

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

Радіоелектроніка
Інформатика
Управління



Radio Electronics
Computer Science
Control

Радиоэлектроника
Информатика
Управление



2022/3



Національний університет «Запорізька політехніка»

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(62) 2022

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Національний університет «Запорізька політехніка».

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

Запоріжжя

НУ «Запорізька політехніка»

2022

National University «Zaporizhzhia Polytechnic»

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 3(62) 2022

Founded in January 1999.

Founder and publisher – National University «Zaporizhzhia Polytechnic».

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

Zaporizhzhia

NU «Zaporizhzhia Polytechnic»

2022

Национальный университет «Запорожская политехника»

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 3(62) 2022

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Национальный университет «Запорожская политехника».

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

Запорожье

НУ «Запорожская политехника»

2022

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 посилається на повні тексти своїх статей. Журнал дозволяє повторне використання його вмісту у відповідності Creative Commons ліцензіїю CC BY-SA..

Опублікованим статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал входить до наукометричної бази Web of Science.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії:

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

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

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

Рекомендовано до видання Вченою радою НУ «Запорізька політехніка», протокол № 2 від 26.09.2022.

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

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

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

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

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

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

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

Дробахін Олег Олегович – доктор фізико-математичних наук, професор, перший проректор, Дніпровський національний університет імені Олеся 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 Ішиномакі 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;

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНО-КОНСУЛЬТАТИВНА РАДА

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

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

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

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

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

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

Evgenyi 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 Ilmenay, 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 Shamon 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 Ilmenay, 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 Ursufiu – Dr. Sc., Professor, Professor, Department of Electronics and Computer Engineering, University of Transylvania at Brasov, Romania.

Recommended for publication by the Academic Council of NU «Zaporizhzhia Polytechnic», protocol № 2 dated 26.09.2022.

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

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

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

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

© National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 2022

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;

Венескенс 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 Сэншу, 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 коммуникаций, Мадридский политехнический университет, Испания;

Марковска-Качмар Урсула – 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;

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

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

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

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

Тригано Томас – доктор философии, старший преподаватель кафедры электронной инженерии, Инженерный колледж им. С. Шамон, 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 № 2 от 26.09.2022.

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

© Национальный университет «Запорожская политехника», 2022

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	7
<i>Kharchenko R. Yu., Kochetkov A. V., Mikhaylenko V. S.</i> ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATED RESEARCH OF DC VOLTAGE CONVERTERS OF MODULAR STRUCTURE.....	7
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	22
<i>Гальченко В. Я., Кошовий М. Д., Трембовецька Р. В.</i> ОДНОРІДНІ ПЛАНИ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ НА КВАЗИВИПАДКОВИХ R-ПОСЛІДОВНОСТЯХ РОБЕРТСА ДЛЯ СУРОГАТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ВИХРОСТРУМОВІЙ СТРУКТУРОСКОПІЇ.....	22
<i>Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.</i> KOLMOGOROV-WIENER FILTER FOR CONTINUOUS TRAFFIC PREDICTION IN THE GFSD MODEL.....	31
<i>Kuzmin V. M., Khrashchevskiy R. V., Kulik M. S., Ivanets O. B., Zaliskyi M. Yu., Petrova Yu. V.</i> MATHEMATICAL MODEL FOR DECISION MAKING SYSTEM BASED ON THREE-SEGMENTED LINEAR REGRESSION.....	38
<i>Shved A. V., Davydenko Ye. O.</i> OUTLIER DETECTION TECHNIQUE FOR HETEROGENEOUS DATA USING TRIMMED-MEAN ROBUST ESTIMATORS.....	50
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	58
<i>Бодяньський С. В., Плісс І. П., Шафроненко А. Ю., Калиниченко О. В.</i> НЕЧІТКА ДОВІРЧА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ ДАНИХ ТА ЇХ ПІКІВ.....	58
<i>Vakaliuk T. A., Kukharchuk R. P., Zaika O. V., Riabko A. V.</i> OPTIMIZATION OF SWARM ROBOTICS ALGORITHMS.....	66
<i>Леоуценко С. Д., Олійник А. О., Субботін С. О., Гофман Є. О., Гляшенко М. Б.</i> ЕВОЛЮЦІЙНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ІМПУЛЬСНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЗМУ НЕЙРОПАТЕРНІВ.....	77
<i>Moskalenko V. V., Moskalenko A. S., Korobov A. G., Zaretsky M. O.</i> IMAGE CLASSIFIER RESILIENT TO ADVERSARIAL ATTACKS, FAULT INJECTIONS AND CONCEPT DRIFT – MODEL ARCHITECTURE AND TRAINING ALGORITHM.....	86
<i>Orlovskiy O. V., Khalili Sohrab, Ostapov S. E., Hazdyuk K. P., Shumylyak L. M.</i> MULTILINGUAL TEXT CLASSIFIER USING PRE-TRAINED UNIVERSAL SENTENCE ENCODER MODEL.....	102
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	109
<i>Barkalov A. A., Titarenko L. A., Babakov R. M.</i> SYNTHESIS OF THE FINITE STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS ACCORDING TO THE OPERATIONAL TABLE OF TRANSITIONS.....	109
<i>Karlov D. V., Tupitsya I. M., Parkhomenko M. V.</i> METHODOLOGY OF INCREASING THE RELIABILITY OF VIDEO INFORMATION IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS AEROSEGMENT.....	120
<i>Moroz D. M.</i> MODULE HIGH-EFFICIENCY MULTIPROCESSOR SYSTEM WITH MULTIDIMENSIONAL AGGREGATING OF CHANNELS OF NETWORK INTERFACE.....	133
<i>Prykhodko S. B., Pukhalevych A. V., Prykhodko K. S., Makarova L. M.</i> NONLINEAR REGRESSION MODELS FOR ESTIMATING THE DURATION OF SOFTWARE DEVELOPMENT IN JAVA FOR PC BASED ON THE 2021 ISBSG DATA.....	144
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	155
<i>Nedashkovskaya N. I.</i> METHOD FOR WEIGHTS CALCULATION BASED ON INTERVAL MULTIPLICATIVE PAIRWISE COMPARISON MATRIX IN DECISION-MAKING MODELS.....	155
<i>Пигнастьї О. М., Ивановская О. В.</i> СИНТЕЗ АЛГОРИТМА УПРАВЛЕННЯ ТРАНСПОРТНИМ КОНВЕЙЕРОМ.....	168
<i>Poliakov M. O.</i> BEHAVIOR CLASSIFICATION OF CONTROL UNIT OF SYSTEMS.....	183
<i>Fesenko O. D., Bieliakov R. O., Radzivilov H. D., Sasin S. A., Borysov O. V., Borysov I. V., Derkach T. M., Kovalchuk O. O.</i> METHOD OF IMPROVING THE ACCURACY OF NAVIGATION MEMS DATA PROCESSING OF UAV INERTIAL NAVIGATION SYSTEM.....	196

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Kharchenko R. Yu., Kochetkov A. V., Mikhaylenko V. S.</i> ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATED RESEARCH OF DC VOLTAGE CONVERTERS OF MODULAR STRUCTURE.....	7
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	22
<i>Galchenko V. Ya., Koshevoy M. D., Trembovetskaya R. V.</i> HOMOGENEOUS PLANS OF MULTI-FACTORY EXPERIMENTS ON QUASI-RANDOM R-ROBERTS SEQUENCES FOR SURROGATE MODELING IN A VORTEX STYLE STRUCTUROSCOPY.....	22
<i>Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.</i> KOLMOGOROV-WIENER FILTER FOR CONTINUOUS TRAFFIC PREDICTION IN THE GFSD MODEL.....	31
<i>Kuzmin V. M., Khrashchevskiy R. V., Kulik M. S., Ivanets O. B., Zaliskyi M. Yu., Petrova Yu. V.</i> MATHEMATICAL MODEL FOR DECISION MAKING SYSTEM BASED ON THREE-SEGMENTED LINEAR REGRESSION.....	38
<i>Shved A. V., Davydenko Ye. O.</i> OUTLIER DETECTION TECHNIQUE FOR HETEROGENEOUS DATA USING TRIMMED-MEAN ROBUST ESTIMATORS.....	50
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	58
<i>Bodyanskiy Ye. V., Pliss I. P., Shafronenko A. Yu., Kalynychenko O. V.</i> CREDIBILISTIC FUZZY CLUSTERING BASED ON ANALYSIS OF DATA DISTRIBUTION DENSITY AND THEIR PEAKS.....	58
<i>Vakaliuk T. A., Kukharchuk R. P., Zaika O. V., Riabko A. V.</i> OPTIMIZATION OF SWARM ROBOTICS ALGORITHMS.....	66
<i>Leoshchenko S. D., Oliinyk A. O., Subbotin S. A., Gofman Ye. O., Ilyashenko M. B.</i> EVOLUTIONARY METHOD FOR SYNTHESIS SPIKING NEURAL NETWORKS USING THE NEUROPATHERN MECHANISM.....	77
<i>Moskalenko V. V., Moskalenko A. S., Korobov A. G., Zaretsky M. O.</i> IMAGE CLASSIFIER RESILIENT TO ADVERSARIAL ATTACKS, FAULT INJECTIONS AND CONCEPT DRIFT – MODEL ARCHITECTURE AND TRAINING ALGORITHM.....	86
<i>Orlovskiy O. V. Khalili Sohrab, Ostapov S. E., Hazdyuk K. P., Shumylyak L. M.</i> MULTILINGUAL TEXT CLASSIFIER USING PRE-TRAINED UNIVERSAL SENTENCE ENCODER MODEL.....	102
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	109
<i>Barkalov A. A., Titarenko L. A., Babakov R. M.</i> SYNTHESIS OF THE FINITE STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS ACCORDING TO THE OPERATIONAL TABLE OF TRANSITIONS.....	109
<i>Karlov D. V., Tupitsya I. M., Parkhomenko M. V.</i> METHODOLOGY OF INCREASING THE RELIABILITY OF VIDEO INFORMATION IN INFOCOMMUNICATION NETWORKS AEROSEGMENT.....	120
<i>Moroz D. M.</i> MODULE HIGH-EFFICIENCY MULTIPROCESSOR SYSTEM WITH MULTIDIMENSIONAL AGGREGATING OF CHANNELS OF NETWORK INTERFACE.....	133
<i>Prykhodko S. B., Pukhalevych A. V., Prykhodko K. S., Makarova L. M.</i> NONLINEAR REGRESSION MODELS FOR ESTIMATING THE DURATION OF SOFTWARE DEVELOPMENT IN JAVA FOR PC BASED ON THE 2021 ISBSG DATA.....	144
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	155
<i>Nedashkovskaya N. I.</i> METHOD FOR WEIGHTS CALCULATION BASED ON INTERVAL MULTIPLICATIVE PAIRWISE COMPARISON MATRIX IN DECISION-MAKING MODELS.....	155
<i>Pihnastyi O. M., Ivanovska O. V.</i> SYNTHESIS OF AN ALGORITHM FOR CONTROL OF A TRANSPORT CONVEYOR.....	168
<i>Poliakov M. O.</i> BEHAVIOR CLASSIFICATION OF CONTROL UNIT OF SYSTEMS.....	183
<i>Fesenko O. D., Bieliakov R. O., Radzivilov H. D., Sasin S. A., Borysov O. V., Borysov I. V., Derkach T. M., Kovalchuk O. O.</i> METHOD OF IMPROVING THE ACCURACY OF NAVIGATION MEMS DATA PROCESSING OF UAV INERTIAL NAVIGATION SYSTEM.....	196

