opencv.org/master/index.html>.
22. Wei P., Ball J., and Anderson D. Fusion of an ensemble of augmented image detectors for robust object detection, *Sensors*, 2018, No. 18 (3), P. 894. DOI: 10.3390/s18030894
23. Gorokhovatskiy V. A. Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, Vol. 70, No 15, pp. 1363–1371. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i15.60
24. Tvoroshenko I. S., Kramarenko O. O. Software determination of the optimal route by geoinformation technologies, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 3, pp. 131–142. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-15
25. Gayathiri P., Punithavalli M. Partial Fingerprint Recognition of Feature Extraction and Improving Accelerated KAZE Feature Matching Algorithm, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 2019, Vol. 8, Issue 10, pp. 3685–3690 DOI: 10.35940/ijitee.I9653.0881019
26. Oliinyk A., Subbotin S. A. A stochastic approach for association rule extraction, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, Vol. 26, No. 2, pp. 419–426. DOI: 10.1134/S1054661816020139

Received 06.07.2021.  
Accepted 21.10.2021.

УДК 004.932.2:004.93\*1

## ЗАСОБИ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ У МЕТОДАХ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ НА ПІДСТАВІ ОПИСУ ЯК МНОЖИНИ БІНАРНИХ ДЕСКРИПТОРІВ КЛЮЧОВИХ ТОЧОК

**Гадецька С. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна.

**Гороховатський В. О.** – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

**Стяглик Н. І.** – канд. пед. наук, завідувач кафедри інформаційних технологій та математичного моделювання, Навчально-науковий інститут «Каразінський банківський інститут» Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна, Харків, Україна.

**Власенко Н. В.** – канд. техн. наук, ст. викладач кафедри інформатики та комп'ютерної техніки, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Сучасні системи комп'ютерного зору потребують дієвих класифікаційних рішень на підґрунті вивчення природи оброблюваних даних. Статистичні розподіли на цей час є досконалим засобом подання та аналізу візуальних даних у системах розпізнавання образів. Якщо опис розпізнаваного об'єкту представлено множиною векторів, статистичний апарат стає фундаментальним для прийняття класифікаційного рішення. Вивчення розподілів даних у складі системи блоків для дескрипторів ключових точок показали свою результативність у аспекті забезпечення потрібних показників якості класифікації та швидкодії оброблення. Виникає необхідність поглибленого вивчення статистичних властивостей для множини дескрипторів у аспекті головного фактору – розрізнення багатовимірних даних задля класифікації. Особливе значення набуває ця задача при побудові нових ефективних просторів ознак, наприклад, шляхом агрегування множини дескрипторів за їх складовими компонентами, в тому числі за окремими бітами. Для цього природним є напрацьоване використання апарату статистичних критеріїв, призначених для порівняння параметрів розподілу досліджуваних вибірок. Незважаючи на широке застосування і прикладну результативність апарату дескрипторів для класифікації зображень, до цих пір залишається не дослідженим статистичне підґрунтя цих методів при впровадженні їх у агрегованих системах ознак візуальних даних і вибір ефективних засобів для оцінювання їх дієвості для розрізнення реальних зображень у прикладних базах даних.

**Мета роботи.** Розроблення ефективного за швидкодією методу результативної класифікації зображень шляхом впровадження агрегованих статистичних ознак для складу компонентів опису.

**Метод.** Запропоновано метричний класифікатор зображень на основі агрегації ознак для множини дескрипторів опису із використанням статистичних критеріїв щодо оцінювання значущості класифікаційного рішення.

**Результати.** Здійснено синтез методу класифікації на підставі впровадження агрегованих статистичних ознак для множини дескрипторів опису зображення. Підтверджено працездатність і ефективність розробленого класифікатора. На прикладах застосування варіантів методу для системи ознак реальних зображень експериментально оцінена його результативність.

**Висновки.** Проведене дослідження дає можливість оцінити прикладну ефективність застосування апарату дескрипторів ключових точок зображення і побудови на його основі агрегованої системи ознак для результативного здійснення класифі-

кації візуальних об'єктів. Наше дослідження показало, що наявної інформації у вигляді бітового подання дескрипторів опису достатньо для значущого статистичного розрізнення описів візуальних об'єктів. Аналіз пар і інших блоків для бітів дескрипторів дає перспективну можливість скорочення часу оброблення.

**Наукову новизну** дослідження складає розроблення методу класифікації зображень на підставі системи інтегрованих статистичних ознак для структурного опису, підтвердження результативності методу та значущості створеної системи ознак при класифікації у межах бази зображень.

**Практична значущість** роботи полягає у підтвердженні працездатності та результативності запропонованих методів на прикладах дескрипторних описів реальних зображень.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** комп'ютерний зір, ключова точка, дескриптор, агрегація даних, статистичний розподіл, значущість класифікаційного рішення, швидкодія оброблення.

УДК 004.932.2:004.93\*1

## СРЕДСТВА СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДАННЫХ В МЕТОДАХ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВАНИИ ОПИСАНИЯ КАК МНОЖЕСТВА БИНАРНЫХ ДЕСКРИПТОРОВ КЛЮЧЕВЫХ ТОЧЕК

**Гадецкая С. В.** – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики, Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, Харьков, Украина.

**Гороховатский В. А.** – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информатики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

**Стяглик Н. И.** – канд. пед. наук, заведующая кафедрой информационных технологий и математического моделирования, учебно-научный институт «Каразинский банковский институт» Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина, Харьков, Украина.

**Власенко Н. В.** – канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры информатики и компьютерной техники, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеца, Харьков, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Современные системы компьютерного зрения требуют действенных классификационных решений на основе изучения природы обрабатываемых данных. Статистические распределения в настоящее время являются совершенным средством представления и анализа визуальных данных в системах распознавания образов. Если описание распознаваемого объекта представлено множеством векторов, статистический аппарат становится фундаментальным для принятия классификационного решения. Изучение распределений данных в составе системы блоков для дескрипторов ключевых точек показали свою результативность в аспекте обеспечения требуемых показателей качества классификации и быстродействия обработки. Возникает необходимость углубленного изучения статистических свойств для множества дескрипторов в аспекте главного фактора – различения многомерных данных для классификации. Особое значение приобретает эта задача при построении новых эффективных пространств признаков, например, путем агрегирования множества дескрипторов по их составляющим компонентам, в том числе по отдельным битам. Для этого естественным является наработанное использование аппарата статистических критериев, предназначенных для сравнения параметров распределения исследуемых выборок. Несмотря на широкое применение и прикладную результативность аппарата дескрипторов для классификации изображений, до сих пор остается не исследованной статистическая основа этих методов при внедрении их в агрегированных системах признаков визуальных данных и выбор эффективных средств для оценки их действенности при различении реальных изображений в прикладных базах данных.

**Цель работы.** Разработка эффективного по быстродействию метода результативной классификации изображений путем внедрения агрегированных статистических признаков для состава компонентов описания.

**Метод.** Предложено метрический классификатор изображений на основе агрегации признаков для множества дескрипторов описания с использованием статистических критериев оценки значимости классификационного решения.

**Результаты.** Осуществлен синтез метода классификации на основании внедрения агрегированных статистических признаков для множества дескрипторов описания изображения. Подтверждено работоспособность и эффективность разработанного классификатора. На примерах применения вариантов метода для системы признаков реальных изображений экспериментально оценена его результативность.

**Выводы.** Проведенное исследование дает возможность оценить прикладную эффективность применения аппарата дескрипторов ключевых точек изображения и построения на его основе агрегированной системы признаков для результативного осуществления классификации визуальных объектов. Наше исследование показало, что имеющейся информации в виде битового представления дескрипторов описания достаточно для значимого статистического различия описаний визуальных объектов. Анализ пар и других блоков для битов дескрипторов дает перспективную возможность сокращения времени обработки.

**Научную новизну** исследования составляет разработка метода классификации изображений на основе системы интегрированных статистических признаков для структурного описания, подтверждение результативности метода и значимости созданной системы признаков при классификации в пределах базы изображений.

**Практическая значимость** работы заключается в подтверждении работоспособности и результативности предложенных методов на примерах дескрипторных описаний реальных изображений.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** компьютерное зрение, ключевая точка, дескриптор, агрегация данных, статистическое распределение, значимость классификационного решения, быстродействие обработки.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Flach P. Machine learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data. – New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012. DOI: 10.1017/CBO9780511973000
2. Gorokhovatskyi V. Statistical processing and data mining in structural image classification methods / V. Gorokhovatskyi, S. Gadetska. – Kharkiv, Ukraine : FOP Panov A. N., 2020, 128 p.
3. Гороховатський В. О. Вивчення статистичних властивостей моделі блочного подання для множини дескрипторів ключових точок зображень / В. О. Гороховатський, С. В. Гадецька, Н. І. Стяглик // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2019. – № 2. – С. 100–107. – DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-11.
4. Gorokhovatsky V. Determination of Relevance of Visual Object Images by Application of Statistical Analysis of Regarding Fragment Representation of their Descriptions / V. Gorokhovatskyi, S. Gadetska // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – №78 (3). – P. 211–220. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v78.i3.20
5. Daradkeh Y. I. Methods of Classification of Images on the Basis of the Values of Statistical Distributions for the Composition of Structural Description Components / [Y. I. Daradkeh, V. Gorokhovatskyi, I. Tvoroshenko et al.] // IEEE Access. – 2021. – № 9. – P. 92964–92973. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3093457
6. Gorokhovatskyi V. Image structural classification technologies based on statistical analysis of descriptions in the form of bit descriptor set / V. Gorokhovatskyi, S. Gadetska, N. Stiahlyk // In CEUR Workshop Proceedings: Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020). – 2608. – P. 1027–1039. Available online: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/>
7. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition / [A. Oliinyk, S. Subbotin, V. Lovkin et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 4. – P. 85–96. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-4-10
8. Peters J. F. Foundations of computer vision: Computational Geometry, Visual Image Structures and Object Shape Detection / J. F. Peters. – Cham, Switzerland : Springer International Publisher, 2017. – 417 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52483-2
9. Hietanen A. A comparison of feature detectors and descriptors for object class matching / Hietanen, A. and et al. // Neurocomputing. – 2016 – № 184. – P. 3–12. DOI: 10.1016/j.neucom.2015.08.106
10. Gadetska S. V. Statistical Measures for Computation of the Image Relevance of Visual Objects in the Structural Image Classification Methods / S. V. Gadetska, V. O. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2018, Vol. 77 (12). – P. 1041–1053. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v77.i12.30
11. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников : учебное пособие / А. И. Кобзарь. – 2-е изд. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 816 с.
12. Берк К. Анализ данных с помощью Microsoft Excel.: Пер. с англ. / Берк К., П. Кэйри. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2005. – 560 с.
13. Leutenegger S. Siegart. BRISK: Binary Robust Invariant Scalable Keypoints. / Stefan Leutenegger, Margarita Chli, Roland Y. // Computer Vision (ICCV). – 2011. – P. 2548–2555.
14. Shapiro L. Computer vision / L. Shapiro, J. Stockman. – Moscow, Russia : Binom, Knowledge Laboratory, 2013. – 752 p.
15. Прохоренко Н. А. OpenCV и Java. Обработка изображений и компьютерное зрение / Н. А. Прохоренко. – СПб. : БХВ-Петербург, 2018. – 320 с.
16. Pyramid methods in image processing / [E. Adelson, C. Anderson, J. Bergen et al.] // RCA Engineer. – Vol. 29(6). – P. 33–41. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://persci.mit.edu/pub\\_pdfs/RCA84.pdf](http://persci.mit.edu/pub_pdfs/RCA84.pdf)
17. Fazal Malik Analysis of distance metrics in content-based image retrieval using statistical quantized histogram texture features in the DCT domain / Fazal Malik, Baharum Baharudin. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157812000444>.
18. Muja M. Fast Matching of Binary Features / M. Muja, D. G. Lowe // Conference on Computer and Robot Vision. – 2012. – P. 404–410. DOI: 10.1109/CRV.2012.60.
19. Kim S. Biologically motivated perceptual feature: Generalized robust invariant feature / S. Kim, I.-S. Kweon // In Asian Conf. of Comp. Vision (ACCV-06). – 2006. – P. 305–314. DOI: 10.1007/11612704\_31
20. On the (statistical) detection of adversarial examples / [K. Grosse, P. Manoharan, N. Papernot, M. Backes, and P. McDaniel]. – arXiv preprint arXiv:1702.06280, 2017.
21. Open CV Open Source Computer Vision, <https://docs.opencv.org/master/index.html>.
22. Wei P. Fusion of an ensemble of augmented image detectors for robust object detection, / P. Wei, J. Ball and D. Anderson // Sensors. – 2018. – № 18 (3). – P. 894. DOI: 10.3390/s18030894
23. Gorokhovatskiy V. A. Compression of Descriptions in the Structural Image Recognition / V. A. Gorokhovatskiy // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011 – Vol. 70, No. 15. – P. 1363–1371. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v70.i15.60
24. Tvoroshenko I.S. Software determination of the optimal route by geoinformation technologies / I. S. Tvoroshenko, O. O. Kramarenko // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2019. – № 3. – P. 131–142. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-3-15
25. Gayathiri P. Partial Fingerprint Recognition of Feature Extraction and Improving Accelerated KAZE Feature Matching Algorithm / P. Gayathiri, M. Punithavalli // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2019. – Vol. 8, Issue10. – P. 3685–3690. DOI: 10.35940/ijitee.I9653.0881019
26. Oliinyk A. A stochastic approach for association rule extraction / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 419–426. DOI: 10.1134/S1054661816020139

## SYNTHESIS OF A NEURAL NETWORK MODEL OF INDUSTRIAL CONSTRUCTION PROCESSES USING AN INDICATOR SYSTEM

**Leoshchenko S. D.** – Post-graduate student of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Oliinyk A. O.** – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Subbotin S. A.** – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Netrebko V. V.** – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of the Department of Equipment and Technology of Welding Production, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Gofman Ye. O.** – PhD, Senior Researcher of the Research Unit, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The problem of a neural network model synthesis for industrial processes with the definition of an optimal topology characterized by a high level of logical transparency and acceptable accuracy is considered. The object of research is the process of neural network modeling of industrial processes using an indicator system to simplify and select the topology of neuromodels.

**Objective** of the work is consists in synthesis a neural network model of industrial processes with a high level of logical transparency and acceptable accuracy based on the use of the system.

**Method.** A method is proposed to use artificial neural networks of feedforward propagation for modeling industrial processes. After evaluating the overall level of complexity of the modeling problem based on the indicator system, it was decided to build a neuromodel based on historical data. Using the characteristics of the input data of the problem, the most optimal structure of the neural network was calculated for further modeling of the system. A high level of logical transparency of neuromodels significantly expands their practical use and reduces the resource intensity of industrial processes.

**Results.** Neuromodels of industrial processes are obtained based on historical data. The use of an indicator system made it possible to significantly increase the level of logical transparency of models, while maintaining a high level of accuracy. Constructed neuromodels reduce the resource intensity of industrial processes by increasing the level of preliminary modeling.

**Conclusions.** The conducted experiments confirmed the operability of the proposed mathematical software and allow us to recommend it for use in practice in modeling industrial processes. Prospects for further research may lie in the neuroevolutionary synthesis of more complex topologies of artificial neural networks for performing multi-criteria optimization.

**KEYWORDS:** modeling, industrial processes, indicator system, neuromodel, sampling, training, error.

### ABBREVIATIONS

ANN is an artificial neural net;

OS is organized simplicity.