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

UDC 621.362.2

ANALYSIS OF METHODS FOR AUTOMATED RESEARCH OF DC VOLTAGE CONVERTERS OF MODULAR STRUCTURE

Kharchenko R. Yu. – PhD, Associate Professor of the Maritime radiocommunications chair, National University “Odessa Maritime Academy”, Odessa, Ukraine.

Kochetkov A. V. – PhD, Associate Professor of the Department of Exploitation of marine electric equipment and means of automation, Odessa National Maritime University, Odessa, Ukraine.

Mikhaylenko V. S. – Dr. Sc., Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Automation of Ships, National University “Odessa Maritime Academy”, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. DC voltage converters (DCV) are part of modern power supply systems (PSS) and power supply ensuring the operation of electronic and radio devices, telecommunication systems and communication and to a large extent determine their power consumption, reliability, time of readiness for operation, weight, size and cost indicators. Even though there are a large number of different software packages used in engineering practice for the study and design of radio engineering devices, such computer-aided design (CAD) systems and virtual computer simulation of electronic circuits have some limitations that do not allow to quickly carry out the entire complex of studies of DCV required for the analysis of electrical processes in various operating modes.

Objective. In this section, the goal is to select the most suitable methods and algorithms that allow the development of software necessary for solving the problems of research and analysis of electrical processes for select energy parameters of the DCV of a modular structure in a separate power channel (PWC).

Method. The paper proposes a method that consists in using mathematical models describing electrical processes in DC voltage converters and creating, on the basis of the developed calculation algorithms, specialized software for the automated study of electrical processes in the DCV of a modular structure using a computer.

Results. The paper discusses the main methods of automated research of radio engineering devices, which can be used to analyze the electrical processes of pulsed DC voltage converters of a modular structure. Algorithms of calculation are given and, as an example, some results of automated research obtained using this method.

Conclusions. The analysis of the known methods of automated research of DC voltage converters of modular structure is carried out. Their advantages and disadvantages are given. It is shown that the most suitable method is based on the use of mathematical models describing electrical processes in DC voltage converters of this type. On the basis of the mathematical models presented in the second section of the work, algorithms and specialized software have been developed that allow them to be widely used in the automated research and design of modular-structured DC voltage converters.

KEYWORDS: modular voltage converters, power channel, converter operation modes, research algorithm for electrical processes.

ABBREVIATIONS

CAD is a computer-aided design system;
DCV is a DC voltage converter;
PWC is a power channel;
SPC is a single-phase pulse converter;
MPC is a multiphase pulse converter;
SP is a software package;
UHF is a ultra high frequency.

NOMENCLATURE

U_{out} is an output voltage (load);
 I_{out} is an output current (load) DCV;
 I_{outk} is an output current (load k -th PWC);
 N is a number of power channels DCV;
 f_a is an accumulation factor;
 $L1$ is an inductance of the primary winding $W1$ of the power choke;
 n_{21} is a transformation coefficient;

N_{\max} is a maximum number of power channels DCV;
 C_{in} is a capacitance of the input filter capacitor;
 C_{out} is a capacitance of the output filter capacitor;
 \bar{U}_{in} is a relative supply voltage;
 R_r is an operating mode – stabilization (tracking);
 R_p is a conversion mode – SPC (MPC);
 P_{out} mode is a type of calculation: $P_{\text{out}} = \text{const}$,
($P_{\text{out}k} = \text{const}$);
 $R_{\text{out}k}$ is a load resistance k -th PWC;
 $P_{\text{out}k}$ is a load power k -th PWC;
 f_{ak} is an accumulation factor k -th PWC;
 f_{rk} is a return factor k -th PWC;
 $U_{\text{in}k}$ is an input voltage (power supply) k -th PWC;
 f_{bk} is a boundary value of the converting frequency;
 T_k is a converting period;
 I_{m1k} is a choke current ripple PWC on the accumulation interval;
 I_{m2k} is a choke current ripple PWC on the return interval;
 I_{sk} is the average value of current consumption k -th PWC;
 $\bar{U}_{\text{in}k}$ is a relative supply voltage k -th PWC;
 $\bar{U}_{\text{out}k}$ is a relative load voltage k -th PWC;
 $I_{\text{out}k}$ is a load current k -th PWC;
 $L1_k$ is an inductance of the primary winding $W1$ of the choke k -th PWC;
 $L2_k$ is an inductance of the secondary winding $W2$ of the choke k -th PWC.

INTRODUCTION

Modern DCV of power supply and power supply systems, as a rule, use the high-frequency (pulse) principle of power conversion. This allows you to create devices and systems with higher power density and characteristics that are unattainable using other methods.

The modular structure of the construction of pulse DC voltage converters from N of the same type of interchangeable PWC simultaneously operating on a common load provides increased reliability, reduced manufacturing labor intensity, and increased level of unification and standardization of DCV. The use of the modular principle of construction of the DCV contributes to solving issues of redundancy, increasing the reliability of converters, increased manufacturability, adapting to changes in their operating modes, and saving energy.

In the study and computer-aided design of radio-technical devices, simulation of their operation on a computer is widely used today, when instead of expensive long-term experimental testing of electrical energy converters on breadboards, research using mathematical

models describing the processes of the devices under study is used. Therefore, in the work are selected:

The object of study is the electrical processes in pulse DCV of modular structure.

The subject of study is automated methods for studying the electrical processes of modular DCV.

The purpose of the work is to develop the methods and algorithms that allow the development of software necessary for solving the problems of research and analysis of electrical processes for select of energy parameters of the DCV modular structure.

To achieve this, it is necessary to solve the following tasks – to analyze modern methods of automated research of radio engineering devices, using the selected mathematical model to develop algorithms and software for solving the problems of research and analysis of electrical processes DCV and to analyze the obtained results.

To carry out a set of necessary studies, the software must ensure the study of converters with SPC and MPC principles of converting electrical energy, the results of which are necessary in the design in order to improve the technical and economic indicators of the DCV.

1 PROBLEM STATEMENT

Mathematical models described in [1, 2, 3] describing electrical processes in a separate power channel and the converter as a whole, allow investigating the dependences: currents and voltages in the PWC elements, in its supply circuits and the load of the converter at a given operating mode. This makes it possible at any time to determine the magnitude of instantaneous currents, their maximum and minimum values, as well as the magnitude of the absolute and relative ripple of voltages and currents at the input and output of the DCV, respectively, with the SPC and MPC, as well as other electrical and energy parameters of the modular structure converters required to select the optimal parameters of the elements, operating modes of the power unit and control algorithms.

The indicated mathematical models also allow us to construct the dependences of the quality indicators of the electrical processes of DCV and energy parameters on the value of the values of the accumulation factors f_a and the transformation coefficient n_{21} , the numbers N of PWC and other parameters for different modes of operation [1].

These dependencies make it possible to identify the features of electrical processes (for example, under different operating modes) with other parameters unchanged (N , L_k , C_k) and to assess the degree of influence of one parameter or another on the nature of the dependence in the entire control range, both in any individual PWC, as well as and in the converter as a whole (Fig. 1).