### NOMENCLATURE

$CAwP$  is complexity is associated with people;

$Inf_{Sample}$  is a general information of input data (data set);

$K_{input}$  is a number of element types in the neural network;

$K_{corrY}$  is a number of independent variables that strongly correlate with the original features;

$K_{imp}$  is a number of the most significant independent variables among factors<sup>4</sup>

$K_{ntcorrX}$  is a number of independent variables that are weakly dependent on others or do not correlate with each other<sup>4</sup>

$n$  is a number of input features that characterize sample instances;

$N_i$  is a multiple neurons at the network input;

$N_{i_j}$  is a neuron at the network input;

$N_o$  is a multiple neurons at the network output;

$N_{o_p}$  is a neuron at the network output;

$N_h$  is a multiple neurons of the hidden network layer;

$N_{h_r}$  is a hidden network layer neuron;

$Num_{elementype}$  is a number of element types in the neural network;

$NN$  is a neural network;

$NN_{struct}$  is a structure of neural network;

$OC$  is organized complexity;

$l$  is a number of neurons at the network input;

$Lev_{accmeas}$  is a measurement accuracy level;

$Lev_{fctr}$  is a level of significant and less significant and/or non-significant factors<sup>4</sup>

$Lev_{manag}$  is a level of possible control and management;

$Lev_{task}$  is a conditional difficulty level of the task;

$Lev_{simplfctn}$  is a level of possible simplification of the structure;

$m$  is a number of dependent (categorical) features of sample instances;

$p$  is a number of neurons at the network output;

$Param_T$  is additional and specificity parameters of task;

$q$  is a number of connections between neurons in the network;

$r$  is number of neurons in the hidden network layer;

$RC$  is random complexity;

$Sample$  is a data set;

$Task$  is general represent of the modeling task;

$w$  is a multiple of connections between neurons;

$w_q$  is a connection between neurons in the network;

$x_n$  is a independent attribute of the sample instance;

$X$  is a set of independent attribute (variables);

$y_m$  is a value of the dependent variable (attribute) of the sample instance;

$Y$  is a set of values of dependent variables.

## INTRODUCTION

Today, much attention in production is paid to improving equipment, but in fact, the autonomous performance of equipment and its perfection do not take into account the size of batches, the time spent on transferring parts between machines [1–4]. The most significant costs in the technological chain fall on production. Static modeling does not provide a complete answer to many questions the way out of this situation is to switch to complex (simulation modeling) production processes and create a model [1, 2].

Such a model can be investigated over time for both a single test and a given set. Usually, simulation models are built to find the optimal solution in conditions of resource constraints, when other mathematical models are too complex. Production system modeling is used when conducting experiments with a real system is impossible or impractical [3]. Simulation modeling of production processes connects all areas of product production: production process development, production process modeling and technological preparation of production, as well as production management. Based on the results of such modeling, the parameters of movement of workpieces and parts should be regulated [1–3]. The results of simulation modeling are not calculated using formulas, as is the case when using analytical models, but are a product of statistical processing of data observed and recorded during the processing of the modeling program. The simulation model, as an object of measurement, unlike real systems, is a fully accessible system.

The object of modeling can be industrial, logistics, transport, and other systems. Modeling of production systems allows to [1–4]:

– identify and fix problems in advance that will manifest themselves on Ethan commissioning and would require financial and time costs;

– reduce investment in production with the same productivity parameters;

– optimize production and choose the most rational solution from a variety of options.

These advantages indicate the importance of using modeling in production and industrial processes, because it can significantly reduce costs. However, when modeling complex, nonlinear processes, systems, and objects, the question always arises as to what is best to use as the basis for the model [1]. ANN whose parametric synthesis is based on historical data about processes, objects, or systems can produce hidden knowledge from the data [4]. This makes it possible to account for implicit relationships. The logical structure of such neuromodels usually remains hidden from the user. The problem of manifestation (contrast) of this hidden logical structure is solved by reducing neural networks to a special logically transparent sparse form.

That is why the applied problem of constructing models of real industrial processes based on ANN, which would be characterized by a high level of logical transparency and acceptable accuracy of operation, is relevant.

**The object of study** is the process of constructing neuromodels of industrial processes with a high level of logical transparency and acceptable accuracy of operation.

Using a system of indicators, it is possible to determine the structural features of the Ann at the very beginning, which will be used as the basis of the model.

**The subject of the study** is a neural network model of industrial processes, which is characterized by a high level of logical transparency and acceptable accuracy.

Using information about the modeling task and evaluating the input data, it is necessary to build a neuromodel.

**The purpose of the work** is to construct and study neuromodels of industrial processes with a preliminary definition of structural features based on the use of a system of indicators.

## 1 PROBLEM STATEMENT

Most of the tasks associated with the synthesis of models based on data about industrial processes have a different nature and a high level of specificity ( $Param_T$ ). However, when using the apparatus of neural networks, it is sufficient to have a comprehensive assessment of the complexity of the task:  $Task = \{Param_T, Lev_{Task}\}$ . Such a comprehensive assessment can be obtained on the basis of information about the input data of the task (a sample of data) and a group of criteria for evaluating the accuracy of the data and the requirements for the model:

$$Lev_{Task} = \{Inf_{sample}, Lev_{smplfctm}, Lev_{fctr}, Lev_{accmeas}, Lev_{manag}\}.$$

It was noted in [5] that a simple neuromodel based on a perceptron will be sufficient for tasks belonging to the OS category. Then such a model ( $NN$ ) will consist of: a set of neurons  $N = \{N_i, N_o, N_h\}$  consisting of subsets of input  $N_i = \{N_{i_1}, N_{i_2}, \dots, N_{i_l}\}, l = 1, 2, \dots, |N_i|$ , output  $N_o = \{N_{o_1}, N_{o_2}, \dots, N_{o_p}\}, p = 1, 2, \dots, |N_o|$ , and hidden neu-

rons  $N_h = \{N_{h_1}, N_{h_2}, \dots, N_{h_r}\}, r = 1, 2, \dots, |N_h|$ . The number of neurons in the hidden layer ( $N_h = \{N_{h_1}, N_{h_2}, \dots, N_{h_r}\}, r = 1, 2, \dots, |N_h|$ ) can be calculated based on analytical estimates of the input data. The input data of the problem is represented by an information  $Sample = \langle X, Y \rangle$ , where  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  is the set of independent variables: features,  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  is the set of values of dependent variables,  $n$  and  $m$  are the numbers of input features that characterize the sample instances.

After that, it can proceed to determining the weights of connections between neurons  $w = \{w_q\}$ , in other words, to parametric synthesis. Having determined the values of the elements of sets, we can consider the synthesis of ANN: complete.

Therefore, the first subtask will be to determine the exact category of complexity of the problem based on the values of the criteria  $Lev_{Task} = \{Inf_{sample}, Lev_{smplfctm}, Lev_{fctr}, Lev_{accmeas}, Lev_{manag}\}$  and data about the data sample. The next subtask will be the calculation of the number of neurons in the hidden layer of the network  $|N_h| = K_{input} - K_{corrY} - K_{imp} - K_{nicorrX}$  [5].

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

Technological processes of industrial production, especially the processes of cutting structural materials, are very complex in their physical and chemical nature [6–8]. Until now, there are no analytical models accepted by everyone that accurately describe the patterns of tool wear and load processes, thermal processes in the cutting zone, etc. Therefore, in mechanical engineering technology, models that previously designated as empirical are very often used [6, 7]. Empirical models of objects and processes are the result of processing experimental data on the behavior of an object or process using mathematical statistical analysis methods. Very often, the mathematical apparatus of regression and correlation analysis is used to build models of objects based on the results of experimental studies [7].

They studied the interdependencies of height and mass of people of different ages and were faced with the need to introduce such indicators of this dependence that would reflect the relationship between the studied characteristics of a person, but would not define each other Strictly unambiguously. Currently, regression and correlation are the main concepts of statistics [7].

The main task of correlation analysis is to identify the significance of the relationship between the values of various random variables. The relationship between quantities (including random variables) in which one value of one quantity (argument) corresponds to one or more well-defined values of another quantity is called, respectively, an unambiguous or multi-valued functional dependence. The relationship between quantities, in which each value of one quantity corresponds with the corresponding prob-

ability to a set of possible values of another, is called probabilistic (stochastic, statistical). Examples of correlation are the relationships between the strength and fluidity limits of steel of a certain brand, between size errors and shape errors of the part surface, between the test temperature and the strength of the material, etc. [6–8].

The mathematical apparatus of regression analysis allow to:

- evaluate unknown parameters of the regression model proposed for the study;
- check the statistical significance of model parameters;
- check the adequacy of the model;
- evaluate the accuracy of the model.

The type of regression model is proposed by the researcher himself, and he proceeds from the following:

- the physical essence of the object or phenomenon under study;
- the nature of the experimental material;
- analysis of a priori information.

The easiest object for model is an object that has one input and one output factor. The input factor characterizes the impact on the object under study. In technological processes of mechanical engineering, this can be temperature, force, time, geometric parameters of the tool, characteristics of the processed and tool materials, etc. The output factor characterizes the reaction (response) of the object to the influence of the input factor. Initial factors in technological processes of mechanical engineering – the length of the path traveled by the tool, the amount of wear, stress, the quality of the treated surface, etc.

Usually, building models and studying an object begins with the simplest models: linear ones [9–12]. The linear model corresponds to a regression curve in the form of a simple line. If we have an unlimited number of experimental points, then the linear regression model has the form [9]:

$$y^s = \sum_{j=1}^N w_j x_j^s, \quad s = 1, 2, \dots, S, \quad (1)$$

where  $y^s$  is the value of the initial feature for the  $s$ -th instance (observation) of the sample, is the weight  $w_j$  of  $j$ -th attribute,  $x_j^s$  is the value of the  $j$ -th attribute for the  $s$ -th instance of the sample,  $N$  is the number of features that characterize the sample instances,  $S$  is the sample size.

In more complex cases, multidimensional linear regression, in addition to first-order variables, can also include variables reduced to different powers, as well as their combinations in the form of products and quotients of different orders [10–12]. In this case, each such combination or variable of some order is considered as an additional dummy variable of the first order. And regression, which essentially combines nonlinear functions, reduces to a linear weighted sum of First-Order variables. In this paper, we will use the least squares method to determine the coefficients  $w = \{w_j\}$  for [9–12]:



– first-order linear regression models:

$$y = w_0 + \sum_{j=1}^N w_j x_j ; \quad (2)$$

– second-order linear regression models:

$$y = w_0 + \sum_{j=1}^N w_j x_j + \sum_{j=1}^N w_{(N+j)} x_j^2 ; \quad (3)$$

– second-order linear regression models with a first-order fraction:

$$y = w_0 + \sum_{j=1}^N w_j x_j + \sum_{j=1}^N \sum_{p=j+1}^N \left( w_{N+j} \frac{x_j}{x_p} \right) + \sum_{j=1}^N w_{(N(0.5N-1)+j)} x_j^2 ; \quad (4)$$

– linear regression polynomial models with a reduced number of features:

$$y^s = \sum_{j=1}^N w_j x_j^{s-1} + \varepsilon_j. \quad (5)$$

Currently, a large number of methods for constructing mathematical models of various objects are described. At the same time, among them, methods for constructing mathematical models of technological processes should be distinguished. When compiling mathematical models of technological processes, they rarely have the necessary complete a priori information about the technological object and its environment [13, 14]. Even if there are known systems of equations describing the behavior of the system, it often turns out that there is no data on the value of individual parameters, and besides, often the existing models are too complex and the adaptation of such models becomes quite time-consuming and lengthy. In the future, it turns out that the model adopted during the design process only roughly reflects the object, which causes an error when managing using such a model. Building a meaningful analytical model of a complex object is problematic, and sometimes impossible, because the order of the dynamical system and the presence of various nonlinearities are unknown. Therefore, it is desirable to build models of other classes.

An alternative modeling method is ANN [13, 14]. ANN is a mathematical analog of biological neurons in the brain. ANN can be considered as a directed graph with weighted connections, in which artificial neurons are nodes. These models differ in the structure of individual neurons, in the topology of connections between them, and in learning algorithms. The ANN of direct distribution has an architecture consisting of layers (Fig. 1): in such models, the input features of the recognized instance are fed to the network inputs and then propagated from the input layer ( $x_1 \dots x_n$ ) to the original ( $y_1 \dots y_m$ ) [13, 14].

Each neuron on the hidden and output layers receives signals from the outputs of neurons in the previous layer at the inputs. The input vector of each neuron is converted to a scalar using a weight (discriminant) function, after which the value of the output signal is calculated using the activation function. The output values of the last layer are the result of the neural network.

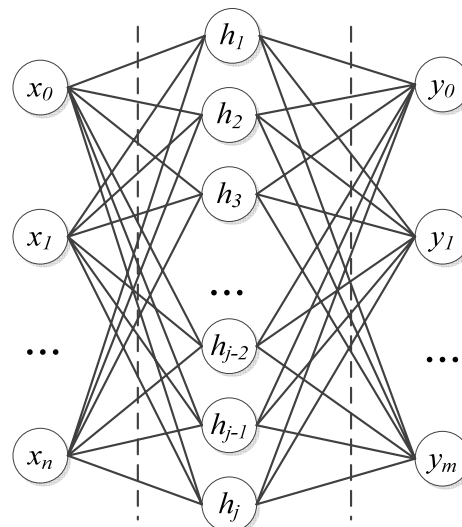


Figure 1 – Multilayer perceptron

The output values of each neuron are determined by the formula:

$$O_m = \psi \left( w_{m,0} + \sum_{n=1}^{Num_{prev}} w_{m,n} \cdot Val_{outprev} \right), \quad (6)$$

where  $\psi(x)$  is the activation function,  $w$  the weighting factors,  $Val_{outprev}$  is the output values of the neurons of the previous layer,  $Num_{prev}$  is the number of neurons of the previous layer,  $m=1,2,\dots, M$ ,  $M$  – the number of neurons in the current layer [15].

### 3 MATERIALS AND METHODS

As it was given in the previous section, the modeling task can be unified for a specific task after a certain comprehensive assessment of its complexity. Given that the structure of ANN ( $NN = (struct, param)$ ) allows to most subtly encode the relationships between the input data ( $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ), it is necessary to accurately select the synthesis option for such a non-network model. Based on the values of the indicators to assess the complexity of the task

( $Lev_{Task} = \{Inf_{sample}, Lev_{smplfctm}, Lev_{fctr}, Lev_{accmeas}, Lev_{manag}\}$ ), it can be chosen a way to synthesize the most acceptable structure [5].

Thus, the use of recurrent neural networks can lead to a problem of retraining, when the model will show good results with a high level of accuracy on the training data, but the accuracy will immediately decrease on the test data, in other words, the model will work only on the training sample.

In the case when the model was synthesized for a large-scale sample ( $n > 200$ ) of data, at the same time, the data was updated (new data about the object or system under study was obtained:  $Sample^1 = \langle X^1, Y^1 \rangle$ ) or the existing data was corrected, a strategy for structural opti-

mization of the previously synthesized ANN may be useful. With this approach, it will be important to evaluate the possibility of simplifying the model structure. Structural optimization will consist in a point-by-point change of the neuromodel: updating the activation function, removing or adding an interneuronal connection ( $struct' = \{N', c'\}$ ,  $N' = \{N'_i, N'_h, N'_o\}$ ,  $c' = \{c'\}$ ). By eliminating the connections responsible for noisy data, it is possible to significantly increase the accuracy of the resulting model. In contrast to the complete re-execution of the synthesis, this approach will differ significantly in a lower level of resource consumption [5].

In the case when a problem with input data  $Sample = \langle X, Y \rangle$  that is questionable can be modeled (there is a question about the accuracy of the data, their excess or a high degree of interconnectedness), it is necessary to resort to input data preprocessing. Thus, the selection of informative features will allow us to exclude uninformative features  $Sample^l = \langle X^l, Y \rangle$ , which will subsequently increase the level of logical transparency of the neuromodel. By spending more time on data preprocessing, it is possible to significantly reduce the time resources at the stage of model synthesis based on ANN.

When modeling complex processes, objects and systems, data about which are recorded by sensor systems with high frequency and represent Big Data ( $n > 1000$  and real-time pre-processing is impossible). A high-precision neuromodel may be required. In this case, neu-

roevolutionary approaches can be used for the synthesis of such a model, which are more capable of guaranteeing an accurate architectural architecture of ANNs with a high level of accuracy [5].

However, most industrial construction processes are not characterized by excessive data or their constantly updated nature. Therefore, such processes belong to the OS category. The measurements of most of these processes are either automated, since they are made on the basis of the readings of special sensors, or they are protected from inaccuracies, since they are made using special equipment. This way, always  $Lev_{accmeas} \leq 0$ . Also, most industrial construction processes are associated with fully controlled systems and objects (in most cases, the management is automated). Therefore, in this case, too, always  $Lev_{manag} = 0$ .

The criteria characterizing the possibility of simplifying the structure and the number of significant factors also differ in small values, since they are not focused on operational processes, where there are difficult-to-fix features ( $Lev_{smpfctn} = -1$ ;  $Lev_{fctr} = -1$ ) [5].

The general scheme of chosen the category of complexity using indicators prepared as a formula (7).

Therefore, we can conclude that it has a level of complexity of the OS category, which makes it possible to further use indicators to determine the structural features of the model (Fig. 2).

$$Lev_{Task} = \begin{cases} Lev_{smpfctn} \leq 0, Lev_{fctr} \leq 0, Lev_{accmeas} = 0, Lev_{manag} = 0 \rightarrow OS \\ Lev_{smpfctn} > 0, Lev_{fctr} \leq 0, Lev_{accmeas} = 0, Lev_{manag} = 0 \rightarrow OC \\ Lev_{smpfctn} \leq 0 \parallel Lev_{smpfctn} \geq 0, Lev_{fctr} > 0, Lev_{accmeas} > 0, Lev_{manag} = 0 \rightarrow CAwP \\ Lev_{smpfctn} > 0, Lev_{fctr} > 0, Lev_{accmeas} \geq 0, Lev_{manag} \geq 0 \rightarrow RC \end{cases} \quad (7)$$

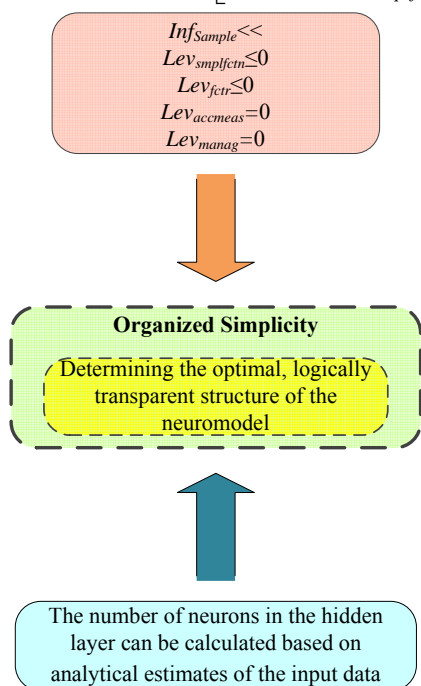


Figure 2 – Organized simplicity category of modeling task

In our case,  $Num_{elementype} = 3$  by default, because it is assumed that only input, hidden and output neurons are used. Next, it is need to determine the number of independent variables that strongly correlate with the original features  $K_{corrY}$ . Additionally, the number of independent variables that are weakly dependent on others or do not correlate with each other is determined  $K_{ntcorrX}$ . Additionally, information about the number of the most significant independent variables among the factors is pulled up from the previous stage. After that, the number of neurons in the hidden layer can be determined by the formula [5]:

$$|N_h| = K_{input} - K_{corrY} - K_{imp} - K_{ntcorrX} = 3. \quad (8)$$

Also in the same way, ANN will be synthesized with 3 neurons in the hidden layer.

#### 4 EXPERIMENTS

We have a sample of data describing samples of high-chromium cast iron with different content of additional

impurities. An example of data sampling is shown in Table 1.

High-chromium cast irons with a chromium content of 10...35% are used for the manufacture of parts of mechanisms operating under conditions of intense abrasive wear [16]. These parts must have significant hardness. Improving the design of parts of various mechanisms (ground, slurry and sand pumps, hammer crushers, ball mills, flotation machines) requires their mechanical processing by cutting. This leads to conflicting requirements for materials, namely: maximum hardness is required to ensure wear resistance, and minimum hardness is required for cutting processing.

The solution to this problem is that the material must have satisfactory machinability by cutting in the casting state (low hardness) [17], and after mechanical processing by cutting, heat treatment must be performed [18], which will ensure a sufficient level of hardness and, accordingly, wear resistance.

Samples of high-chromium cast iron containing: 1.09...3.54% C, 11.26...29.68% Cr, 0.77...5.71% Mn, 0.13...2.86% Ni, 0.99...1.46% Si were manufactured. For these samples, cutter wear ( $I_{cut}$ ) was determined during mechanical cutting. Minimal cutter wear of 0.45 microns/m was observed when cutting sample 1 with a min-

imum carbon content of 1.09% and the amount of carbides (K): 9.2%. The hardness of cast iron (HRC) and microhardness of the components of the base structure ( $HV50_{based}$ ) and carbides ( $HV50_{car}$ ) were determined in the casting state and after heat treatment of annealing at 690°C and 730°C for 9 hours and normalization from 1050°C with an exposure time of 4.5 hours.

It is necessary to establish the following functions: cutter wear ( $I_{cut}$ ), amount of carbides (K), hardness (HRC), microhardness of the base ( $HV50_{based}$ ) and carbides ( $HV50_{car}$ ) in the casting state and after heat treatment (annealing, normalization) from the arguments: content in Cast Iron C, Cr, mn, Ni, Si.

The sample consists of input and output features:

- $x_1$  is content in the alloy with, %;
- $x_2$  is content of Cr in the alloy, %;
- $x_3$  is Mn content in the alloy, %;
- $x_4$  is Ni alloy content, %;
- $x_5$  is Si content in the alloy, %;
- $y_1$  is cutter wear ( $I_{cut}$ );
- $y_2$  is amount of carbides (K);
- $y_3$  is hardness (HRC);
- $y_4$  is microhardness of the base ( $HV50_{based}$ );
- $y_5$  is microhardness of carbides ( $HV50_{car}$ ).

Table 1 – General information about data set

$x_1$	$x_2$	$x_3$	...	$x_{18}$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	...	$y_7$
1.09	17.33	1.99	...	1.37	0.45	9.2	34.1	...	433
1.52	18.73	1.49	...	1.33	0.91	13.4	35.7	...	415
2.55	11.91	3.8	...	1.26	9.12	18.7	38.9	...	330
2.24	22.82	1.21	...	1.29	2.96	19.4	49.1	...	529
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
3.01	29.68	0.72	...	1.09	39.63	32.1	57.7	...	1402

Table 2 – Linear regression models

Dependent variable	Model type	Total quadratic error	Average $ y_{real}-y_{calc} $
$y_1$	First-order linear model (2)	57.9872	4.6689
	Second-order linear model (3)	58.0843	1.6301
	Second-order linear model with first-order fractions (4)	1.8432	0.1972
	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	1.8432	0.1942
$y_2$	First-order linear model (2)	52.0201	1.2409
	Second-order linear model (3)	28.7258	1.0976
	Second-order linear model with first-order fractions (4)	8.2949	0.2554
	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	8.2949	0.2223
$y_3$	First-order linear model (2)	16.1631	2.7727
	Second-order linear model (3)	10.1685	2.0367
	Second-order linear model with first-order fractions (4)	6.3619	0.4485
	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	6.3619	0.4148
$y_4$	First-order linear model (2)	27.3060	3.5000
	Second-order linear model (3)	19.8430	3.1000
	Second-order linear model with first-order fractions (4)	5.3524	0.6004
	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	5.3524	0.4224
$y_5$	First-order linear model (2)	2.6163	1.1000
	Second-order linear model (3)	7.2305	3.1000
	Second-order linear model with first-order fractions (4)	9.6063	0.1108
	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	9.6063	0.1255

Table 3 – Results for ANN-based models

Target variable	Number of hidden neurons	Training Time, s	Average error
$y_1$	3	3	0.061046
$y_2$	3	2	0.093592
$y_3$	3	4	0.040249
$y_4$	3	2	0.011954
$y_5$	3	2	0.096513

Table 4 – Model results based on test data

Target variable	First-order linear model (2)	Second-order linear model (3)	Second-order linear model with first-order fractions (4)	Linear regression polynomial model with a reduced number of features (5)	ANN
$y_1$	5.1	1.8	0.2	0.3	0.1
$y_2$	1.7	1.5	0.4	0.3	0.12
$y_3$	3.0	2.6	0.6	0.5	0.08
$y_4$	4.2	3.8	0.8	0.6	0.05
$y_5$	1.42	3.58	0.3	0.4	0.13

## 5 RESULTS

Table 2 shows the results for linear regression models. During compression special attention was concentrated on total quadratic error and average real and calculated results of depended feature.

Table 3 shows the results for ANN-based models. During compression special attention was concentrated on number of hidden neurons (what was calculated based on system of indicators), training time (calculated on seconds), average error of model.

Table 4 shows the results of models based on test data. During compression special attention was concentrated on average error of models for different depended features.

## 6 DISCUSSION

Based on the results of the initial analysis, the task was assigned to the OS group. After all, the input sample was not excessive, and the risks of human influence were excluded. The only significant complicating factor is the poorly conditioned correlation matrices.

Further calculations showed that the use of 3 neurons in the hidden layer is sufficient to build a neuromodel with acceptable accuracy of operation.

Analyzing the initial results, we should note a fairly large run-up among the model training time: from 4 seconds (the largest indicator among ANN-based models) to 34.37 for linear regression models.

The results obtained on the data after reduction showed that the accuracy increased when constructing a neuromodel with a certain structure based on the indicator system, and the time significantly decreased.

Additionally, we should note the high level of logical transparency of the obtained Ann-based models.

## CONCLUSIONS

The urgent scientific and applied problem of constructing a neural network model of industrial processes with a high level of logical transparency and acceptable accuracy based on the use of a system of criteria for determining the structure is solved.

**The scientific novelty** lies in the study of the use of a system of criteria for determining the structural features of a neural network model. Based on the assessment of

the complexity of the task and the system of indicators, it was possible to obtain logically transparent neuromodels with a high level of accuracy of work.

**The practical significance** lies in the fact that the developed neural network models can be used during the implementation of real technical processes in production facilities. Their use will significantly reduce production costs and automate the modeling process.

**Prospects for further research** and development areas include the development of neuromodel synthesis methods based on the combined use of complex Ann topologies and swarm optimization methods.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out with the support of the state. The work was carried out with the support of the state budget research projects of the state budget of the National University “Zaporozhzhia Polytechnic” “Intelligent methods and software for diagnostics and non-destructive quality control of military and civilian applications” (state registration number 0119U100360) and “Development of methods and tools for analysis and prediction of dynamic behavior of nonlinear objects” (state registration number 0121U107499).

## REFERENCES

1. Ameisen E. *Building Machine Learning Powered Applications, Going from Idea to Product.* California, O’Reilly Media, 2020, 260 p.
2. Bonaccorso G. *Mastering Machine Learning Algorithms, Expert techniques to implement popular machine learning algorithms and fine-tune your models.* Birmingham, Packt Publishing, 2018, 576 p.
3. Patan K. *Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Process.* Berlin, Springer, 2008, 112 p. DOI: 10.1007/978-3-540-79872-9
4. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Zaiko T. Using Modern Architectures of Recurrent Neural Networks for Technical Diagnosis of Complex Systems, *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Info-communications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 9–12 October 2018, proceedings.* Kharkiv, IEEE, 2018, pp. 411–416. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632015
5. Leoshchenko S., Subbotin S., Oliinyk A., Narivs’kiy O. Implementation of the indicator system in modeling complex technical systems, *Radio Electronics, Computer Science, Control,*

- 2021, Vol. 1, pp. 117–126. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-12
- Ahmadian A., Salahshour S. *Soft Computing Approach for Mathematical Modeling of Engineering*. London, Chapman and Hall (CRC Press), 2021, 222 p.
  - Sayyaadi H. *Modeling, Assessment, and Optimization of Energy Systems*. Cambridge, Academic Press, 2020, 558 p.
  - Koulamas C., Lazarescu M. T. *Real-Time Sensor Networks and Systems for the Industrial IoT*. Basel, Mdpi AG, 2020, 242 p. DOI: 10.3390/books978-3-03943-431-2
  - Senge P. M. *The Fifth Discipline, The Art & Practice of The Learning Organization*. New York, Doubleday, 2006, 445 p.
  - Bruce P., Bruce A. *Practical Statistics for Data Scientists, 50 Essential Concepts*. California, O'Reilly Media, 2017, 318 p.
  - Finch W. H. *Exploratory Factor Analysis*. California, SAGE Publications, 2019, 144 p.
  - Rencher A. C., Christensen W.F. *Methods of Multivariate Analysis*. New Jersey, John Wiley & Sons, 2012, 800 p.
  - Dean A., Voss D., Draguljić D. *Design and Analysis of Experiments* (Springer Texts in Statistics), 2nd Edition. Berlin, Springer, 2017, 865 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0
  - Sewak M. *Deep Reinforcement Learning*, *Frontiers of Artificial Intelligence*. Berlin, Springer, 2020, 220 p. DOI: 10.1007/978-981-13-8285-7
  - Leoshchenko S. D., Oliinyk A. O., Subbotin S. A., Gofman Ye. O., Ilyashenko M. B. Synthesis and usage of neural network models with probabilistic structure coding, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, Vol. 2, P. 93–104. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-2-10.
  - Belikov S., Volchok I., Netrebko V. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron, *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 58 (3), 2013, pp. 895–897. DOI: 10.2478/amm-2013-0095
  - Netrebko V.V. Influence of physical and heat processes on the structure and properties of high-chromium cast iron during machining, *Science and Transport Progress*, Vol. 6(54), 2014, pp. 97–103. DOI: 10.15802/stp2014/33395 [In Russian]
  - Netrebko V. V. Influence of the cast iron's chemical composition on the content of cr in the base after normalization from 1050°C, *Casting and Metallurgy*, Vol. 1, 2018, pp. 34–40. [In Russian]

Received 10.08.2021.  
Accepted 25.10.2021.

УДК 004.896

### СИНТЕЗ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ БУДІВНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ СИСТЕМИ ІНДИКАТОРІВ

**Леощенко С. Д.** – аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя Україна.

**Олійник А. О.** – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

**Субботін С. О.** – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

**Нетребко В. В.** – д-р техн. наук, професор кафедри обладнання та технології зварювального виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

**Гофман Є. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної частини Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

#### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Розглянуто задачу побудови нейромережевої моделі промислових процесів із визначенням оптимальної топології, що відрізняється високим рівнем логічної прозорості та прийнятною точністю. Об'єктом дослідження є процес нейромережевого моделювання промислових процесів із застосуванням індикаторної системи для спрощення та вибору топології нейромоделі.

**Мета роботи** полягає у побудові нейромережевої моделі промислових процесів з високим рівнем логічної прозорості та прийнятною точністю на основі використанні системи.

**Метод.** Запропоновано використовувати штучні нейронні мережі прямого поширення для моделювання промислових процесів. Після оцінки загального рівня складності задачі моделювання на основі індикаторної системи було прийнято рішення будувати нейромоделі на основі історичних даних. Використовуючи характеристики вхідних даних задачі було розраховано найбільш оптимальну структуру нейронної мережі для подальшого моделювання системи. Високий рівень логічної прозорості нейромоделей, значно розширює їх практичне використання та знижує ресурсоємність промислових процесів.

**Результати.** Отримано нейромоделі промислових процесів на основі історичних даних. Використання індикаторної системи дозволило в значній мірі збільшити рівень логічної прозорості моделей, зберігаючи високий рівень точності. Побудовані нейромоделі знижують ресурсоємність промислових процесів за рахунок збільшення рівня попереднього моделювання.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при моделюванні промислових процесів. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в нейроevolюційному синтезі більш складних топологій штучних нейронних мереж для виконання багатокритеріальної оптимізації.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** моделювання, промислові процеси, система індикаторів, нейромоделі, вибірка, навчання, помилка.

УДК 004.896

### СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОЇ МОДЕЛІ ПРОМИШЛЕНИХ ПРОЦЕСІВ СТРОИТЕЛЬСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМЫ ИНДИКАТОРОВ

**Леощенко С. Д.** – аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя Україна.

© Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Netrebko V., Gofman Ye., 2021  
DOI 10.15588/1607-3274-2021-4-7

**Олейник А. А.** – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры программных средств Национального университета «Запорожская Политехника», Запорожье Украина.

**Субботин С. А.** – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программных средств Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье Украина.

**Нетребко В. В.** – д-р техн. наук, профессор кафедры оборудования и технологии сварочного производства Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье Украина.

**Гофман Е. А.** – старший научный сотрудник научно-исследовательской части Национального университета «Запорожская политехника», Запорожье Украина.

#### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Рассмотрена задача построения нейросетевой модели промышленных процессов с определением оптимальной топологии, которая отличается высоким уровнем логической прозрачности и приемлемой точностью. Объектом исследования является процесс нейросетевого моделирования промышленных строительных процессов с применением индикаторной системы для упрощения выбора топологии нейромоделей.

**Цель работы** заключается в построении нейросетевой модели промышленных строительных процессов с высоким уровнем логической прозрачности и приемлемой точностью на основе использования системы.