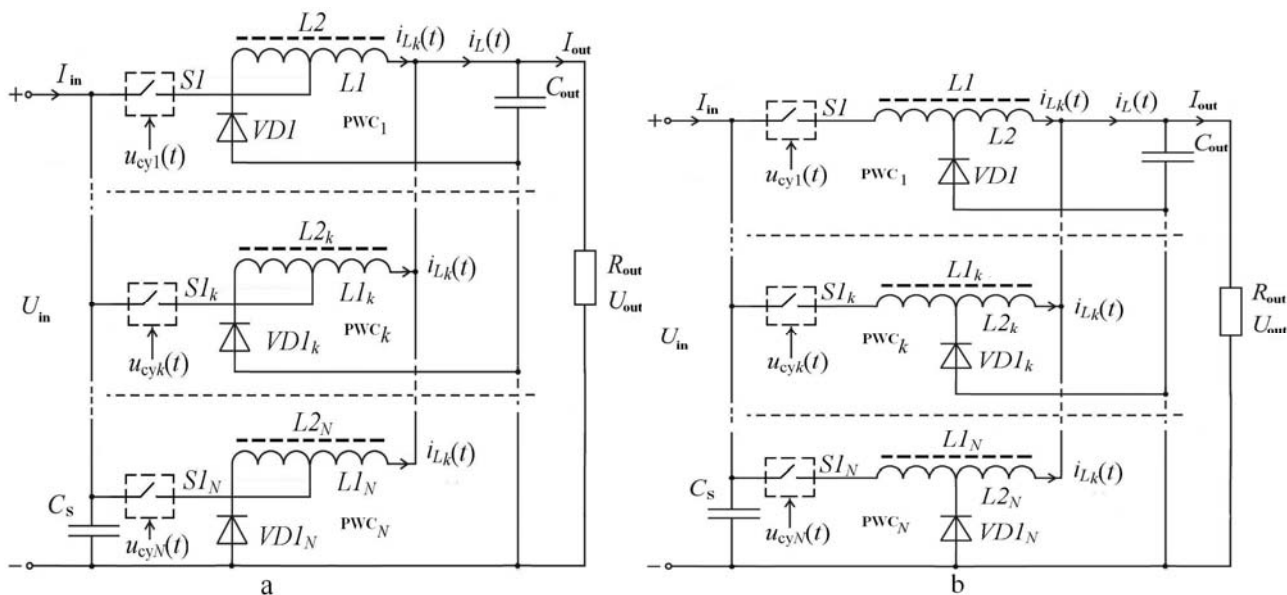


Figure 1 – Power section of the DCV of modular structure with parallel connection of a lower-type PWC with elements of transformation of chokes: a – $n_{21} > 1$; b – $n_{21} < 1$

Thus, the software package for the study of DCV should solve the following main tasks, which are presented in the form of an information model (Fig. 2):

1. Calculation of basic parameters;
2. Calculation of parameters in the time domain (timing diagrams of voltages and currents in the power section, as well as in the input and output circuits of the PWC and DCV);
3. Investigation of the parameters of electrical processes (values of voltages and currents on the elements of the power section of the DCV);
4. Study of quality indicators of electrical processes (absolute and relative values of voltage and current ripple in the input and output circuits of the DCV);
5. Investigation of energy parameters (values of operating currents, power losses on the elements of the power unit, efficiency factor of the DCV).

2 REVIEW OF THE LITERATURE

In the process of automated research and design of electronic devices, as a rule, it is necessary to use a whole set of different software packages. Many sources provide descriptions and examples of modeling electrical processes of radio engineering devices using well-known CAD systems [7, 8, 9]. For example, at the stage of developing a structural diagram, programs such as SysCalc, System View, Simulink, LabView can be used. And when creating schematic diagrams – PSpice (as part of the DesignLab package), Micro-Cap, Electronics Workbench, and when designing UHF devices such specialized programs as Super Compact, Touchstone, Aplac and others [1, 2, 4, 8, 9].

These software products allow engineering studies to create, edit schematic diagrams and make a calculation of a number of parameters, calculate frequency characteristics and transients, perform a variety of device analyzes, and implement other service functions [3, 5, 6].

© Kharchenko R. Yu., Kochetkov A. V., Mikhaylenko V. S., 2022
 DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-1

However, having some limitations, such software products do not allow to fully serve as a tool for researching voltage converters. All these programs are quite expensive and universal, and, as a rule, do not allow complex studies of several parameters at the same time. Also, the construction of dependencies in a relative form, for example, such as the ripple coefficients of voltages and currents, efficiency and other parameters, becomes much more complicated [3, 6, 7, 9]. Therefore, to study and analyze the specified parameters of various converter circuits under different operating modes, it is required to create specialized software – a software package (SP), which allows, using a mathematical model [2, 3, 8] describing electrical processes in the DCV, to carry out all the necessary calculations to solve the problems of automated research and design of converters of modular structure.

3 MATERIALS AND METHODS

When developing such a software package, the allocation of individual software modules – subroutines (SR) is used to calculate the parameters corresponding to the tasks being solved [2, 3, 5, 9]. This is due to the fact that the main computational procedures and operations that make up the individual stages of research should be interconnected and not be duplicated when solving various research problems, which contributes to the reduction of computational operations. Thus, a unified software algorithm can be represented as a set of software modules that will create the most clear and rational software structure.

As a result, the following basic requirements for a software package for studying converters of a modular structure can be distinguished:

1. The rational structure of the software information model, reflecting information links between individual SR when solving research problems, which helps to reduce time costs and resources for software development.

2. The software must ensure the study of the DCV at various parameters of the PWC elements and the selected operating mode for the SPC and MPC.

3. Availability of a separate software module (control program) to control the operation of the software complex (selection of research tasks, change of initial data, providing information links between individual SR at a given stage of research), using the same initial data and calculated relationships of the used mathematical model.

In accordance with the tasks solved by the software package for the study of DCV (Fig. 1) [2, 3, 5], the following parameters are related to the simulation results:

1. To study time dependences – instantaneous values of currents and voltages in the input $i_{ink}(t)$, $u_{ink}(t)$ and output $i_{outk}(t)$, $u_{outk}(t)$ circuits of a single k -th PWC, their total values for the DCV $i_{s.in}(t)$, $u_{s.in}(t)$, $i_{s.out}(t)$, $u_{s.out}(t)$ at SPC and $i_{msk}(t)$, $u_{ms}(t)$, $i_{m.out}(t)$, $u_{m.out}(t)$ MPC.

2. To study the dependencies of the quality indicators of the electrical processes of the DCV on the values of the accumulation and transformation coefficients, the value of the output power, the relative supply voltage and load, the number of power channels, and other parameters:

– absolute ripple of currents ΔI_{ink} , ΔI_{outk} , $\Delta I_{s.in}$, $\Delta I_{s.out}$, $\Delta I_{m.in}$, $\Delta I_{m.out}$ and voltages ΔU_{ink} , ΔU_{outk} , $\Delta U_{s.in}$, $\Delta U_{s.out}$, $\Delta U_{m.in}$, $\Delta U_{m.out}$, respectively, at the input and output to the PWC and DCV during SPC and MPC;

– the ripple coefficients of currents $C_{rs.in}$, $C_{rs.out}$, $C_{rm.in}$, $C_{rm.out}$ and voltages $C_{rs.inu}$, $C_{rs.outu}$, $C_{rm.inu}$, $C_{rm.outu}$ at the input and output of the DCV at the SPC and MPC, respectively;

– smoothing factor of the converter for current S_i and voltage S_u ;

– smoothing coefficients of the structure at the input S_{in} , S_{inu} and the output S_{out} , S_{outu} in terms of current and voltage;

– adjusting characteristics $(U_{in}/U_{out}=f(f_a))$ or $U_{out}/U_{in}=f(f_a)$.

In this case, the smoothing coefficient is determined by the ratio $S_i=C_{r.in}/C_{r.out}$, $S_u=C_{r.inu}/C_{r.outu}$ is used to characterize the efficiency of suppression of alternating currents or voltages in a device that has a filtering effect (for example, a rectifier, converter, filter), where $C_{r.in}$, $C_{r.out}$, $C_{r.inu}$, $C_{r.outu}$ – ripple coefficients, respectively, of the input and output current or voltage at the input and output of the DCV.

Smoothing coefficients of the structure of a modular converter in the power supply circuits S_{in} , S_{inu} and loads S_{out} , S_{outu} in terms of current and voltage characterize the efficiency of suppression of alternating components in the MPC, relative to the similar case of the SPC in the corresponding circuits of the converter. For SPC $S_{in}=S_{out}=1$, $S_{inu}=S_{outu}=1$ [7, 8]. For MPC S_{inm} , S_{outm} can be used as indicators characterizing the efficiency of smoothing the relative decrease in variable components in the MPC in comparison with the SPC made of the same number N PWC [6, 7].

3. To study the energy parameters of converters, which include:

– effective values of currents on PWC elements I_{Cinke} , I_{SIke} , I_{L1ke} , I_{VD1ke} , I_{L2ke} , I_{L12ke} , I_{Coutke} , their total values for DCV I_{S1e} , I_{L1e} , I_{VD1e} , I_{L2e} , I_{L12e} , while the effective values of currents of capacitors of input and output smoothing filters during SPC and MPC will be different (in MPC, the maximum value of the corresponding currents is less) and $I_{Cinme} < I_{Cinse}$ and $I_{Coutme} < I_{Coutse}$.

– power losses on PWC elements P_{Cink} , P_{S1k} , P_{L1k} , P_{VD1k} , P_{L2k} , P_{L12k} , P_{Coutk} , their total values for DCV P_{S1} , I_{VD1} , P_{L1} , P_{L2} , P_{L12} , while power losses on capacitors of input and output smoothing filters during SPC and MPC will be different and $(P_{CM} = P_{Cinm} + P_{Coutm}) < (P_{Cs} = P_{Cins} + P_{Couts})$.