**Метод.** Предложено использовать искусственные нейронные сети прямого распространения для моделирования промышленных процессов. После оценки общего уровня сложности задачи моделирования на основе индикаторной системы было принято решение строить нейромодель на основе исторических данных. Используя характеристики входных данных задачи была рассчитана наиболее оптимальная структура нейронной сети для дальнейшего моделирования системы. Высокий уровень логической прозрачности нейромоделей, значительно расширяет их практическое использование и снижает ресурсоемкость промышленных процессов.

**Результаты.** Получены нейромодели промышленных процессов на основе исторических данных. Использование индикаторной системы позволило в значительной степени увеличить уровень логической прозрачности моделей, сохраняя высокий уровень точности. Построены нейромодели снижают ресурсоемкость промышленных процессов за счет увеличения уровня предыдущего моделирования.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при моделировании промышленных процессов. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в нейроэволюционном синтезе более сложных топологий искусственных нейронных сетей для выполнения многокритериальной оптимизации.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** моделирование, промышленные процессы, система индикаторов, нейромодель, выборка, обучение, ошибка.

#### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Ameisen E. Building Machine Learning Powered Applications: Going from Idea to Product / E. Ameisen. – California: O'Reilly Media, 2020. – 260 p.
2. Bonaccorso G. Mastering Machine Learning Algorithms: Expert techniques to implement popular machine learning algorithms and fine-tune your models / G. Bonaccorso. – Birmingham: Packt Publishing, 2018. – 576 p.
3. Patan K. Artificial Neural Networks for the Modelling and Fault Diagnosis of Technical Processes / K. Patan. – Berlin: Springer, 2008. – 112 p. DOI: 10.1007/978-3-540-79872-9
4. Using Modern Architectures of Recurrent Neural Networks for Technical Diagnosis of Complex Systems / [S. Leoshchenko, A. Oliinyk, S. Subbotin, T. Zaiko] // 2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 9–12 October 2018 : proceedings. – Kharkiv: IEEE, 2018. – P. 411–416. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632015
5. Implementation of the indicator system in modeling complex technical systems / [S. Leoshchenko, S. Subbotin, A. Oliinyk, O. Narivskiy] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2021. – Vol. 1. – P. 117–126. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-12
6. Ahmadian A. Soft Computing Approach for Mathematical Modeling of Engineering / A. Ahmadian, S. Salahshour. – London: Chapman and Hall (CRC Press), 2021. – 222 p.
7. Sayyaadi H. Modeling, Assessment, and Optimization of Energy Systems / H. Sayyaadi. – Cambridge: Academic Press, 2020. – 558 p.
8. Koulamas C. Real-Time Sensor Networks and Systems for the Industrial IoT / C. Koulamas, M. T Lazarescu. – Basel: MdpI AG, 2020. – 242 p. DOI: 10.3390/books978-3-03943-431-2
9. Senge P. M. The Fifth Discipline: The Art & Practice of The Learning Organization / P. M. Senge. – New York: Doubleday, 2006. – 445 p.
10. Bruce P. Practical Statistics for Data Scientists: 50 Essential Concepts / P. Bruce, A. Bruce. – California: O'Reilly Media, 2017. – 318 p.
11. Finch W. H. Exploratory Factor Analysis: 1st Edition / W. Holmes Finch. – California: SAGE Publications, 2019. – 144 p.
12. Rencher A. C. Methods of Multivariate Analysis / A C. Rencher, W. F. Christensen. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2012. – 800 p.
13. Dean A. Design and Analysis of Experiments (Springer Texts in Statistics) / A. Dean, D. Voss, D. Draguljić. – Berlin: Springer, 2017. – 865 p. DOI: 10.1007/978-3-319-52250-0
14. Sewak M. Deep Reinforcement Learning: Frontiers of Artificial Intelligence / M. Sewak. – Berlin: Springer, 2020. – 220 p. DOI: 10.1007/978-981-13-8285-7
15. Synthesis and usage of neural network models with probabilistic structure coding / [S. D. Leoshchenko, A. O. Oliinyk, S. A. Subbotin et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2021. – Vol. 2. – P. 93–104. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-2-10
16. Belikov S. Manganese influence on chromium distribution in high-chromium cast iron / S. Belikov, I. Volchok, V. Netrebko // Archives of Metallurgy and Materials. – Vol. 58 (3) – 2013. – P. 895–897. DOI: 10.2478/amm-2013-0095
17. Нетребко В. В. Влияние физических и тепловых процессов на структуру и свойства высокохромистого чугуна при обработке резанием / В. В. Нетребко // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту: науковий журнал. – №6 (54). – 2014. – С. 97–103. DOI: 10.15802/stp2014/33395
18. Нетребко В. В. Влияние химического состава чугуна на содержание Cr в основе после нормализации от 1050°C / В. В. Нетребко, I. П. Волчок // Литье и Металлургия. – № 1. – 2018. – С. 34–40.

## THE ALGORITHM TREE METHOD IN SOLVING THE TASK OF CLASSIFYING HYDROGRAPHIC DATA

**Povkhan I. F.** – Dr. Sc., Associate Professor, Associate Professor at the System Software Department, State Higher Education Institution Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine.

**Mitsa O. V.** – Dr. Sc., Associate Professor, Head of the Information Control Systems and Technologies Department, State Higher Education Institution Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine.

**Mulesa O. Y.** – Dr. Sc., Associate Professor, Associate professor at the Cybernetics and Applied Mathematics, State Higher Education Institution Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine.

**Polishchuk V. V.** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the System Software Department, State Higher Education Institution Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine.

### ABSTRACT

**Context.** The work is dedicated to the identification of a simple and effective mechanism by which it is possible to build algorithmic classification trees (algorithmic tree models) on the basis of fixed initial information in the form of a discrete data training sample. The constructed algorithmic classification tree will unmistakably classify (recognize) the entire training sample on which the model is built, have a minimum structure (structural complexity) and consist of components – autonomous classification and recognition algorithms as the vertices of the structure (attributes of the tree).

**Objective.** The aim of this work is to create a simple, effective and universal method of constructing classification (recognition) models based on the concept of algorithmic trees for arrays of real hydrographic data, where the obtained schemes of classification systems (classification tree structure) are characterized by a tree structure (construction) and autonomous classification algorithms (sets of generalized features) as their structural elements (construction blocks).

**Method.** The general scheme of synthesizing classification trees in a form of algorithmic trees on the basis of a procedure of approximation of an array of discrete data by a set of elementary classifiers, which for the set initial training sample builds a tree-like structure, i.e. a model of the algorithmic tree, is suggested. Moreover, the constructed scheme consists of a set of autonomous classification and recognition algorithms evaluated at each step/stage of constructing the classification tree for this initial sample. A method for constructing an algorithmic classification tree has been developed, the main idea of which is to approximate step-by-step the initial sample of an arbitrary volume and structure by a set of elementary classification algorithms. The method of algorithmic tree in the formation of the current algorithmic tree vertex, node, generalized feature provides selection of the most effective, high-quality elementary classifiers from the initial set and completion of only those paths in the tree structure where the largest number of errors (failures) occurs. The structural complexity of the algorithmic tree design is estimated based on the number of transitions, vertices and tiers of the model structure, which allows one to improve the quality of its subsequent analysis, provide an effective decomposition mechanism, and build algorithmic tree structures under fixed constraint sets. The method of the algorithmic tree synthesis allows one to build different types of tree-like recognition models with different initial sets of elementary classifiers with predetermined accuracy for a wide class of problems of the artificial intelligence theory.

**Results.** The developed method of building algorithmic tree models allows one to work with training samples of a large amount of different types of information (discrete data) and provides high speed and economy of hardware resources in the process of generating the final classification scheme, as well as to build classification trees with predetermined accuracy.

**Conclusions.** An approach to the synthesis of new recognition algorithms (schemes) based on a library (set) of already known algorithms (methods) and schemes has been developed. That is, an effective scheme for recognizing discrete objects based on step-by-step evaluation and selection of classification algorithms (generalized features) at each step of the scheme synthesis is presented. Based on the suggested concept of algorithmic classification trees, a model of the structure of the algorithm tree was built, which provided classification of flood situations for the Uzh river basin.

**KEYWORDS:** classification tree, algorithmic classification tree, discrete object, feature, recognition function, recognition algorithm, branching criterion.

### ABBREVIATIONS

TS is a training selection;  
ST is a test selection;  
RS is a recognition system;  
IR is an image recognition;  
GA is a generalized attribute;  
RF is a recognition function;  
SS is a software system;  
LCT is a logical classification tree;  
ACT is an algorithmic classification tree;  
DFT is a generalized feature tree;  
CMT is a classification models tree;  
GAT is a generalized attribute tree;

BAS is a branched attribute selection.

### NOMENCLATURE

$G$  is a set of signals (discrete objects);  
 $R$  is a partitioning into classes (patterns)  $H_i$  specified in the initial data set  $G$ ;  
 $n$  is a total number of the problem attributes (the attribute space dimensionality);  
 $w_i$  is a discrete object of the initial TS;  
 $m$  is a total number of training pairs (known classification objects) of the initial TS;  
 $f_R$  is a recognition function;

$f_j$  is a generalized feature constructed at  $j$  – step of generating the algorithmic classification tree model;

$a_i$  is a fixed independent classification and recognition algorithms in the scheme of the algorithmic classification tree;

$x_i$  is a discrete objects (signals) of the initial TS;

$l$  is a value of a class of discrete object  $x$  belonging;

$H_i$  is a set of classes set by the initial TS;

$M$  is a total number of independent classification algorithms  $a_i$  in the set;

$k$  is a total number of classes (patterns) of the set of signals  $G$ ;

$W(f)$  is the generalized attribute  $f$  information quality value;

$G_{a_1, \dots, a_i}$  is a subset of the initial  $G$  which is approximated using the set of classification algorithms  $a_i$ ;

$S_{a_1, \dots, a_n}$  is a number of occurrences in the TS of training pairs which meet the condition  $x_i \in G_{a_1, \dots, a_n}$ ;

$S_{a_1, \dots, a_n}^l$  is a number of all training pairs of the initial TS which are correctly classified (when the basic membership requirement is fulfilled  $x_s \in G_{a_1, \dots, a_i}, f_R(x_s) = l$ ;

$\delta_{a_1, \dots, a_i}$  is a frequency of occurrence of the members of the sequence of discrete objects from the initial TS in  $G_{a_1, \dots, a_i}$  data set;

$\rho_{a_1, \dots, a_i}$  is a maximum frequency out of frequencies

$\psi_{a_1, \dots, a_i}^j$  is a regarding all the classes of the current problem;

$F_S$  is a value which characterizes the quality of approximation of the initial TS using the set of classification algorithms  $a_i$ ;

$K_{Stop}$  is a branching stopping criterion at the ACT model construction;

$F$  is a function of recognizing the structure of the classification tree;

$En_{tr}$  is a classification errors, rejections (of the first type) in the initial training data set;

$Et_{tr}$  is a classification errors, rejections (of the first type) in the training data set;

$T_{Uz}$  is a characterizes the total time (hardware time) which is necessary for building the current generalized feature  $f_j$ ;

$E_{Uz}$  is a information capacity (structural complexity) of the constructed GF  $f_j$  within the current step of generating the algorithmic classification tree model;

$S_{Uz}$  is a total number of discrete objects  $x_i$  of the initial TS which are generalized (described) by the specified generalized feature  $f_j$ ;

$P_{pr}(TS)$  is a power (volume) of the initial TS (or its fixed part for the current step of the scheme of constructing the algorithmic classification tree);

$Er_{All}$  is a total number of errors of the algorithmic classification tree model in the data of the initial test set as well as of the training set;

$M_{All}$  is a total power (volume) of the data of the training set as well as of the test set;

$Fr_{All}$  is a characterizes the number of vertices of the obtained algorithmic classification tree model with the resulting value  $f_R$  (RF, i. e. the leaves of the classification tree);

$V_{All}$  is a represents the total number of all types of vertices in the structure of the algorithmic classification tree model;

$O_{Uz}$  is a total number of generalized features used in the classification tree model;

$P_{All}$  is a total number of transitions between the vertices in the structure of the constructed classification tree model;

$N_{All}$  is a total number of different classification algorithms that are used in the classification tree model;

$I_{Main}$  is a indicator of generalizing data of the initial TS using the classification tree;

$Q_{Main}$  is a integral indicator of the quality of the algorithmic classification tree model.

## INTRODUCTION

Tasks related to image recognition, are quite diverse and arise in the contemporary world in all spheres of economics and social content of human activity, this leads to the need to construct and study mathematical models of the corresponding systems. As of now, there is no universal approach to their solving. There have been proposed several fairly general theories and approaches that allow solving many types (classes) of tasks, but their application differs greatly by the high level of sensitivity to the specifics of the task itself or subject area of application [1]. Many theoretical results have been obtained for special cases and subtasks, and it should be noted that the weak point of successful real recognition systems is the necessity to perform a huge amount of computation and orientation on powerful hardware tools. However, a large number of application tasks in various fields of natural science, such as geology, geophysics, geochemistry, medicine, sociology, archeology, biology, etc., where classification problems are solved using software and hardware systems, determines the intensity and relevance of this study [2–5]. So, to date, four thousand recognition methods and schemes are known. All of them are characterized by a variety of approaches to the classification



problem, but have sets of strict restrictions. The limitations of classification schemes are largely related to the efficiency of the recognition scheme, the speed of classification, and the rational use of information system resources. Well-known classification schemes and methods are also characterized by high sensitivity to classes of applied problems and their specifics. It is clear that such limitations of classification methods and schemes also have a negative impact on real information systems (recognition systems) [6]. The representation of training samples and large amounts of discrete information in the form of logical and algorithmic tree structures has its own significant advantages. This allows you to provide an economical description and efficient data analysis, a simple mechanism of operation [7]. So, the coverage of the training set with a set of elementary features in the case of logical classification trees, or the coverage of the training set with a fixed set of autonomous recognition and classification algorithms in the case of algorithmic classification trees, generates a fixed tree-like data structure (a tree model) that enables compression and transformation of the initial data of the training set. This method allows significant software optimization, significant savings in the resources of the classification system [8] in problems with complex data structures. The scope of application of the concept of classification trees, various types of LCTs / ACTs structures is currently extremely voluminous. The set of problems and problems solved by this device can be represented by three basic classes: problems of describing and presenting complex structural data, a class of classification and forecasting problems, and a class of regression analysis problems [9]. Note that modern algorithms and methods based on step – by-step selection of traits of decision tree synthesis belong to the class of greedy algorithms and are known from the literature – division and capture. When applying the classical scheme, the construction of the classification tree will be carried out in stages in the direction from top to bottom [10].

Decision trees, namely the structures of algorithmic classification trees are **the object of the study**.

The central issues of classification tree methods remain the problem of selecting the basic branching criterion in the schema structure, the branching stop criterion, and the logic tree branch rejection criterion. There is a fundamental question of the theory of classification trees – the question of the possible construction of all variants of logical tree structures corresponding to the initial TS and the selection of the minimum depth and structural complexity of the classification tree [11].

The methods and algorithms for constructing algorithmic classification trees (decision trees) are **the subject of research**.

A problematic issue of existing methods for processing training samples in recognition problems when constructing classification rules is that they do not effectively allow us to adjust their complexity and accuracy in the process of model synthesis [12]. This disadvantage is largely absent in the methods and schemes for constructing recognition systems based on the concept of algo-

rithmic, logical classification trees. Note that a special feature of the algorithmic tree concept is the possibility of integrated use of many well – known recognition algorithms to solve each specific problem of constructing a recognition scheme. This allows you to organize the modular principle of constructing classifiers. The concept of algorithm trees is based on a basic scheme – optimal approximation of training sample data by a set of generalized features, classifiers that are included in a certain structure built in the learning process [13].

The **objective of the work** will be to build an effective, universal method for synthesizing recognition models based on the concept of algorithm trees for arrays of real hydrographic data in the problem of predicting flood phenomena. In this case, the constructed recognition (classification) systems are a graph – schema structure (classification tree) and contain sets of different types of recognition algorithms and sets of classifiers (generalized features).