– the coefficients of efficiency of the power channel η_{pwc} and the converter of modular structure at SPC η_{spc} and MPC η_{mpc} .

Based on the foregoing, the tasks solved by the developed software will be a set of interconnected functional blocks, which are presented in the form of an information model, Fig. 2. With an automated study of converters of modular structure in accordance with the information model (Fig. 2), the software package allows you to:

1) study of the parameters of electrical processes in the time domain for various parameters of the elements, operating modes of both a single PWC, and the DCV as a whole;

2) a study of the influence of the magnitude of the values of the initial data and basic parameters on the quality indicators of electrical processes (on the absolute and relative pulsations of voltages and currents in the input and output circuits, and the smoothing coefficients) of the converter;

3) study of the influence of changing the number N of the PWC of the converter on the quality indicators of the electrical processes of the converter.

4) study of the influence of changes in these parameters on the energy performance of the DCV in different modes of operation.

In accordance with the tasks of the study of the DCV, the following functions of the investigated parameters have been identified, which are necessary to assess the quality of electrical processes, energy parameters in the PWC elements, as well as in the input and output circuits of the converter (Fig. 2):

1. Functions of time – $f(t)$.

2. Not being functions of time, for example, the accumulation factor – $f(f_a)$, functions of the transformation ratio – $f(n_{21})$ or functions of the number of power channels – $f(N)$, functions of value relative supply voltage – $f(\bar{U}_n)$.

To solve each of the tasks of the automated research, the “Control program” [4] is used, which controls the computational process, as well as the input of the initial data, the output of the calculation results, including the construction of graphs of the selected dependencies.

The control program carries out the required research using separate functional (depending on the tasks to be solved) program modules, implemented in the form of dynamically linked libraries [4]. During research, the con-

trol program uses a set of software modules in the form of dynamic libraries containing a set of tools necessary for solving a particular problem.

4 EXPERIMENTS

To perform these studies using a computer, it is advisable, on the basis of an analysis of all the calculated ratios and the formulated research tasks, to divide the entire process of calculating the processes and parameters of the converter into a number of independent tasks. Next, distribute them (Fig. 3) by type of research and for each problem to be solved, compose a calculation algorithm, on the basis of which the software should be implemented in the form of appropriate subroutines. After that, it is necessary to combine all the subprograms into a single software complex for the study of DCV, consisting of software modules with various tasks to be solved.

Let us consider in more detail, taking into account the adopted approach – separation into a separate software module – a module for calculating basic parameters that are common for any type of research.

Let's select separate subroutines (SR), which are part of the algorithm for studying the DCV (Fig. 3), implemented in the form of a dynamically connected library:

1) SR “Calculation of basic parameters” serves for preliminary calculation of parameters and their prepara-

tion as initial data for calculating the investigated quantities (block (bl.) 3, Fig. 3);

2) SR “Time dependencies” for calculating timing diagrams (bl. 11, Fig. 3) both in the circuits of a separate power channel, and at the input and output of the converter as a whole (Fig. 1);

3) SR “Quality indicators” (bl. 10, Fig. 3) for calculating the dependences on the accumulation coefficient (with the possibility of changing the number N of PWC, bl. 5, Fig. 3 and the transformation ratio n_{21} – bl. 6, Fig. 3) quality indicators (Fig. 3) of the electrical processes of the DCV (absolute pulsations, pulsation coefficients, smoothing coefficients);

4) SR “Energy parameters” (bl. 9, Fig. 3) for calculating the effective values of currents in the elements of the PWC, the converter, as well as the efficiency at different values of the accumulation coefficients f_a and transformation n_{21} , values, output power P_{out} and various the number N of power channels of the DCV.

The algorithm of the software complex for the study of DCV contains the following blocks and subroutines:

After the start of the program (bl. 1) of the algorithm (Fig. 3), in bl. 2, the initial data are entered: the parameters of the elements, the required type of research, the required type of dependence that needs to be obtained. Depending on the selected type of study, the type of dependence in the subroutine (bl. 3), the basic parameters