## 1 PROBLEM STATEMENT

Suppose within some set  $G$  of discrete objects  $x$  there is a partition  $R$  into a finite number  $k$  of subsets

(classes, images)  $H_i, (i = 1, \dots, k), G = \bigcup_{i=1}^k H_i$ . The respec-

tive sets  $H_1, \dots, H_k$  are called images and the elements of set  $G$  are called images or representatives of images  $H_1, \dots, H_k$ . Objects (images)  $x$  are defined by sets of values of some features  $x_j, (j = 1, \dots, n)$ . If  $x \in H_i$ , then we consider that this object belongs to image  $H_i$ . In the general case images  $H_1, \dots, H_k$  can be specified by probabilistic partitions  $p(H_1/x), \dots, p(H_i/x)$ , where  $p(H_i/x)$  is the probability ( or in the continuous case probability density) of belonging  $x, (x \in H_i)$  to image  $H_i$ . Initial training information in the form of HB is set by the problem condition as a fixed sequence of some training pairs of the following form:

$$(x_1, f_R(x_1)), \dots, (x_m, f_R(x_m)). \quad (1)$$

To check the effectiveness of the constructed classification models, a test sample is also given – in the form of a set of objects of known class affiliation, and it can be represented as a fixed part of the initial TS data. In this interpretation of the initial problem, TS is a collection of some sets of discrete objects of known class affiliation.

Moreover, each discrete TS data object is a set of values of fixed elementary features, object attributes, and values of recognition functions (RF) on this data set. Note that the value of the recognition function (class marker) refers a fixed discrete TS data object to the corresponding class [14].

Within the framework of this study, the basic task will be to construct a model of the algorithm tree (ADC struc-

ture) with a set of fixed design parameters  $p$ . Moreover, the structure  $L$  (ACT models) of which would be optimal  $F(L(p, x_i), f_R(x_i)) \rightarrow opt$  according to the conditions of the problem (a set of initial TS data, the structure of the initial array of discrete data. Note that in this study, we will be interested in constructing ACT structures for real-world training samples of hydrographic data.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

The research is a continuation of the works devoted to the main problematic issues of the concept of tree-like classification schemes for discrete objects [6–8, 11] in pattern recognition problems. The main attention in these works is paid to the problems of constructing, representing, using, and optimizing the structures of classification trees. It is known from [6] that the resulting classification scheme, which is constructed by an arbitrary method or algorithm based on the criteria of branched feature selection, has a tree-like logical structure. In other words, it can be represented in graph – schematic form. A logical classification tree consists of a set of vertices, branches of the structure, which are grouped by tiers and obtained at a certain stage of building a classification tree model [15]. An actual problem that arises from the work [16] is the question of synthesizing recognition trees, which will actually be represented by a tree of algorithms. Note that unlike existing classification schemes, the main feature of tree recognition systems is that the importance of individual features, a group of features, or algorithms is determined relative to the function that sets the division of objects into classes [17]. Thus, the work [18] deals with the main issues related to generating decision trees in the case of uninformative features. We note a characteristic feature of classification tree models (LCT/ACT structures) to provide effective one-dimensional branching, which allows analyzing attributes, individual features in the object structure, and working with generalized features of various types. In this case, sets of generalized features can be represented as complex predicates, and for structures of algorithm trees in the form of sequences by autonomous classification and recognition algorithms [8]. This representation of classification models (LCT/ACT structures) is actively used for big data mining, where there is a need to build a classification model that predicts the value of one or more target variables based on data from the original TS array [19]. To date, there are a significant number of methods and schemes that implement the concept of decision trees based on basic branching criteria, but two of their representatives (C4.5/C5.0 and CART) have received the greatest use and distribution. So the scheme of the logical classification tree C4.5/C5.0 uses the so – called information-theoretic criterion as a node selection criterion (branching criterion). The CART scheme is based on the calculation of the Gini index (criterion). This criterion is based on calculating the relative distances between the distributions of primary classes [20] based on the metric given by the condition of the problem. Schemes of all methods and algorithms of

branched feature selection, algorithms for ACT structures, can be reduced to optimal coverage (approximation) of the initial data array by a set of fixed classification (recognition) algorithms. For the LCT case, TS data is approximated by sets of estimated elementary features. A basic question arises – the question of choosing an effective branching criterion in the structure of the classification tree scheme. The question boils down to the problem of efficient selection of sets of vertices, features and their combinations of discrete objects for schemes of logical classification trees and algorithms for ADC methods. A set of these basic questions is considered in [21], which highlights the problem of informational evaluation of individual discrete features, their sets and fixed combinations based on fixed performance criteria. This allows you to introduce an effective mechanism for implementing branching in the design of the classification tree model. The structures of classification tree models (LCTs / ACTs models) constructed from the initial TS data have a relatively small structural complexity, but the classification tree structure itself is sparse and unevenly filled in depth with attributes compared to the class of regular logic trees [22]. Important issues remain the convergence of the process of constructing classification tree structures using branched feature selection methods, the issue of maximum complexity of the tree model synthesis procedure itself, and the choice of an effective criterion for stopping the logical tree synthesis process [23]. An important point is also that the concept of classification trees does not contradict the fundamental ability to use not only individual attributes, attributes of objects that combine them, and sets as attributes, vertices of the classification tree structure. Moreover, individual independent recognition algorithms estimated from TS data can be considered as branches. In this case, the output will be a new structure – the ACT model [8]. This paper will be devoted to ACT structures in practice.

## 3 MATERIALS AND METHODS

At the first stage, by analogy with the schemes of selection of elementary features (LCT structures) [7], we propose a basic scheme of algorithmic classification trees. Moreover, for ACT structures, it will consist in approximating the array of the initial TS with a set of autonomous, independent classification algorithms of various types and structures.

At the first stage, the condition of the problem is the initial TS of the general form and structure (1). It is a set of elements with class labels (RF values) of the total volume  $m$ . A system of different types of algorithms (classifiers) is also defined as a condition of the problem  $a_1(x), a_2(x), \dots, a_M(x)$ . We introduce the following basic sets, which represent the breakdown of the initial HB data by the corresponding independent classification algorithms  $a_i$ :

$$G_{a_1, \dots, a_i} = \{x \in G / a_i(x) = 1\}, (i = 1, \dots, M). \quad (2)$$

Each of the fixed autonomous classification algorithms  $a_i(x)$  of the initial set generates a value from the set  $\{0,1\}$  at the output. Here  $a_i(x)=1$ , in the case of a successful approximation of the object  $x$ ,  $a_i(x)=0$  in the opposite case.

Note that the set system  $G_{a_1, \dots, a_i}$  is a complete step – by-step division of the set  $G$  in the process of increasing the  $i$  value – that is, the classification algorithms involved. This division is implemented by a set of independent classification algorithms  $a_1, a_2, \dots, a_M$ . Note that depending on the initial set of classification algorithms  $a_1, a_2, \dots, a_M$ , some of the sets  $G_{a_1, \dots, a_i}$  may be empty. This situation is possible if one fixed or several algorithms for approximating the current TS data fail.

Enter a value  $S_{a_1, \dots, a_M}$  that determines the number of training pairs  $(x_s, f_R(x_s))$ ,  $(1 \leq s \leq m)$  that meet the condition  $x_s \in G_{a_1, \dots, a_i}$ . Additionally, we introduce a value  $S_{a_1, \dots, a_M}^j$ ,  $(j=0,1, \dots, k-1)$  that determines the number of initial pairs  $(x_s, f_R(x_s))$ ,  $(s=1,2, \dots, m)$  that meet the conditions  $x_i \in G_{a_1, \dots, a_n}$  and  $f_R(x_s) = j$ .

Then, according to these values and by analogy with the methods of selecting sets of elementary features [23], the following values can be introduced, which should be considered as basic criteria for constructing branching for ACT structures:

$$\delta_{a_1, \dots, a_i} = \frac{S_{a_1, \dots, a_i}}{m}; \quad \psi_{a_1, \dots, a_i}^j = \frac{S_{a_1, \dots, a_i}^j}{S_{a_1, \dots, a_i}};$$

$$\rho_{a_1, \dots, a_i} = \max_j \psi_{a_1, \dots, a_i}^j. \quad (3)$$

If the condition  $x_s \notin G_{a_1, \dots, a_i}$  for all is met  $(s=1, \dots, m)$ , then  $\delta_{a_1, \dots, a_i} = 0$  and  $\psi_{a_1, \dots, a_i}^j = 0$  when  $(j=0,1, \dots, k-1)$ .

The value  $\delta_{a_1, \dots, a_i}$  characterizes the frequency of occurrence of sequence sets  $x_1, x_2, \dots, x_m$  in the set  $G_{a_1, \dots, a_i}$ . The value  $\psi_{a_1, \dots, a_i}^j$  characterizes the frequency of an object  $x$  belonging to the  $H_j$  class and  $x \in G_{a_1, \dots, a_i}$ .

The condition  $x \in G_{a_1, \dots, a_i}$  is equivalent to the condition that for a sequence  $a_1, \dots, a_i$  there is such an element  $a_y$  that  $a_y(x)=1$ . The value  $\delta_{a_1, \dots, a_i}$  characterizes the information efficiency of recognition for an object  $x$  up to one of the classes  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  under the condition  $x \in G_{a_1, \dots, a_i}$ .

At the next stage, the fundamental question of whether an object  $x$  belongs to classes  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  again arises – the question of forming a classification rule for the ACT scheme. Here you should assign the classification object  $x$  to a class  $H_j$  when performing the following basic relation:

$$\rho_{a_1, \dots, a_i} = \Psi_{a_1, \dots, a_i}^j. \quad (4)$$

Note that this ratio is a fixed classification rule, and  $\{0 \leq j \leq k-1\}$ . The larger the value  $\rho_{a_1, \dots, a_i}$ , the higher its efficiency.

According to the problem condition, the only information that represents image splitting  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  is the initial TS. In this case, the class  $H_j$  is a collection of all training pairs  $(x_s, f_R(x_s))$  of TS that satisfy the condition of belonging  $f_R(x_i) = j$  [24–27].

By analogy, the average efficiency of recognizing the set of images  $H_0, H_1, \dots, H_{k-1}$  which are specified by the training dataset with the help of recognition algorithms  $a_1, a_2, \dots, a_M$ , is estimated by the following value:

$$F_S(a_1, \dots, a_M) = \sum_{a_1, \dots, a_i} \delta_{a_1, \dots, a_i} \cdot \rho_{a_1, \dots, a_i}. \quad (5)$$

The value  $F_S(a_1, \dots, a_M)$  is an estimate of the approximation of the initial TS using the initial set of independent classification algorithms  $a_1, a_2, \dots, a_M$  or the approximation ability of a fixed set of algorithms.

The value  $F_S(a_1, \dots, a_M)$  can be obtained in parallel according to the following scheme. Let the recognition function  $F$  be a certain display that matches each set  $a_1, \dots, a_i$  with a certain element of the set  $\{0,1, \dots, k-1\}$ . Moreover, each element of this set encodes a class label.

In this case  $F$ , the RF is a function of the form  $F(a_1, \dots, a_i)$ , the arguments of which take values from the set  $a_1, \dots, a_i$ . Then the RF  $F(a_1, \dots, a_i)$  uniquely refers the object  $x, (x \in G)$  to the class  $H_j, (0 \leq j \leq k-1)$  for which the condition is fulfilled:

$$F(a_1, \dots, a_i) = l, (0 \leq l \leq k-1). \quad (6)$$

Let the condition of the problem be the initial TS in the form of a sequence of training pairs  $(x_j, f_R(x_j))$  and a fixed set of different types of classification algorithms  $(a_1, \dots, a_m)$ . The total number of training pairs in HB is –  $M$ , the dimension of the feature space is –  $n$ . It has to be admitted that the work of the constructed models of classification trees is checked using an array of training dataset whose capacity is equal to  $T$  (whose class belonging is also known).

Admittedly, here the data of the initial TS specify some partition into classes  $(H_1, \dots, H_k)$ , and it is possible that the corresponding algorithms  $a_i$  may be unrelated by a single concept of recognition, and they can implement various methods and algorithms of classification (for example, these may be conventional geometric algorithms – the principle of whose work lies in approximating the TS by the corresponding geometric objects, algorithms for calculating estimates, potential functions, etc.).

The result of each of the fixed, selected from the algorithm library, autonomous classifiers  $a_i$ , at the corresponding stage of ACT generation, is one or more generalized features –  $f_j$ . Here, GFs are classification rules that approximate a certain part of the initial training sample. For the case of known geometric recognition algorithms, the resulting generalized features will be geometric objects that cover TS in the feature space of the dimension problem –  $n$ .

In applied problems, there may be cases when the corresponding classification algorithm  $a_i$  cannot construct a generalized feature  $f_j$ . This situation is possible due to the complex arrangement of classes  $H_k$  in the feature space of the problem or certain conceptual and implementation limitations of the classification algorithm itself. It is also possible that the generalized features  $f_j$  constructed by the classification algorithm  $a_i$  do not fully approximate the initial TS, or this situation is provided for by the ACT generation algorithm scheme itself. Here it is possible that there is an initial limitation in the scheme of the tree algorithm for generating no more than one generalized feature  $f_j$  at each step of constructing the ACT structure.

Objects of the initial TS that do not fall under the constructed scheme of sets of GFs  $f_j$  approximation of the sample belong to classification errors of the first type –  $En_{tr}$ . Accordingly, for TS data, failures classified of this type are classified as errors of the first type –  $Et_{tr}$ .

Therefore, we assume that the ACT structure (type II) will have a general construction of the form – (Fig. 1).

Moreover, each tier of such a classification tree defines the stage of building an ACT model. That is, the stage of approximation by a fixed classification algorithm  $a_i$  for a certain part of TS data. It is clear that this approach allows you to effectively adjust the complexity and accuracy of the classification tree model that is being built.

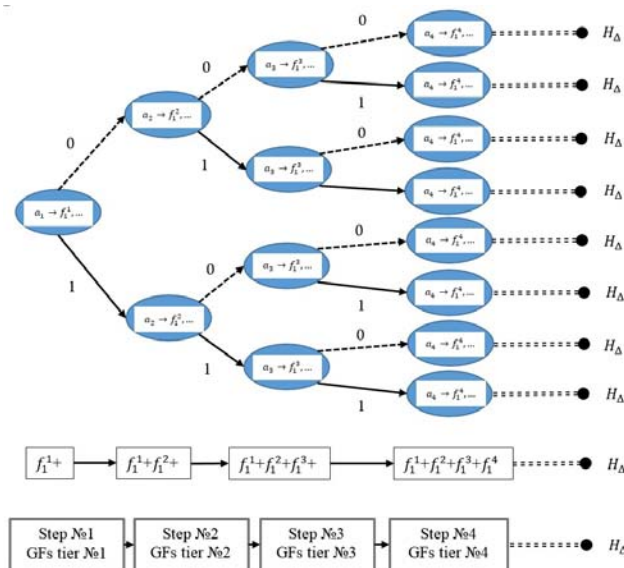


Figure 1 – General scheme of the ACT structure (type II)

For each stage of ACT model generation – (Fig. 1) submit its own classification algorithm  $a_i$  and its own corresponding part of TS, a subset of the initial TS. Note that the entire initial TS is provided only at the first step, then with the next stages of building the classification tree, the power of the TS data array will fall due to the set of constructed GFs sets  $f_j$ . At each step of the sequence, the GFs will approximate a certain part of the original TS data. Depending on the conditions of the problem, the structure of the current ACT construction scheme, and the features of a fixed algorithm  $a_i$ , it is possible to generate sets  $f_j$  and sequences of ACT at each step of the ACT scheme.

We introduce in the following form the basic criterion  $K_{Stop}$  for stopping the branching scheme of the method for constructing the algorithm tree model, which consists in checking the volume of the initial sample  $P_{pt}(TS)$  or its fixed part:

$$K_{Stop} = \begin{cases} 0, & \text{if } P_{pt}(TS) = 0; \\ 1, & \text{if } P_{pt}(TS) > 0. \end{cases} \quad (7)$$

The general scheme for constructing the ACT model continues until the condition is met  $K_{Stop} = 1$ . In a situation where  $K_{Stop} = 0$  the ACT model synthesis scheme is completed. There is a transition to the stage of testing the model based on TS data and evaluating the quality of the classification tree based on Integral indicators of the model quality.

For the ACT method, the fundamental question becomes the choice of the branching criterion, the effective choice of the current classification algorithm  $a_i$  in the structure of the classification tree model under construc-

tion. Then, by analogy with the methods of approximating HB with a set of elementary features – as a basic branching criterion, we can offer a step-by-step assessment of the effectiveness of a set of algorithms  $(a_1, \dots, a_i)$  in the following form:

$$W(a_i) = \frac{1}{P_{pr}(TS)} \cdot \frac{\sum_{j=1}^k (T_{Uz} + S_{Uz} + \frac{E_{Uz}}{S_{Uz}})}{k} \quad (8)$$

In formula (8), summation is performed for all classes that are defined by the initial TS data array. Note that there may be restrictions on summation, which are due to the structure, set of initial parameters of the corresponding classification tree construction algorithm.