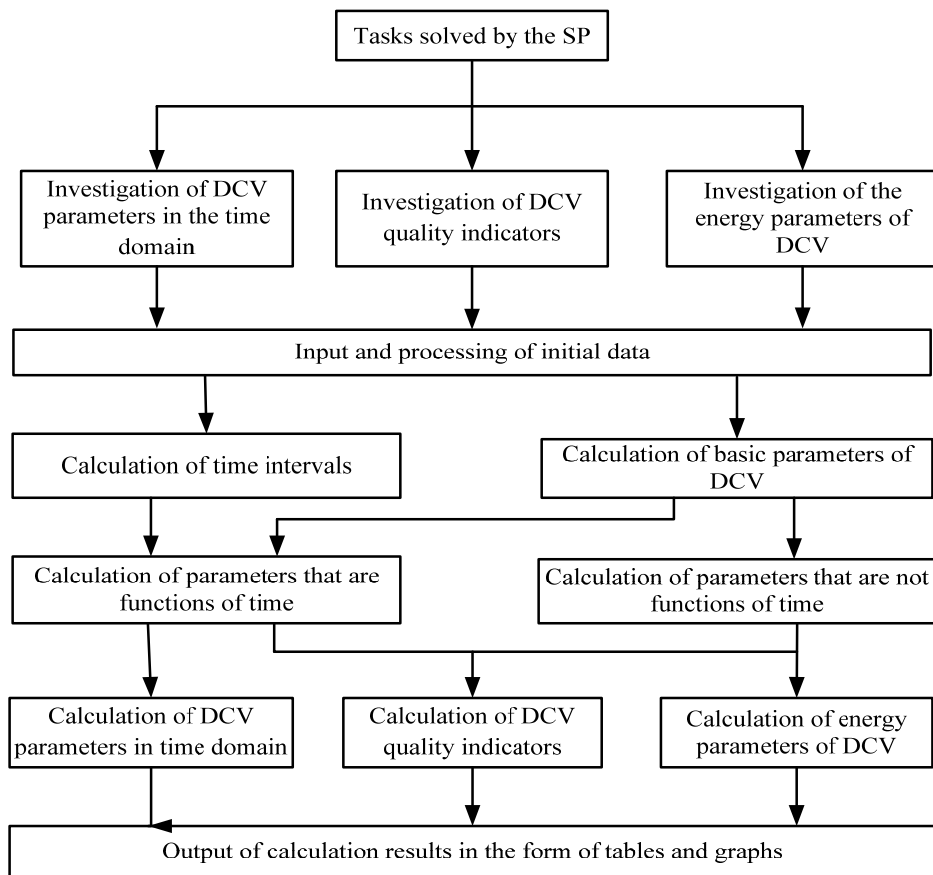


Figure 2 – Software Information Model

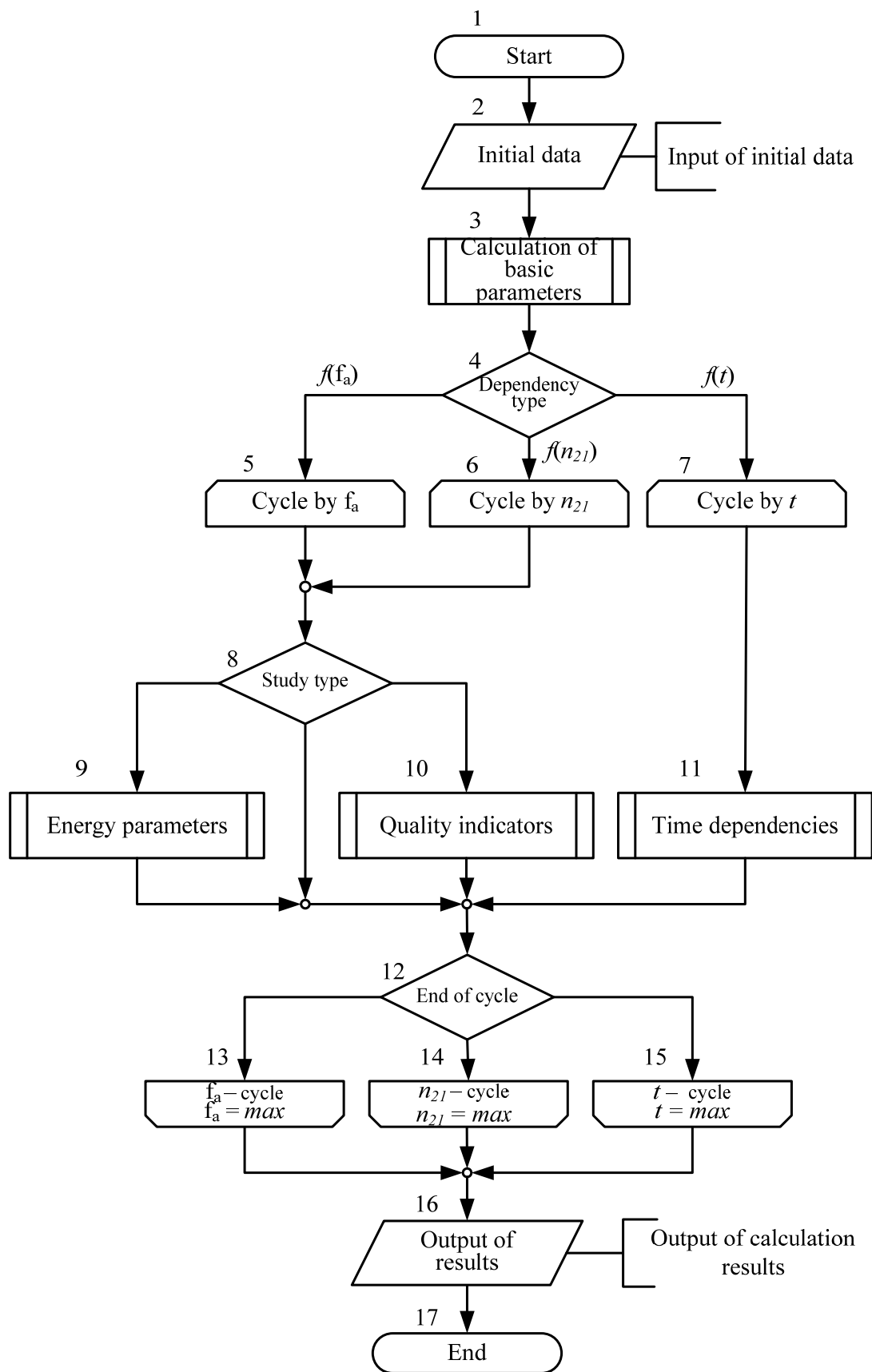


Figure 3 – DCV research algorithm

are calculated, which are used in the corresponding calculations (time dependences, quality indicators or energy parameters) in the PWC or DCV. In bl. 4, depending on the given type of the investigated dependence, the computational process branches out: bl. 5, if the selected dependence on the accumulation coefficient – $f(f_a)$, or bl. 6, dependence on the transformation ratio – n_{21} or bl. 7, if the study of time dependences $f(t)$ is selected. The specified bl. 5, bl. 6, bl. 7 are the beginning of the corresponding cycles for the selected type of dependence. For example, for dependence on the accumulation coefficient – $f(f_a)$, in bl. 5, its minimum f_{amin} and maximum f_{amax} values are determined, as well as the step Δf_a , with which the accumulation coefficient will change. The accuracy of the calculation depends on the size of the step interval Δf_a . With an increase in Δf_a , the error increases. A decrease in Δf_a in order to increase the calculation accuracy leads to an increase in the calculation time.

In addition to calculating the parameters of elements and plotting dependencies, it is important to study the characteristics of the device under various operating modes and when changing the parameters of the elements.

To create the software, the calculation method was used [4], while the study of electrical processes is implemented in the form of an array of input data elements and the corresponding array of elements of the calculation results, that is, in the form of a function $Y_m=f(X_n)$ where Y is an array of calculation results, X is an array initial data, m – element number in the array of calculation results, n – element number in the initial data array. This makes it possible at the program level to separate the study that operates with the values of m and n from the mathematical model using the corresponding arrays of initial data – X and calculation results – Y . In this case, the control program is universal, and the change in the applied purpose of the study can be carried out by replacing the mathematical model and arrays X and Y , which are implemented using a separate dynamically linking libraries (DLL) program module. Therefore, to carry out any research using a universal control program, it is sufficient to create additional DLL [4].

The principle of operation of a specialized program for research is to calculate the array of results in the main function using the appropriate subroutines (the required

set of DLL) based on the array of initial data and basic parameters (Fig. 4) [4].

To carry out automated studies of the DCV, a program was used that allows you to work with DLL [4]. At the same time, the program itself is not tied to a specific mathematical model and can be used to study a wide range of technical devices. Changing the application purpose of the program is done by replacing the dynamic library file (mathematical model).

The algorithm of the program for the research is described in detail in [4]. This control program, being a universal one, allows to carry out a wide range of automated studies of DCV in accordance with the mathematical model implemented in the DLL. When studying converters in the time domain, as well as the influence of the value of the accumulation coefficient – f_a , the transformation ratio – n_{21} and other parameters on the quality indicators and energy parameters of the DCV of the modular structure of construction, several directions can be distinguished:

1) Investigation of the influence of these parameters on the quality indicators of the DCV at a constant load power, when the load power $P_{out}=\text{const}$, and the consumption and load current of the k -th power channel is N times less than the total current of the DCV $P_{out}=I_{out}U_{out}$, $P_{outk}=P_{out}/N = (U_{out}I_{outk}/N)U_{out}$, $I_{outk}=I_{out}/N$. Such a construction of converters allows you to build converters from low-power (low-current) and, accordingly, cheaper element base with better dynamic characteristics. Here, the output voltage and load current of the converter are taken as the initial data, and the load resistance will be determined as $R_{out} = U_{out}/I_{out}$, and in the k -th power channel it will be $R_{outk} = U_{out}/I_{outk}$ or $R_{outk} = R_{out} \cdot N$.

2) Investigation of the influence of the above parameters on the quality indicators of the DCV with a constant power $P_{outk}=\text{const}$ of the k -th power channel. Then the load power will increase with an increase in the number of power channels $P_{out}=NP_{outk} = (I_{outk}U_{out})N$. Such a construction of converters allows unifying the converter modules and increasing its power by connecting additional modules. Here, as the initial data, the voltage U_{out} and the current I_{outk} of the load of the k -th power channel are taken, and the load resistance of the k -th power channel will be determined, as shown in Table 1, and in the DCV it will be $R_{out} = R_{outk} \cdot N$.

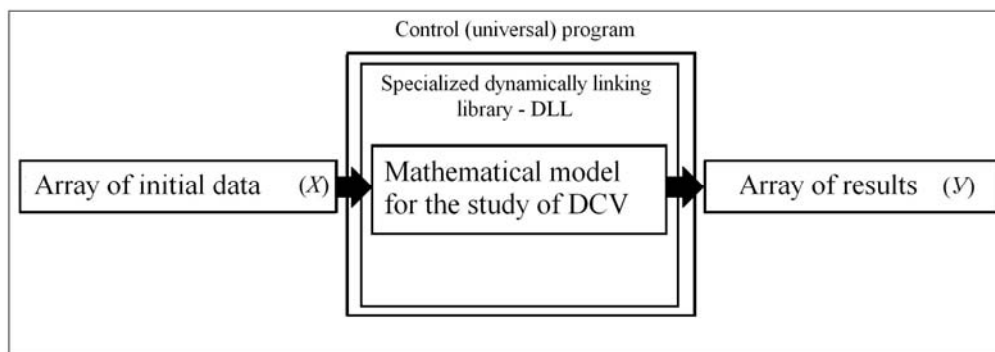


Figure 4 – The structure of an automated study using a specialized program and DLL

For both single-phase and multiphase converters at the boundary mode of operation [5, 6], the regulation (stabilization) of the output parameters occurs by changing the frequency and duration of the control pulses, which compensate for the change in the parameters of the input voltage and load resistance. But at the same time, the frequency in individual power channels remains the same.

When researching converters of a modular structure (when the number N of power channels is increased, connecting them in parallel to each other, their equivalent inductance changes, and therefore the conversion frequency f_b , therefore the results obtained in this way are incorrect. conversion f_b it is necessary to ensure a constant value of the equivalent inductance of the choke.

When the power channels are connected in parallel to the total load, the resistance R_{out} (current I_{out}) of the load will be evenly distributed between the k -th power channels at a constant load power, when the load power $P_{out} = \text{const}$, ($R_{outk} = R_{out}/N$) and, accordingly ($I_{outk} = I_{out}/N$).

The frequency of converting the DCV is determined by the parameters of the inductances of the chokes L_{1k} and the load resistances R_{outk} in separate power channels. However, from [5] it follows that with a change (power P_{out}), resistance R_{outk} , at the same value of the inductance of the choke L_{1k} , the conversion frequency f_a will change accordingly.

So, the increase in the number N of power channels connected in parallel with each other at a constant value of the load power ($P_{out} = \text{const}$) of the converter will not cause a change in the conversion frequency (f_b), since the frequency is proportional to the value $R_{outk}/(2 \cdot L_{1kN})$, where L_{1kN} – the equivalent inductance of the choke

$L_{1kN} = L_{1kNmax} / N$, which is obtained when forming the equivalent circuit of the DCV from, for example, $N_{max} = 8$ the number of power converter modules of the same type containing N equivalent power channels with the same parameters of the elements of the power channels (Fig. 5).

In order to conduct research on converters of modular structure at a constant value of the conversion frequency f_b , it is necessary to change the inductance L_{1k} of the chokes in proportion to the change in the resistance R_{outk} (power P_{outk}) of the load [5].

At the same time, to study converters of modular structure with single-phase and multiphase principles of transformation in the boundary mode of operation, an algorithm (Fig. 9) and a technique for calculating the basic parameters are used [5].

Let us take the following assumptions: with a single-phase conversion principle, the PWC of the converter operate synchronously and in phase, and all chokes, as connected in parallel, can be replaced with an equivalent choke $L1 = L_{1k}/N$. Thus, a single-phase pulse converter of N modules connected in parallel with each other – PWC (Fig. 5a, 6a, 7a) can be considered as one power module (Fig. 5b, 6b, 7b), with an equivalent inductance $L1$ with the corresponding total currents in its circuits.

It should be taken into account that the distribution of the load resistance and inductance of the choke will be carried out in the SPC and MPC differently.

Depending on the direction of research, the inductance of the choke, the load resistance and, accordingly, the currents in the circuits (equivalent – Fig. 5b), 6b), 7b) of the converter will be redistributed in different ways.