An important point in the methods of constructing ACT – models (Fig. 1) is that each step of the tree algorithm actually builds its own fixed one or more GFs  $f_j$ . The total number of GFs will increase with each step of the classification tree algorithm. In this case, the ACT scheme with a set of fixed classification algorithms  $(a_1, \dots, a_m)$  generates a tree – like construction – a tree of generalized features with the corresponding set of GFs  $(f_1, f_2, \dots, f_z)$ .

Then, we can propose one of the possible algorithmic schemes for constructing ACT (type II).

At the first stage of building a model, the classification tree is selected based on the basic performance criterion in interactive mode or according to a random scheme. A set of autonomous classification and recognition algorithms  $(a_1, \dots, a_m)$  for initial TS data is recorded. Classification algorithms are selected for their total number in the set (value  $m$ ) depending on the TS structure, conditions, and constraints of the applied problem. This stage is of fundamental importance due to the impact of the final complexity of the constructed ACT model.

At the second stage of building a classification tree model, a complete regular logical tree is constructed. In this ACT structure, a selected classification algorithm from the fixed initial set is located on each of the tiers  $(a_1, \dots, a_m)$ . Notably, in this logical tree, each vertex has two transitions to the next tier (two descendants), which are denoted by the value from the binary set  $\{0,1\}$ . Since we are dealing with a regular logical tree, on each of the tiers of this structure there are labels (variables) of the same type (order), this applies only to the classification algorithms  $a_i$ , and not the GFs they generate.

Thus, at the second stage of generating the ACT (type II), an array of the training dataset is consistently provided to the classification algorithms  $a_i$  (according to the structure of the constructed classification tree – (Fig. 1) in order to obtain a set of corresponding GFs, and their total number in the tree structure and the number for

each classification algorithm (a step in the scheme of the tree, a tier of the logical tree) depends on the initial parameters of the initialization of the algorithm of constructing the ACT (set up interactively or automatically) and the peculiarities of the application task for which the ACT model is built.

After constructing a set of all GFs  $f_j$  for this application task they are located at the appropriate vertices of the obtained classification tree in order to complete the procedure of its construction. The main point of this stage is that the set of constructed GFs should overlap the entire array of the training set to ensure one hundred percent recognition of the initial data. Moreover, there may be some deviations if the ACT model is built with the predetermined accuracy and complexity (this limitation of the task can be implemented by changing the number and capacity of the GFs  $f_j$  being built at the second stage). It must be stressed that this condition can also be realized by limiting the steps (the number of tiers of the structure) in the procedure of building the ACT model, additional restrictions on the number of classification algorithms used in the structure of the classification tree.

At the third stage of the scheme of constructing the ACT after constructing the basic structure of a classification tree it is possible to go directly to the mode of testing the received ACT model. It has to be noted that for each test object, which is provided at the input of the classification tree, there are calculated the corresponding values  $\varphi(a_j)$  (using a set of previously constructed GFs – for each vertex of the corresponding tier of the tree) that ensure (determine) the corresponding route in the structure of the constructed ACT of the second type. Thus, the GFs of each of the vertices of the ACT – in the case of a possible approximation of the object of unknown classification, ensure that the corresponding counter of the class membership is incremented and leave it unchanged in case of refusal (impossibility) of classification. At the output of the ACT structure, the object of unknown classification refers to the class whose membership counter will be maximal, and in case of their zero equity we are dealing with classification refusal.

**Remarks.** Based on the scheme of constructing the ACT of the second type, which was presented above, we can see that the number of GFs (parametric complexity, capacity) generated by the same selected classification algorithm  $a_j$  on some tier of the classification tree for each of the paths of the ACT structure may be different; and following this direction, we come to the fact that the structure of the ACT model does not necessarily belong to the class of regular structures (logical trees) – that is, in each tier of the ACT structure under construction, together with a different quantity and type (general parameters) of GFs the presence of different classification and recognition algorithms  $a_j$  is allowed.

#### 4 EXPERIMENTS

One of the possible areas of applying the concept of algorithmic classification trees is related to the problems associated with forecasting and classifying flood events (based on arrays of meteorological and hydrological data). It is known that flood events cause tremendous harm to both the economic and ecological sectors of the national economy: they flood and prevent economic circulation of agricultural land, flood settlements, destroy residential buildings and industrial enterprises, dams, highways and railways, and human casualties occur – which is extremely important for the Transcarpathian region. That is why the study of the conditions for the formation of flood situations in the context of classifying meteorological phenomena under changing climatic conditions is a necessary stage for further substantiation of new methods for calculations and forecasts for overcoming critical ecological situations.

It should be noted that the surface water flow regime of the Uzh River basin is characterized by significant territorial unevenness due to climatic, temperature factors and the influence of the Carpathian mountains, which have a decisive impact on the formation of seasonal run-offs. To analyze the conditions and causes of floods on the river Uzh in the Transcarpathian region in the autumn – spring period there were used the data from 2 hydrological (observation) posts with a monitoring period from the beginning of 1992 to 2010 including (at the 30-km observation site). It should be highlighted that according to water regime, the river Uzh can be referred to rivers with flood regime of the Carpathian subtype – where flood situations are observed mainly during the autumn – spring period. Such flood situations are usually called cold season floods, and they are observed in the period from October / November to April / May. It is clear that the modern climate has been changing, that is why the boundaries of warm and cold periods are not constant from year to year, and the basis for determining their beginning and ending were mainly the basic meteorological conditions (air temperature, types of precipitation and snow cover).

An important peculiarity of the Uzh river basin, in contrast to other river basins in the western region of Ukraine, is the formation of flood phenomena of mixed origin (based on snowmelt and rain runoffs, often with a predominance of rain component), which occur, by most observations, during autumn – spring; notably, this water regime is due to the climatic peculiarities of Transcarpathia, the presence of mountains, the movement of atmospheric fronts and other factors. We emphasize that in the basins of the rivers of the Transcarpathian region, rain (snow-rain) flood phenomena of different intensity and duration repeat with a frequency of up to 4-6 times per calendar year of observations. On the other hand, it should be noted that as a result of intense snowfall (the corresponding process of snow thaws) for the basin of the river Uzh only snow floods are observed, and it should be said that annual maximums are quite common only due to snowmelt, not water arteries of the Transcarpathian re-

gion. Thus, the annual maximums of floods of the cold period often exceed significantly the maximums of the warm period, and flood phenomena of the cold period are longer in time and occur more frequently, and the maximum water discharge of cold period floods is almost 2.5 times higher than the maximum water discharge of warm period floods (certainly in this scheme depending on the year there are some exceptions). The peculiarity of the Uzh river basin is that the maximum intensity of water rise is from 1.5 to 2.5 m per day, in some cases (1992) this figure may exceed 3 m per day.

The initial parameters of this application task of classifying flood phenomena of the river Uzh are presented in (Table 1).

It must be noted that the monitoring of the river basin has specific features (it may even be unique within a certain area of observation) which arise from the fact that the river is one of rather dynamic objects of nature, and requires, to a great extent, an individual approach (due to geography, formation conditions, water regime etc.). The total water flow of the river should be considered not only as a certain hydrological factor, but also as a geomorphological factor (this should be taken into account at the stage of monitoring and selecting the observation feature space).

So the monitoring of the river bed is connected with a large space (the entire river basin) and significant time consumption, a change in the frequency of observations; along with this the tasks of the observation post include the complete characteristic feature of not only merely hydrological objects, but also the general geological and geomorphological conditions of the river basin. It should be noted that the general model of the flood phenomenon is described on the basis of 18 features (attributes), which have a different nature and are formed on the grounds of long-term observations of the Uzh river basin, and among these features the following defining characteristics (sets of parameters) of the river basin can be distinguished:

1) The total density of the river cover within the observation sector is the ratio of the length of all surface flows of the riverbed (in kilometers), to the total amount of area of the basin (in square kilometers) in the respective sector of observation. Notably, this parameter is calculated separately for each observation post.

2) The coefficient of curvature of the riverbed in the observation area is the ratio of the actual length of the river section (observation area) to the length of the line from the source to the mouth.

3) The parameter of the type of annual terraces is a feature characterizing the geological peculiarities of the structure of the riverbed within the observation site and ranges as follows – {1 ... 6}.

4) The parameter of the average width of the riverbed in the observation area for the basin the Uzh river basin is characterized by sharp differences in the values depending on the observation post where the measurements are made.

5) The parameter of the reference water level – usually, the average water level for rivers is taken as the

reference level; the average water level is observed during the year within the period when the river is free of ice cover, and this average water level is determined as the arithmetic mean of daily level values for a certain period from flood recession to the beginning of ice phenomena). There are approximately determined the period and height of the low, constant and intermediate level, which is taken as the reference (initial) one; at the next stage, the excess of the operating level over the reference one is calculated. In case of exceeding, it is used as the value of growth for bringing all current observations to the datum level.

6) The parameter of the average depth of the riverbed in the observation area for the Uzh river is characterized by rather large differences for different observation areas.

7) The parameter of the general regime of the river is a feature that characterizes the peculiarities of water supply and flow of the riverbed in the observation area and ranges in the following way – {1 ... 10}.

8) The parameter of the temperature regime of the river is a feature characterizing the peculiarities of the temperature regime of the river at the observation site and is within the range of {1 ... 50}.

9) The parameter of the average river flow speed is an attribute characterizing the average rate of water flow in the middle of the riverbed at the observation site.

10) The parameter of the maximum surface speed of the river flow is different from the parameter of the average river flow and is measured on a permanent basis for the site of observing the riverbed.

11) The indicator of the average daily flow rate of the river at the observation site calculated for the period of 24 hours (the indicator is calculated once a day) – the calculating can be done not on the basis of the current measurements, but on the basis of the parameter of the average flow speed.

12) The parameter of the riverbed relief type is a feature characterizing the degree of complexity of the riverbed relief and is within the range of {1 ... 20}.

Based on the set of the presented hydrographic characteristics, at Uzhhorod National University, there were constructed the models of classifying flood phenomena as ACT structures for the river Uzh for the 12-year period (1992 – 2010). To build models of classification trees, the software system “Orion III” was used for generating autonomous recognition and classification systems, where the algorithmic library of the system has 15 algorithms (recognition methods and schemes). Thus, the TS consisted of objects (each of them is described by 18 features) of three basic classes, and at the stage of examining the built classification system (the ACT model) should provide the efficient recognition of objects of the unknown classification in relation to these three classes. The general parameters (characteristics) of the constructed structures (ACT models) are presented in (Table 2).

Notably, the array of the initial training data was dominated by training pairs of class  $H_3$  (objects of the situational state of the neutral zone, the green marker), in

the second place with a significant gap in number there were training pairs of class  $H_2$  (objects of the situational state of the observation zone, the yellow marker) and in the third place there were directly training pairs of the flood phenomena (objects of the red marker) – class  $H_1$ .

It should be stressed that the capacity of class  $H_2$  slightly exceeds the capacity of class  $H_1$ , this can be explained by the dynamics of changes in the flood situation over time, which can return to the normal state (the neutral zone) – phenomena of class  $H_3$ , and in most cases goes into crisis (the red zone of flood phenomenon) – class  $H_1$  (Fig. 2). The training dataset consisted of 8391 objects (sets of the known classification) for two monitoring posts in the city of Uzhhorod, and the efficiency of the constructed recognition system was evaluated with the help of the test set of 500 objects for each of the observation posts, and the test dataset was a separate part of the initial training dataset (consisted of discrete objects of the known classification).

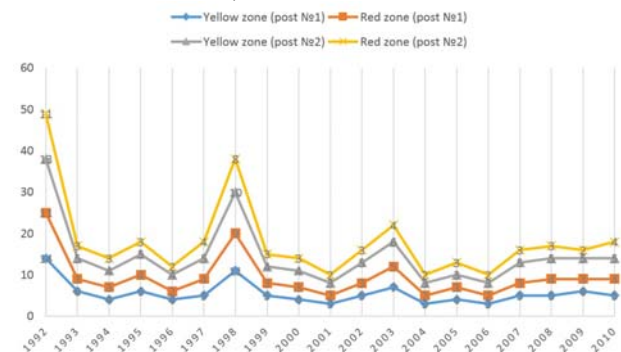


Figure 2 – Flood phenomena of yellow and red zones of the Uzh River during 1992–2010

It must be underlined that this size of the test set is not sufficient for a comprehensive analysis of the quality of the constructed models (structures) of classification trees, but due to the limited nature of the TS itself, even this test set enables the evaluation and analysis of the main parameters of the synthesized ACT structures. The constructed ACT structures (models) provided the necessary level of accuracy and efficiency of the classification specified by the application task, the required speed and the consumption of the working memory of the system, but showed different structural complexity of the constructed classification trees (the parameters of the complexity of the LCT structure – sets of algorithms, sets of generalized features, the number of the vertices of the classification tree structure).

On the basis of the ACT method proposed in this study, classification models of flood phenomena of the Uzh River were built, and admittedly, the ACT structure enables the efficient regulation of the complexity of the classification tree being constructed, or the construction of recognition tree models with the predetermined accuracy as specified by the problem. Clearly, in order to compare and select the specific model of the classification

tree from a fixed set, it is necessary to identify their most important characteristics (feature space dimension, the number of vertices, the number of transitions of the tree structure, etc.) and determine their error in regard to the input array.

An important point is the analysis of quality criteria of the obtained information models which depend on the error of the model, the capacity of the initial array of the training set and test set (the number of training pairs and the feature space dimension specified in the problem), the number of structural parameters of the model and so on. It is evident that the critical parameters of the constructed ACT model that need to be minimized are the model errors respectively within the training dataset, test set and each of the classes (parts, subsets of the initial TS), which are initially specified by the current application task. It has to be emphasized that one of the most important indicators that characterizes the basic properties of the obtained ACT models is the basic indicator of generalizing the initial training dataset by the classification tree (classification model) which is calculated as follows:

$$I_{Main} = \frac{m \cdot O_{Uz}}{Fr_{All} + V_{All} + N_{All} + 2P_{All}}. \quad (9)$$

The basic indicator of generalization of the classification tree model (the algorithm tree structure) reflects its main parameters and characteristics of classification trees. This indicator can also be used as an optimality criterion in the procedure for evaluating an arbitrary tree recognition scheme – the LCTK structure. In a fixed classification problem,  $I_{Main}$  it is important to maximize the parameter, this allows you to achieve the most optimal structure of the classification model, and ensures maximum compression of the initial TS data. This refers to the problem of representing an array of source data with a tree of minimal structural complexity [28]. So an important indicator of the quality of the model constructed as a classification tree taking into account the parameters of the structure of the ACT model is the general integrated quality indicator presented in the following way:

$$Q_{Main} = \frac{Fr_{All}}{O_{Uz} \cdot \sum_i p_i} \cdot e^{-\frac{Er_{All}}{M_{All}}}. \quad (10)$$

The set of parameters  $p_i$  for the integrated assessment of the quality of the classification tree model represents the most important characteristics of the classification tree (according to the LCT / ACT structures) which is being assessed (e. g. the number of elementary features or generalized features that are used in the classification tree model, the number of transitions between vertices, tiers of classification trees, etc.). A fragment of the main results of comparing constructed structures (structures of algorithm trees based on integral quality assessment), conducted tests of ACT models of

various types, with different sets of classifiers, parameters of structural complexity, restrictions on generating generalized features for the data array of the flood classification problem is reflected in (Table. 3).

## 5 RESULTS

The constructed classification trees (ACT models) provided the necessary quality and speed of schemes of classifying flood phenomena of the Uzh river, at the same time the structure of the tree scheme itself is quite compact – (Table 4). The sets of independent classification algorithms that were selected to generate the groups of GFs also proved their efficiency within this application task. The possible further research may be related to expanding the list of classification algorithms in the ACT scheme as well as additional conditions and restrictions concerning the generation of sets of GFs for each step of the classification tree scheme (ACT structure).