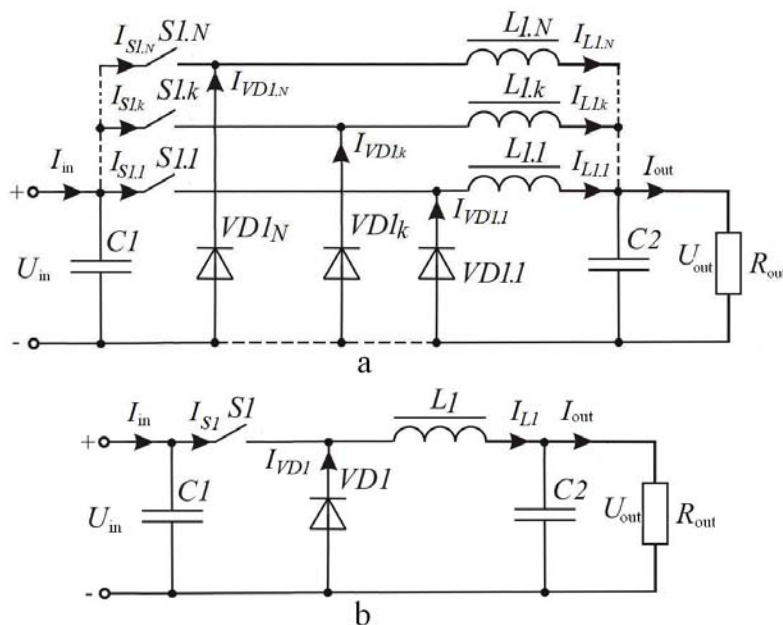


Figure 5 – Converter of modular structure of N parallel-connected PWC (a), and its equivalent circuit (b) with $n_{21} = 1$

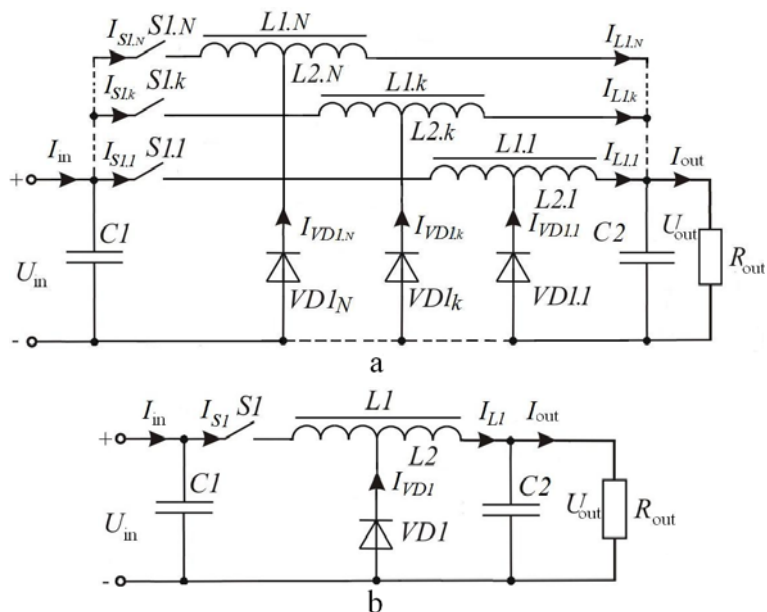


Figure 6 – Converter of modular structure of N parallel-connected PWC (a), and its equivalent circuit (b) with $n_{21} < 1$

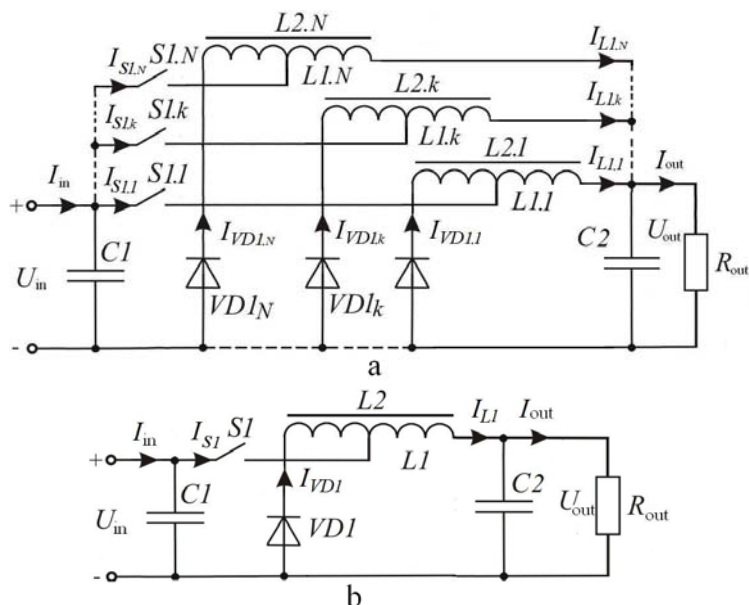


Figure 7 – Converter of modular structure of N parallel-connected PWC (a), and its equivalent circuit (b) with $n_{21} > 1$

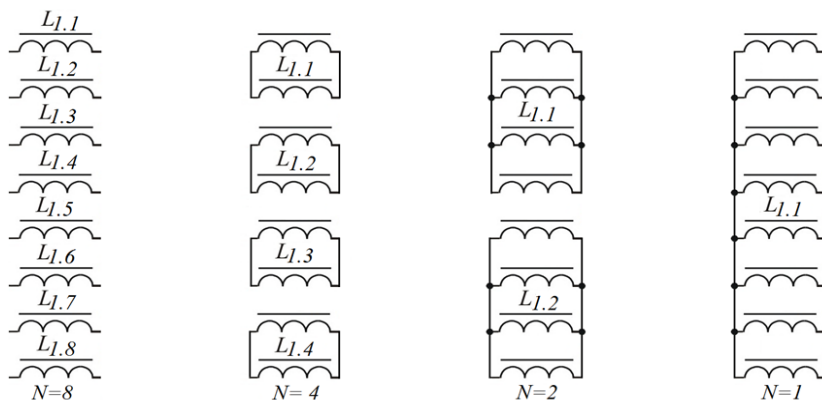


Figure 8 – Equivalent inductances $L_{1,kN}$ obtained with a different number N of power channels connected in parallel to each other on the basis ($N_{max} = 8$) of eight PWC

In this case, it should also be taken into account that if the research is carried out at a constant value of the load power $P_{out} = \text{const}$, regardless of other conditions, then with an increase in the number N of parallel-connected power channels, the value of the total currents in the consumption circuit I_{in} and load I_{out} , as well as their average values will not change. And the currents in the circuits of a separate k -th power channel will be N times less than the value of the indicated total currents of the DCV.

In this case, the inductance of the choke will be distributed to N power channels $L1=L1_k/N$. For example, in a single-phase converter of a modular structure of 8 parallel-connected PWC with inductance of chokes in separate power channels $L1_k = 100 \mu\text{H}$, the equivalent choke $L1$ will have inductance $L1 = 100/8 = 12.5 \mu\text{H}$.

When forming, for example, $N_{max} = 8$, the number of power converter modules of the same type containing N equivalent power channels with the same parameters of elements, their equivalent circuits can be considered as a converter with N equivalent chokes $L1_{kN} = L1_k/N_{max} / N$ and resistances $R_{outkN} = R_{outkN_{max}} / N$ k -x equivalent PWC.

If we replace the chokes $L1.1, L1.2, \dots, L1_k, \dots, L1_N$ of the converter of N power channels with equivalent $L1_{kN}$, for example, for $N_{max} = 8$, it can be seen that it is possible by combining them to form a converter with the number of N equivalent power channels ($1 \leq N \leq 8$) – 8-channel, 4-channel, 2-channel and SPC of 8 PWC. This approach is illustrated in Figure 8, where it is shown how, on the basis of the DCV of 8 PWC $N_{max} = 8$, an equivalent DCV is formed with parallel connection of the chokes, while ensuring the constancy of the conversion frequency f_b .

Table 1 shows how the equivalent resistances R_{thkN} and inductances $L1_{kN}$ will be determined when forming N channel converters of eight ($N_{max} = 8$) identical k -th PWC.

Table 1 – Equivalent resistances and inductances of the SPC at $N_{max} = 8$

N	1	2	4	8
R_{outkN}	$R_{outk}/8$	$R_{outk}/4$	$R_{outk}/2$	R_{outk}
$L1_{kN}$	$L1_k/8$	$L1_k/4$	$L1_k/2$	$L1_k$

Carrying out research for SPC and MPC in different modes of operation with a different number of N PWC, provided that ($P_{out}=\text{const}, I_{out}=\text{const}, R_{out}=\text{const}$) and in order to ensure the constancy of the conversion frequency, the calculations must be carried out as follows:

The initial data in this case will be the parameters of the DCV – the output voltage U_{out} , the load current I_{out} , the number N PWC and the inductance of the choke $L1$.

Calculation results:

- DCV output power – $P_{out} = I_{out} \cdot U_{out}$;
- Load resistance DCV – $R_{out} = U_{out} / I_{out}$;
- Output power of the k -th PWC – $P_{outk} = P_{out} / N$;
- Load resistance of the k -th PWC – $R_{outk} = (P_{out} \cdot N) / N_{max}$;
- Load current of the k -th PWC – $I_{outk} = U_{out} / R_{outk}$;

The inductance of the choke of the k -th PWC $L1_k = (L1 \cdot N) / N_{max}$, where N_{max} is the (basic) maximum number of PWC from which the DCV is formed. For example, as shown in Figure 8, $N_{max} = 8$.

Further in Table 2, the main (basic) parameters of inductance, resistance, power and current of the k -th power channel corresponding to the indicated type of research are given, with $P_{out}=\text{const}$.

Table 2 – Main (basic) parameters of DCV at $P_{out} = \text{const}$

$P_{out} = \text{const}$	N	$L1_k$	R_{outk}	P_{outk}	I_{outk}
$I_{out} = \text{const}$	8	$L1$	R_{out}	$P_{out}/8$	$I_{out}/8$
$R_{out} = \text{const}$	4	$L1/2$	$R_{out}/2$	$P_{out}/4$	$I_{out}/4$
$f_b = \text{const}$	2	$L1/4$	$R_{out}/4$	$P_{out}/2$	$I_{out}/2$
	1	$L1/8$	$R_{out}/8$	P_{out}	I_{out}

When conducting a study of the dependences of quality indicators on the parameters of the elements of the power channels in various modes of operation with a different number N of PWC, provided that ($P_{outk}=\text{const}, I_{outk}=\text{const}, R_{outk}=\text{const}$) with the same constant frequency as in the previous case conversion f_b , calculations must be carried out in accordance with Table 3.

The initial data in this case will be the output voltage U_{out} , the load current I_{outk} of the k -th PWC, the number N of power channels and the inductance of the choke $L1$.

Calculation results:

- Output power of the k -th PWC – $P_{outk} = U_{out} \cdot I_{outk}$;
- DCV output power – $P_{out} = P_{outk} \cdot N$;
- Load current DCV – $I_{out} = I_{outk} \cdot N$;
- Load resistance of the k -th PWC – $R_{outk} = U_{out} / I_{outk}$;
- Load resistance DCV – $R_{out} = U_{out} / I_{out}$;
- The inductance of the k -th PWC choke $L1_k = L1$.

Taking into account the foregoing, the following algorithm for analyzing the electrical processes of the DCV with increasing N number of power channels with a constant power of the k -th PWC $P_{outk} = \text{const}$ (proportional increase in the output power of the DCV and at a constant load power $P_{out} = \text{const}$ (implementation of the DCV from a larger number N of power channels of lower power). Thus, the equivalent inductance $L1_{kN}$ and the resistance R_{outkN} of the k -th power channels will be determined differently (Tables 2, 3).

Table 3 – Main (basic) parameters of DCV at $P_{outk} = \text{const}$

$P_{outk} = \text{const}$	N	R_{out}	P_{out}	I_{out}
$I_{outk} = \text{const}$	8	$R_{out}/8$	$8P_{out}$	$8I_{outk}$
$R_{outk} = \text{const}$	4	$R_{out}/4$	$4P_{out}$	$4I_{outk}$
$f_b = \text{const}$	2	$R_{out}/2$	$2P_{out}$	$2I_{outk}$
$L1_k = \text{const}$	1	R_{out}	P_{out}	I_{outk}

To obtain correct results, it is necessary to take into account the indicated features of calculating the parameters of the DCV when studying the electrical processes of the converter, both in the time domain and the dependences on the accumulation coefficients (f_a), transformation (n_{21}), the value of the relative supply voltage (\bar{U}_{in}), the number N of power channels and value of output power (P_{out}) of the DCV.

For all the specified studies of the DCV, the basic parameters $U_{in}, T, f_b, L2_k, R_{outk}, R_{out}, I_{in}, P_{in}, P_{out}, I_{m1}, I_{m2}$ necessary for carrying out the necessary studies will be calculated in the SR, the conditional name of which is “Basic parameters” The initial data in the SP for calculations will use the parameters presented in Table 4.

Table 4 – Initial data for calculating electrical processes

№	Designation	Name
1	U_{out}	Output voltage (load)
2	I_{out}	Output current (load) DCV
3	I_{outk}	Output current (load of the k -th PWC)
4	N	The number of power channels DCV
5	f_b	Accumulation factor
6	$L1$	Primary winding inductance of the choke $W1$
7	n_{21}	Transformation coefficient
8	N_{max}	Maximum number of power channels DCV
9	C_{in}	Capacitance of the input filter capacitor
10	C_{out}	Capacitance of the output filter capacitor
11	\bar{U}_{in}	Relative supply voltage
12	R_r	Operating mode – stabilization (tracking)
13	R_p	Conversion mode – SPC (MPC)
14	$P_{outmode}$	Type of calculation: $P_{out}=\text{const}$, ($P_{outk}=\text{const}$)

The main basic parameters of the k -th power channel PWC (coefficients of accumulation f_{ak} and return f_{rk} , power supply voltage U_{ink} , load resistance R_{outk} , conversion frequency $f_{bk}=1/T_{bk}$, accumulation time t_{ak} and return time t_{rk} of energy by a power choke, current ripple ranges I_{m1k} , I_{m2k} of the choke, average values of current consumption I_{ink} and load I_{outk} , out power P_{outk}) are presented in Table 5.

In the case under consideration, with the symmetry of the electrical processes and the identity of the parameters of the elements in the k -th PWC DCV $U_{ink}=U_{in}$, $U_{outk}=U_{out}$, $f_{bk}=f_b$, $T_{bk}=T_b=1/f_b$, $f_{ak}=f_a$, $f_{rk}=f_r$, $W_{1k}=W_1$, $W_{2k}=W_2$, $t_{ak}=t_a$, $t_{rk}=t_r$, $I_{ink}=I_{in}/N$, $I_{outk}=I_{out}/N$, $I_{m1k}=I_{m1}$, $I_{m2k}=I_{m2}$.

In this case, the indicated intermediate (basic parameters) will be preliminarily calculated, which are the initial data for subsequent calculations and studies using the ratios that are presented in Table 5.

Table 5 – Basic parameters of electrical processes of k -th PWC

№	Designation	Name
1	R_{outk}	Load resistance k -th PWC
2	P_{outk}	Load power k -th PWC
3	f_{ak}	Accumulation factor k -th PWC
4	f_{rk}	Return factor k -th PWC
5	U_{ink}	Input voltage (power supply) k -th PWC
6	f_{bk}	The boundary value of the conversion frequency
7	T_k	Conversion period
8	I_{m1k}	choke current ripple on accumulation interval
9	I_{m2k}	Choke current ripple on return interval
10	I_{ink}	Average current consumption k -th PWC
11	\bar{U}_{ink}	Relative supply voltage k -th PWC
12	\bar{U}_{outk}	Relative load voltage k -th PWC
13	I_{outk}	Load current k -th PWC
14	$L1_k$	Inductance of winding $W1$ of the inductor k -th PWC
15	$L2_k$	Inductance of winding $W2$ of the inductor k -th PWC

Using a mathematical model [2, 3] and algorithms (Fig. 3, 9), software has been developed for the automated study of DC voltage converters [6, 7].

5 RESULTS

Using the specified software, the dependences of the energy parameters were obtained (Fig. 10 – Fig. 12). The dependences of the relative effective values of the currents of the switch $S1_k$ and the diode $VD1_k$ are shown in Fig. 10. The first study (Fig. 10 a) was carried out at a

fixed load voltage and a variable input voltage (the input voltage was set in such a way that at a given accumulation factor f_a the output voltage remained constant. The second study was carried out at a fixed ratio of input and output voltages \bar{U}_{in} of the converter (Fig. 10 b).

The analysis of the conducted studies shows that the influence of the transformation ratio of the choke on the relative effective values of the currents of the keys $S1_k$ (I_{cS1k}/I_{outk}) and $VD1_k$ (I_{cVD1k}/I_{outk}) (where I_{outk} is the load current of the power channel) is quantitatively and qualitatively the same as for a fixed power of the power $P_{outk}=\text{const}$ (when the power of the converter is proportional to the number of power channels $P_{out}=NP_{outk}$), and for a fixed power of the converter $P_{out}=\text{const}$ (when the power of PWC is inversely proportional to the number of power channels $P_{outk}=P_{out}/N$).

From the graphs (Fig. 10) it can be seen that by choosing the transformation ratio of the choke, it is possible to increase or decrease the relative currents of the power switching elements. In this case, the degree of influence of the transformation ratio of the choke depends both on the value of the accumulation coefficient and on the value of the relative supply voltage.

With the accumulation coefficient $f_a = 0.5$ and the transformation ratio of the choke $n_{21} = 1$, the relative effective current of the key $S1_k$ is equal to the relative effective current of the diode $VD1_k$ (Fig. 10 a). This is due to the equality of both the relative durations of the open state of these power switching elements ($f_a = f_r$) and the range of their pulsations ($I_{m1} = I_{m2}$) (Fig. 11 a). This feature of the operation of the power section of the converters is useful in practice, since it allows the use of power elements $S1_k$ and $VD1_k$ with the same installed power or, in the case when a transistor is used instead of the diode $VD1_k$, the same elements. The operation of the converter at a different value of kn leads to a redistribution of the effective values of the currents of the power switching elements. With an increase in f_a , the relative effective current of the transistor $S1_k$ increases, the diode $VD1_k$ decreases (Fig. 10 a). A decrease in kn leads to the opposite phenomenon: a decrease in the relative effective current of the transistor $S1k$ and an increase in the relative effective current of the diode $VD1_k$.

Choosing the transformation ratio of the choke allows you to align the relative effective values of the currents of the power switching elements. So, for example, with the accumulation coefficient $f_a = 0.2$, the equality of the relative effective values of the currents $I_{cS1k} = I_{cVD1k}$ occurs when using a choke with a transformation ratio $n_{21} = 2$, and for $f_a = 0.8$ – at $n_{21} = 0.5$ (Fig. 6, but). The diagrams of the choke currents for this case are illustrated in the figure in 11, b, c.

The dependence of the relative operating currents of the switches $S1_k$ and $VD1_k$ on the value of the transformation ratio n_{21} at various values of the relative supply voltage \bar{U}_{in} is shown in Fig. 12.