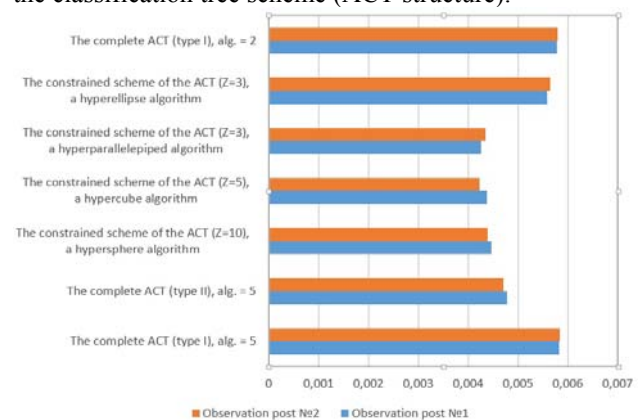


Figure 3 – Integrated indicator of the quality of the constructed ACT models

The presented models of classification trees can be used to assess the general condition of the Uzh river basin (at the observation site) and to identify the situation of the red (flood) zone on the basis of the current measurements of the observation posts. It should be noted that the conducted practical tests of the ACT structures (models) have confirmed the efficiency of the mathematical tool and proposed methods and algorithms for constructing the ACT, the developed software which enables the production of the recommendation on employing this approach (the concept of ACT models) and its software implementation for solving a wide range of classification and recognition tasks in the practical plane.

The only fundamental point to consider when generating ACT models is that usually the consumption of working memory and CPU time of the information system is much higher compared to the structures (models) of the LCT, and it largely depends on the peculiarities of implementing recognition algorithms (classifiers), the number of algorithms in the ACT scheme, the scheme (the model type) of the ACT structure being generated.



## 6 DISCUSSION

The quality indicators of structures (ACT models) presented in this study can be extended to the structures (trees) of LCTs of this application task. It must be highlighted that this integrated indicator of the quality of the ACT model ranges from zero to one, and the lower it is, the worse the quality of the constructed classification tree will be, and the higher the indicator, the better the obtained model will be. Thus, the proposed integral assessment of the quality of classification tree structures (ACT models) reflects its basic characteristics and can be applied as an optimality criterion in the scheme of qualitative assessment of an arbitrary tree classifier (classifier tree models). The algorithm tree model operates only with ready-made, constructed sets of generalized features, independent classification algorithms. Each of the constructed schemes using the algorithmic tree method will represent a general recognition system, a model of the algorithm tree that can be used for practical work – processing large arrays of experimental data in the form of discrete sets. The constructed classification schemes and models of algorithm trees will represent to a certain extent a new recognition algorithm. Moreover, it is synthesized from well-known recognition algorithms and methods, and the resulting ACT structure, the classification scheme is characterized by high versatility in terms of application and a relatively compact model structure. The algorithm tree requires a large amount of hardware to store generalized features or sets of them and initially evaluate the quality of classification algorithms based on TS data. However, the constructed ACT models in comparison with LCT structures have high performance of classification rules, comparable hardware costs for storing and operating the tree structure itself, and high classification quality.

## CONCLUSIONS

The paper solves the actual problem of constructing ADC models for an array of hydrographic data based on graph – diagram structures of algorithms (schemes for covering data arrays with a set of different types of recognition and classification algorithms).

**The scientific novelty** of the results obtained in this paper lies in the fact that a method for constructing ACT structures for classifying flood phenomena of the Uzh river is proposed based on a scheme for qualitative evaluation of sets of different types of classifiers for synthesizing the structure of the classification tree. In the scheme of the algorithm tree (ACT methods), a fixed subset of data from the initial initial sample is approximated at each stage of constructing the classification tree. The basic scheme for evaluating the effectiveness of algo-

gorithms in the ACT method (branching criterion) can be used both to construct the structure of the algorithm tree and to evaluate their approximation ability relative to TS data. This approach makes it possible to achieve low structural efficiency of the synthesized ACT model relative to the initial data set in the future. In this paper, a set of general indicators and parameters is proposed, which makes it possible to effectively represent the general characteristics of the ACT model. It can be used to select the optimal ACT from a set of random classification trees – LCT structures constructed on the basis of methods.

**The practical value** of the obtained results (models of algorithm trees) lies in the fact that the proposed method for constructing ACT models (classification schemes in the form of algorithm trees) was implemented in the algorithm library of the universal software system “ORION III” for solving various types of applied classification problems and predicting large arrays of discrete objects. This toolkit made it possible to carry out an effective classification of flood phenomena of the Uzh River. The conducted practical tests confirmed the operability of mathematical support and constructed ACT models, the developed software, which makes it possible to make a recommendation on the use of this approach and its software implementation for a wide range of applied problems of classification and recognition of discrete objects.

**The perspective research direction** for solving the task of classifying the situational condition of the Uzh River can also be the employment of methods, algorithms and schemes for constructing LCT models with the possibility of comparing them (efficiency, structural complexity and speed of classification) to the constructed ACT structures (models), expanding the library of recognition algorithms (classifiers), optimization of software implementations proposed in this study of constructing the ACT (the evolutionary transition from the C4.5 algorithm to C5.0 can be regarded as an example of such an efficient software optimization), as well as practical testing of the constructed models of classification trees using the training dataset of a larger number of posts of observing the Uzh river basin.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the research work “Modeling and forecasting of emergency situations in the Carpathian region and countries of Central and Eastern Europe”, the state registration number of the work is 0106V00285, the category of work is fundamental research (ID-2201020), 01 – Fundamental research on the most important problems of natural, social and humanitarian sciences.

Table 1 – The initial parameters of the task of classifying flood phenomena of the Uzh River basin.

Number of an observation post №	Dimension of the feature space – N	Capacity of the data array of the initial TS – M	Capacity of the data array of the test set – S	Total number of classes according to partitioning the training dataset – l	The ratio of objects of different classes of the TS ( $H_1 / H_2 / H_3$ )
1	18	4252	500	3	73/102/4107
2	18	4139	500	3	68/97/3974

Table 2 – General parameters of the constructed ACT models

Number of the constructed ACT model	Method (algorithm) of constructing the ACT model	Total number of different classification algorithms applied in the ACT – $N_{All}$	Total number of GFs (sets of GFs) in the ACT structure $O_{Uz}$	Total number of all vertices (together with the resulting ones) in the ACT structure	Total time of generating the ACT structure of the current TS
Observation post №1					
1	The complete ACT method (type I)	5 restrictions on the sequential use of one-at-a-time algorithm	42	84	686 s.
2	The complete ACT method (type II)	5 restrictions on the number of GF generations for one step of constructing the ACT	43	98	712 s.
3	The constrained ACT method (Z=10)	1 a hypersphere algorithm	35	71	406 s.
4	The constrained ACT method (Z=5)	1 a hypercube algorithm	58	117	839 s.
5	The constrained ACT method (Z=3)	1 a hyperellipse algorithm	37	75	442 s.
6	The complete ACT method (type I)	2 a hypersphere algorithm, a hypercube algorithm	40	81	706 s.
Observation post №2					
1	The complete ACT method (type I)	5 restrictions on the sequential use of one-at-a-time algorithm	39	79	676 s.
2	The complete ACT method (type II)	5 restrictions on the number of generations of GFs for one step of constructing the ACT	40	95	701 s.
3	The constrained ACT method (Z=10)	1 a hypersphere algorithm	34	69	380 s.
4	The constrained ACT method (Z=5)	1 a hypercube algorithm	57	115	828 s.
5	The constrained ACT method (Z=3)	1 a hyperparallelepiped algorithm	48	98	793 s.
6	The complete ACT method (type I)	2 a hypersphere algorithm, a hypercube algorithm	38	77	695 s.

Table 3 – The comparative table of classification tree models (ACT structures) of classifying flood phenomena of the Uzh River basin (of posts №1–№2)

№	Method (scheme) of synthesizing the structure (model) of the classification tree (LCT / ACT)	Integrated indicator of the quality of the classification tree model $Q_{Main}$	Total number of errors of the model in the training dataset and test dataset $Er_{All}$
1	The complete ACT method (type I) (the number of algorithms – 5, restrictions on the sequential use of one-at-a-time algorithm)	0.005821 0.005845	0 0
2	The complete ACT method (type II) (the number of algorithms – 5, restrictions on the number of GF generations for one step of constructing the ACT)	0.004778 0.004712	0 0
3	The constrained ACT method ( $Z=10$ ) (the number of algorithms – 1, a hypersphere algorithm)	0.004464 0.004389	0 0
4	The constrained ACT method ( $Z=5$ ) (the number of algorithms – 1, a hypercube algorithm)	0.004387 0.004228	12 13
5	The constrained ACT method ( $Z=3$ ) (the number of algorithms – 1, a hyperparallelepiped algorithm)	0.004256 0.004354	6 6
6	The constrained ACT method ( $Z=3$ ) (the number of algorithms – 1, a hyperellipse algorithm)	0.005582 0.005645	1 0
7	The complete ACT method (type I) (the number of algorithms – 2, a hypersphere algorithm, a hypercube algorithm)	0.005790 0.005801	0 0

### REFERENCES

- Murphy K. Machine Learning: A Probabilistic Perspective, *The MIT Press, Cambridge, Massachusetts*, 2012, 423 p.
- Gupta Y. Selection of important features and predicting wine quality using machine learning techniques, *Procedia Computer Science*, 2018, Vol. 125, pp. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.041>
- Denisko D., Hoffman M. Classification and interaction in random forests, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, Vol. 115, No. 8, pp. 1690–1692. DOI: [10.1073/pnas.1800256115](https://doi.org/10.1073/pnas.1800256115).
- Jordan M. L., Mitchell T. M. Machine learning: trends, perspectives, and prospects, *Science* 2015, Vol. 349(6245), pp. 255–260. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
- Rokach L., Maimon O. Feature set decomposition for decision trees, *Journal of Intelligent Data Analysis*, 2005, Vol. 9, № 2, pp. 131–158. DOI: <https://doi.org/10.3233/ida-2005-9202>
- Hyafil L., Rivest R. Constructing optimal binary decision trees is npcomplete, *Information Processing Letters*, 1976, Vol. 5, № 1, pp. 15–17. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(76\)90095-8](https://doi.org/10.1016/0020-0190(76)90095-8)
- Vasilenko Y. A., Vasilenko E. Y., Kuhayivsky A. I., Papp I.O. Construction and optimization of recognizing systems, *Scientific and technical journal “Information technologies and systems”*, 1999, №1, pp. 122–125.
- Povkhan I., Lupei M., Kliap M., Laver V. The issue of efficient generation of generalized features in algorithmic classification tree methods, *International Conference on Data Stream Mining and Processing: DSMP 2020 Data Stream Mining & Processing*. Springer, Cham, 2020, pp. 98–113. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_6)
- Shilen S. Nonparametric classification using matched binary decision trees, *Pattern Recognition Letters*, 1992, No. 13, pp. 83–87. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(92\)90037-z](https://doi.org/10.1016/0167-8655(92)90037-z)
- Perner P. Improving the accuracy of decision tree induction by feature preselection, *Applied Artificial Intelligence*, 2001, Vol. 15, № 8, pp. 747–760. DOI: <https://doi.org/10.1080/088395101317018582>
- Povkhan I. A constrained method of constructing the logic classification trees on the basis of elementary attribute selection, *CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020)*, Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2020. Zaporizhzhia, 2020, Vol. 2608, pp. 843–857. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-10>
- Murthy S. K., Kasif S. and Salzberg S. A system for induction of oblique decision trees, *Journal of Artificial Intelligence Research*. August 1994, № 2, pp. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1613/jair.63>
- Dovbysh A. S., Moskalenko V. V., Rizhova A. S. Information-Extreme Method for Classification of Observations with Categorical Attributes, *Cybernetica and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, № 2, pp. 45–52. DOI: [10.1007/s10559-016-9818-1](https://doi.org/10.1007/s10559-016-9818-1)
- Witten I. H., Frank E. Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques, Second Edition. San Francisco: Elsevier Inc., 2005, 558 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374856-0.00015-8>
- Geurts P., Elstner M., Wehenkel L. Supervised learning with decision tree-based methods in computational and systems biology, *Molecular Biosystems*, 2009, Vol. 5, No. 12, pp. 1593–1605. DOI: <https://doi.org/10.1039/b907946g>
- Yang J., Li Y. Orthogonal relief algorithm for feature selection, *Lecture Notes in Computer Science*, 2006, pp. 227–234. DOI: [https://doi.org/10.1007/11816157\\_22](https://doi.org/10.1007/11816157_22)
- Rokach L., Maimon O. Data Mining with decision trees: Theory and Applications, 2nd Edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2015, 305 p.
- Subbotin S.A. Construction of decision trees for the case of low-information features, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 1, pp. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-12>
- Rodriguez J. J., Kuncheva L. I. and Alonso C. J. Rotation forest: A new classifier ensemble method, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, Vol. 28, No. 10, pp. 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpami.2006.211>

20. What is the C4.5 algorithm and how does it work (2019). Retrieved from <https://towardsdatascience.com/what-is-the-c4-5-algorithm-and-how-does-it-work-2b971a9e7db0>
21. C5.0 Classification Models (2020). Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/C50/vignettes/C5.0.html>
22. Papagelis A., Kalles D. Breeding S. Decision Trees Using Evolutionary Techniques, *Machine Learning: Proceedings of the Eighteenth International Conference (ICML), June 28–July 1 2001*. Morgan Kaufmann Publishers, 2001, pp. 393–400.
23. Povhan I. F. Logical recognition tree construction on the basis a step-to-step elementary attribute selection, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2020, № 2, pp. 95–106. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-10>
24. Murthy S., Salzberg S. Decision Tree Induction: How Effective Is the Greedy Heuristic, *Proceedings of the First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Montreal, Canada, August 20–21 1995*, AAAI Press, 1995, pp. 222–227.
25. Subbotin S., Kirsanova E. The regression tree model building based on a clusterregression approximation for data-driven medicine, *CEUR Workshop Proceedings*, 2018, Vol. 2255, pp. 155–169.
26. Harrington P. Machine Learning in Action, Shelter Island, Manning Publications Co, 2012, 354 p.
27. Hssina B., Merbouha A., Ezzikouri H., Erritali M. A comparative study of decision tree ID3 and C4.5, *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, 2014, pp. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.14569/specialissue.2014.040203>
28. Page D, Ray S. An efficient alternative to lookahead for decision tree induction, *Proceedings of the Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, August 9–15 2003*. Acapulco, Mexico, Publisher Not Avail, 2003, pp. 601–612.
29. Kaftannikov I. L., Parasich A. V. Decision Tree's Features of Application in Classification Problems, *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics*, 2015, Vol. 15, № 3, pp. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.14529/ctcr150304>
30. Povhan I. Logical classification trees in recognition problems, *Kwartalnik Naukowo-Techniczny: Informatyka Automatyka Pomiary w gospodarce o ochronie srodowiska*. Krakow, 2020, No. 2, pp. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.927>
31. Freund Y., Schapire R. Experiments with a New Boosting Algorithm, *Proceedings Thirteenth of the International Conference on Machine Learning (ICML'96)*, Morgan Kaufmann Publishers Ins, 1996, pp. 148–156.
32. Wang H., Hong M. Online ad effectiveness evaluation with a two-stage method using a Gaussian filter and decision tree approach, *Electronic Commerce Research and Applications*, 2019, Vol. 35, Article 100852. DOI: [10.1016/j.elerap.2019.100852](https://doi.org/10.1016/j.elerap.2019.100852).
33. Giatzitzoglou D. G., Sotiropoulos D. N., Tsihrintzis G. A. AIRS-x: An eXtension to the Original Artificial Immune Recognition Learning Algorithm, 2019 International Conference on Computer Information and Telecommunication Systems (CITS), Beijing, China, 2019, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/cits.2019.8862043>
34. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep residual learning for image recognition, *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, June 27–30, 2016*, pp. 770–778. DOI: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
35. Witten I., Eibe F., Hall M. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, 3rd Edition, Morgan Kaufmann Publishers Ins., 2011, 664 p. ISBN 9780123748560.
36. Sirichotedumrong W., Maekawa T., Kinoshita Y., Kiya H. Privacy-preserving deep neural networks with pixel-based image encryption considering data augmentation in the encrypted domain, *2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), IEEE*, 2019, pp. 674–678. DOI: <https://doi.org/10.1109/icip.2019.8804201>

Received 03.09.2021.  
Accepted 01.11.2021.

УДК 001.891:65.011.56

## МЕТОД ДЕРЕВА АЛГОРИТМІВ В ЗАДАЧІ КЛАСИФІКАЦІЇ ГІДРОГРАФІЧНИХ ДАНИХ

**Повхан І. Ф.** – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна.

**Мица О. В.** – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедри інформаційних управляючих систем і технологій. ДВНЗ Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна.

**Мулеса О. Ю.** – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики та прикладної математики ДВНЗ Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна.

**Поліщук В. В.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення систем ДВНЗ Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна.

### АНОТАЦІЯ

**Актуальність.** Робота присвячена виявленню простого та ефективного механізму за допомогою якого можна будувати алгоритмічні дерева класифікації (моделі дерева алгоритмів) за фіксованою початковою інформацією у вигляді навчальної вибірки дискретних даних. Побудоване алгоритмічне дерево класифікації буде безпомилково класифікувати (розпізнавати) всю навчальної вибірки за якою побудована модель, мати мінімальну структуру (структурну складність) та складатися з компонентів – автономних алгоритмів класифікації та розпізнавання в якості вершин конструкції (атрибутів дерева).

**Мета.** Метою даної роботи є створення простого, ефективного та універсального метода побудови моделей класифікації (розпізнавання) на основі концепції дерев алгоритмів для масивів реальних даних гідрографічного характеру, де отримані схеми систем класифікації (структури дерев класифікації) характеризуються деревоподібною структурою (конструкцією) та наявністю автономних алгоритмів класифікації (наборів узагальнених ознак) в якості своїх структурних елементів (блоків конструкції).

**Метод.** Пропонується загальна схема синтезу дерев класифікації у вигляді дерев алгоритмів на основі процедури апроксимації масиву дискретних даних набором елементарних класифікаторів, яка для заданої початкової навчальної вибірки буде деревоподібною структурою – моделлю дерева алгоритмів. Причому побудована схема складається з набору автономних алгоритмів класифікації та розпізнавання оцінених на кожному кроці, етапі побудови дерева класифікації за даною початковою вибіркою. Розроблений метод побудови алгоритмічного дерева класифікації основна ідея якого полягає в по кроковій апроксимації початкової вибірки довільного об'єму та структури набором елементарних алгоритмів класифікації. Метод дерева алгоритмів при формуванні поточної вершини дерева алгоритмів, вузла, узагальненої ознаки, забезпечує виділення найбільш ефективних, якісних елементарних класифікаторів з початкового набору та добудову лише тих шляхів в структурі дерева де відбувається найбільша кількість помилок (відмов) класифікації. Структурна складність конструкції дерева алгоритмів оцінюється на основі кількості переходів, вершин та ярусів структури моделі, що дозволяє підвищити якість його наступного аналізу, забезпечити ефективний механізм декомпозиції, та будувати структури дерев алгоритмів в умовах фіксованих наборів обмежень. Метод синтезу дерев алгоритмів дозволяє будувати різноманітні деревоподібні моделі розпізнавання з різними початковими наборами елементарних класифікаторів з наперед заданою точністю для широкого класу задач теорії штучного інтелекту.

**Результати.** Розроблений метод побудови моделей дерев алгоритмів дозволяє працювати з навчальними вибірками великого об'єму різноманітної інформації (дискретними даними) та забезпечує високу швидкість та економічність апаратних ресурсів в процесі генерації кінцевої схеми класифікації, будувати дерева класифікації з наперед заданою точністю.

**Висновки.** Розроблений підхід синтезу нових алгоритмів (схем) розпізнавання на основі бібліотеки (набору) вже відомих алгоритмів (методів) та схем. Тобто представлена ефективна схема розпізнавання дискретних об'єктів на основі покрокової оцінки та вибору алгоритмів класифікації (узагальнених ознак) на кожному кроці синтезу схеми. На базі запропонованої концепції алгоритмічних дерев класифікації побудована модель структури дерева алгоритмів, яка забезпечила класифікацію паводкових ситуацій для басейну річки Уж.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** дерево класифікації, алгоритмічне дерево класифікації, дискретний об'єкт, ознака, функція розпізнавання, алгоритм розпізнавання, критерій розгалуження.

УДК 001.891:65.011.56

## МЕТОД ДЕРЕВА АЛГОРИТМОВ В ЗАДАЧЕ КЛАССИФИКАЦИИ ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

**Повхан И. Ф.** – д-р техн. наук., доцент, доцент кафедры программного обеспечения систем ГВУЗ Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина.

**Мица А. В.** – д-р техн. наук, доцент, зав. кафедры информационных управляющих систем и технологий ГВУЗ Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина.

**Мулеса О. Ю.** – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики ГВУЗ Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина.

**Полищук В. В.** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения систем ГВУЗ Ужгородский национальный университет, г. Ужгород, Украина.

### АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** Работа посвящена выявлению простого и эффективного механизма с помощью которого можно строить алгоритмические деревья классификации (модели дерева алгоритмов) по фиксированной начальной информации в виде учебной выборки дискретных данных. Построено алгоритмическое дерево классификации будет безошибочно классифицировать (распознавать) всю обучающую выборку по которой построена модель, иметь минимальную структуру (структурную сложность) и состоять из компонентов автономных алгоритмов классификации и распознавания в качестве вершин конструкции (атрибутов дерева).

**Цель.** Целью данной работы является создание простого, эффективного и универсального метода построения моделей классификации (распознавания) на основе концепции деревьев алгоритмов для реальных массивов данных гидрографического характера, где полученные схемы систем классификации (структуры деревьев классификации) характеризуются древовидной структурой (конструкцией) и наличием автономных алгоритмов классификации (наборов обобщенных признаков) в качестве своих структурных элементов (блоков конструкции).

**Метод.** Предлагается общая схема синтеза деревьев классификации в виде деревьев алгоритмов на основе процедуры аппроксимации массива дискретных данных набором элементарных классификаторов, которая для заданной исходной обучающей выборки строит древовидную структуру – модель дерева алгоритмов. Причем построенная схема состоит из набора автономных алгоритмов классификации и распознавания, оцененных на каждом шаге, этапе построения дерева классификации по данной исходной выборке. Разработан метод построения алгоритмического дерева классификации основная идея которого заключается в по шаговой аппроксимации начальной выборки произвольного объема и структуры набором элементарных алгоритмов классификации. Метод дерева алгоритмов при формировании текущей вершины дерева алгоритмов, узла, обобщенной признака, обеспечивает выделение наиболее эффективных, качественных элементарных классификаторов из начального набора и достройку только тех путей в структуре дерева где происходит наибольшее количество ошибок (отказов) классификации. Структурная сложность конструкции дерева алгоритмов оценивается на основе количества переходов, вершин и ярусов структуры модели, что позволяет повысить качество его последующего анализа, обеспечить эффективный механизм декомпозиции, и строить структуры деревьев алгоритмов в условиях фиксированных наборов ограничений. Метод синтеза деревьев алгоритмов позволяет строить разнообразные древовидные модели распознавания с различными начальными наборами элементов классификаторов с заранее заданной точностью для широкого класса задач теории искусственного интеллекта.

**Результаты.** Разработанный метод построения моделей деревьев алгоритмов позволяет работать с учебными выборками большого объема разнотипной информации (дискретными данными) и обеспечивает высокую скорость и экономность аппаратных ресурсов в процессе генерации конечной схемы классификации, строить деревья классификации с заранее заданной точностью.

**Выводы.** Разработан подход синтеза новых алгоритмов (схем) распознавания на основе библиотеки (набора) уже известных алгоритмов (методов) и схем. То есть представлена эффективная схема распознавания дискретных объектов на основе пошаговой оценки и отбора алгоритмов классификации (обобщенных признаков) на каждом шаге синтеза схемы. На базе предложенной концепции алгоритмических деревьев классификации построена модель структуры дерева алгоритмов, которая обеспечила классификацию паводковых ситуаций для бассейна реки Уж.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** дерево классификации, алгоритмическое дерево классификации, дискретный объект, признак, функция распознавания, алгоритм распознавания, критерий ветвления.

#### ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Murphy K. Machine Learning: A Probabilistic Perspective / K. Murphy // The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 2012. – 423 p.
2. Gupta Y. Selection of important features and predicting wine quality using machine learning techniques / Y. Gupta // Procedia Computer Science. – 2018. – Vol. 125. – P. 305–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.041>
3. Denisko D. Classification and interaction in random forests / D. Denisko, M. Hoffman // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2018. – Vol. 115, № 8. – P. 1690–1692. DOI: [10.1073/pnas.1800256115](https://doi.org/10.1073/pnas.1800256115).
4. Jordan M. I. Machine learning: trends, perspectives, and prospects / M. I. Jordan, T. M. Mitchell // Science 2015. – Vol. 349 (6245). – P. 255–260. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
5. Rokach L. Feature set decomposition for decision trees / L. Rokach, O. Maimon // Journal of Intelligent Data Analysis. – 2005. – Vol. 9, № 2. – P. 131–158. DOI: <https://doi.org/10.3233/ida-2005-9202>
6. Hyafil L. Constructing optimal binary decision trees is npcomplete / L. Hyafil, R. Rivest // Information Processing Letters. – 1976. – Vol. 5, № 1. – P. 15–17. DOI: [https://doi.org/10.1016/0020-0190\(76\)90095-8](https://doi.org/10.1016/0020-0190(76)90095-8)
7. Construction and optimization of recognizing systems / [Y. A. Vasilenko, E. Y. Vasilenko, A. I. Kuhayivsky, I. O. Papp] // Scientific and technical journal “Information technologies and systems”. – 1999. – №1. – P. 122–125.
8. The issue of efficient generation of generalized features in algorithmic classification tree methods / [I. Povkhan, M. Lupei, M. Kliap, V. Laver] // International Conference on Data Stream Mining and Processing: DSMP 2020 Data Stream Mining & Processing. – Springer, Cham. – 2020. – P. 98–113. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61656-4_6)
9. Shilen S. Nonparametric classification using matched binary decision trees / S. Shilen // Pattern Recognition Letters. – 1992. – № 13. – P. 83–87. DOI: [https://doi.org/10.1016/0167-8655\(92\)90037-z](https://doi.org/10.1016/0167-8655(92)90037-z)
10. Perner P. Improving the accuracy of decision tree induction by feature preselection / P. Perner // Applied Artificial Intelligence. – 2001. – Vol. 15, № 8. – P. 747–760. DOI: <https://doi.org/10.1080/088395101317018582>
11. Povkhan I. A constrained method of constructing the logic classification trees on the basis of elementary attribute selection / I. Povkhan // CEUR Workshop Proceedings: Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), Zaporizhzhia, Ukraine, April 15–19, 2020. – Zaporizhzhia, 2020. – Vol. 2608. – P. 843–857. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-10>
12. Murthy S. K. A system for induction of oblique decision trees / S. K. Murthy, S. Kasif, S. Salzberg // Journal of Artificial Intelligence Research. August 1994. – № 2. – P. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1613/jair.63>
13. Dovbysh A. S. Information-Extreme Method for Classification of Observations with Categorical Attributes / A. S. Dovbysh, V. V. Moskalenko, A. S. Rizhova // Cybernetica and Systems Analysis. – 2016. – Vol. 52, № 2. – P. 45–52. DOI: [10.1007/s10559-016-9818-1](https://doi.org/10.1007/s10559-016-9818-1)
14. Witten I. H. Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques / I. H. Witten, E. Frank // Second Edition. San Francisco : Elsevier Inc. – 2005. – 558 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374856-0.00015-8>
15. Geurts P. Supervised learning with decision tree-based methods in computational and systems biology / P. Geurts, A. Irrthum, L. Wehenkel // Molecular Biosystems. – 2009. – Vol. 5, № 12. – P. 1593–1605. DOI: <https://doi.org/10.1039/b907946g>
16. Yang J. Orthogonal relief algorithm for feature selection / J. Yang, Y. Li // Lecture Notes in Computer Science. – 2006. – P. 227–234. DOI: [https://doi.org/10.1007/11816157\\_22](https://doi.org/10.1007/11816157_22)
17. Rokach L. Data Mining with decision trees: Theory and Applications / L. Rokach, O. Maimon // 2nd Edition. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. – 2015. – 305 p.
18. Subbotin S. A. Construction of decision trees for the case of low-information features / S. A. Subbotin // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2019. – № 1. – P. 121–130. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2019-1-12>
19. Rodriguez J. J. Rotation forest: A new classifier ensemble method / J. J. Rodriguez, L. I. Kuncheva, C. J. Alonso // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28, № 10. – P. 1619–1630. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpami.2006.211>
20. What is the C4.5 algorithm and how does it work (2019). Retrieved from <https://towardsdatascience.com/what-is-the-c4-5-algorithm-and-how-does-it-work-2b971a9e7db0>
21. C5.0 Classification Models (2020). Retrieved from <https://cran.r-project.org/web/packages/C50/vignettes/C5.0.html>
22. Papagelis A. Decision Trees Using Evolutionary Techniques / A. Papagelis, D. Kalles, S. Breeding // Machine Learning: Proceedings of the Eighteenth International Conference (ICML), June 28–July 1 2001. – Morgan Kaufmann Publishers. – 2001. – P. 393–400.
23. Povhan I. F. Logical recognition tree construction on the basis a step-to-step elementary attribute selection / I. F. Povhan // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2020. – № 2. – P. 95–106. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2020-2-10>
24. Murthy S. Decision Tree Induction: How Effective Is the Greedy Heuristic / S. Murthy, S. Salzberg // Proceedings of

- the First International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Montreal, Canada. – August 20–21 1995, AAAI Press. – 1995. – P. 222–227.
25. Subbotin S. The regression tree model building based on a clusterregression approximation for data-driven medicine. / S. Subbotin, E. Kirsanova // CEUR Workshop Proceedings. – 2018. – Vol. 2255. – P. 155–169.
26. Harrington P. Machine Learning in Action. / P. Harrington // Shelter Island: Manning Publications Co. – 2012. – 354 p.
27. A comparative study of decision tree ID3 and C4.5 / [B. Hssina, A. Merbouha, H. Ezzikouri, M. Erritali] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). – 2014. – P. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.14569/specialissue.2014.040203>
28. Page D. An efficient alternative to lookahead for decision tree induction. / D. Page, S. Ray // Proceedings of the Eighteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. – August 9–15 2003. – Acapulco, Mexico, Publisher Not Avail. – 2003. – P. 601–612.
29. Kaftannikov I. L. Decision Tree's Features of Application in Classification Problems. / I. L. Kaftannikov, A. V. Parasich // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics. – 2015. – Vol. 15, № 3. – P. 26–32. DOI: <https://doi.org/10.14529/ctcr150304>
30. Povhan I. Logical classification trees in recognition problems. / I. Povhan // Kwartalnik Naukowo-Techniczny: Informatyka Automatyka Pomiary w gospodarce o ochronie srodowiska. – Krakow, 2020. – № 2. – P. 12–16. DOI: <https://doi.org/10.35784/iapgos.927>
31. Freund Y. Experiments with a New Boosting Algorithm. / Y. Freund, R. Schapire // Proceedings Thirteenth of the International Conference on Machine Learning (ICML'96), Morgan Kaufmann Publishers Ins. – 1996. – P. 148–156.
32. Wang H. Online ad effectiveness evaluation with a two-stage method using a Gaussian filter and decision tree approach. / H. Wang, M. Hong // Electronic Commerce Research and Applications. – 2019. – Vol. 35. – Article 100852. DOI: [10.1016/j.elerap.2019.100852](https://doi.org/10.1016/j.elerap.2019.100852).
33. Giatzitzoglou D. G. AIRS-x: An eXtension to the Original Artificial Immune Recognition Learning Algorithm / D. G. Giatzitzoglou, D. N. Sotiropoulos, G. A. Tsihrintzis // 2019 International Conference on Computer Information and Telecommunication Systems (CITS), Beijing, China. – 2019. – P. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/cits.2019.8862043>
34. Deep residual learning for image recognition / [K. He, X. Zhang, S. Ren, J. Sun] // Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR), Las Vegas, NV, USA, June 27–30. – 2016. – P. 770–778. DOI: <https://doi.org/10.1109/cvpr.2016.90>
35. Witten I. Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques. / I. Witten, F. Eibe, M. Hall // 3rd Edition, Morgan Kaufmann Publishers Ins. – 2011. – 664 p. ISBN 9780123748560.
36. Privacy-preserving deep neural networks with pixel-based image encryption considering data augmentation in the encrypted domain. / [W. Sirichotedumrong, T. Maekawa, Y. Kinoshita, H. Kiya] // 2019 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), IEEE. – 2019. – P. 674–678. DOI: <https://doi.org/10.1109/icip.2019.8804201>