It can be seen from the graphs that an increase in the transformation ratio n_{21} leads to an increase in the relative effective current of the switch $S1_k$, and a decrease in the

relative current of the diode $VD1_k$ at any values of the relative supply voltage \bar{U}_{in} .

However, the degree of influence of the transformation ratio of the choke on the values of the relative effective currents of the power elements is different. Thus, in

the range $1 < n_{21} < 5$, the relative effective value of the diode current decreases by 0.75 times, while the relative effective value of the current increases by 1.5 times (Fig. 12).

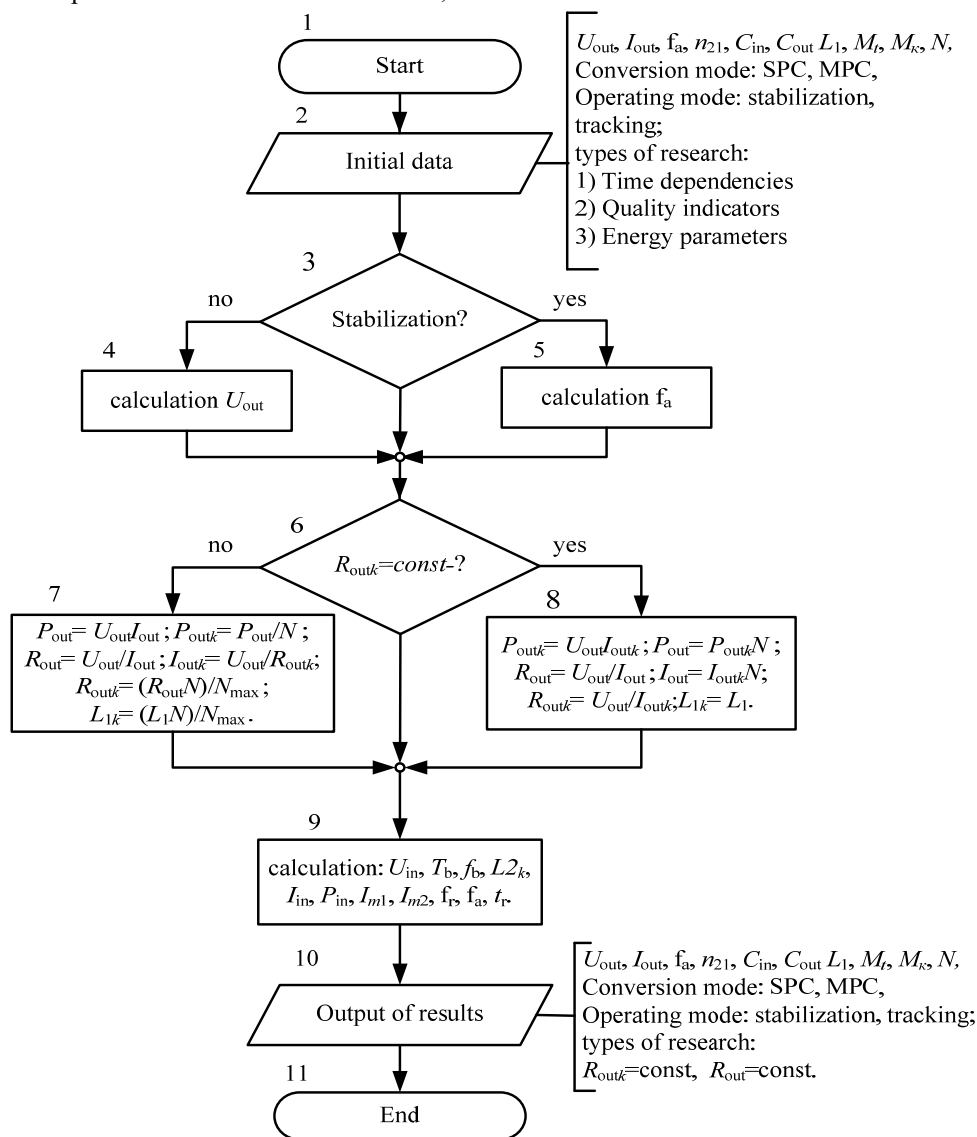


Figure 9 – Algorithm for calculating basic parameters

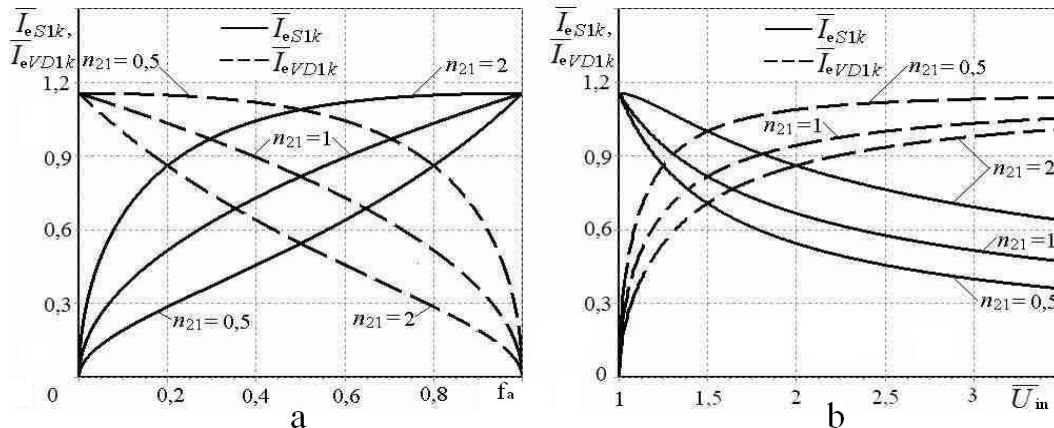


Figure 10 – Dependences of the effective currents value of switches $S1_k$ and $VD1_k$ on f_a (a), and on \bar{U}_{in} (b) for different values n_{21}

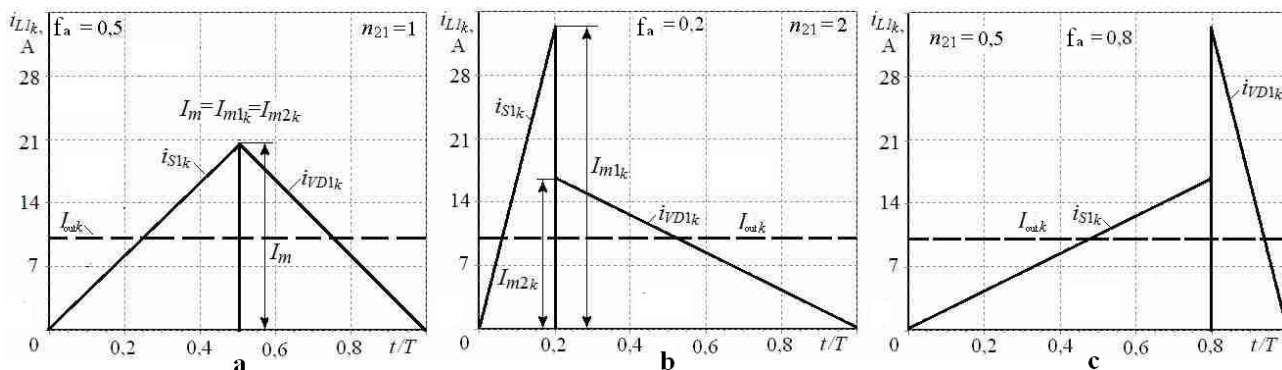
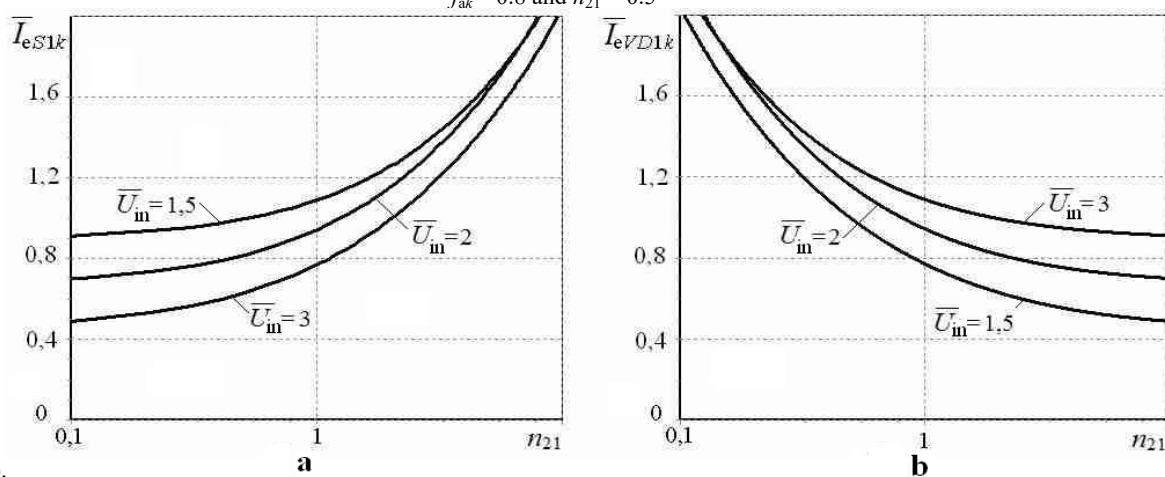


Figure 11 – Timing diagrams of choke currents of the PWC $i_{outk}(t)$ at, $U_{out} = const$, $f_{ak} = 0.5$ and $n_{21} = 1$ (a), $f_{ak} = 0.2$ and $n_{21} = 2$ (b), $f_{ak} = 0.8$ and $n_{21} = 0.5$



(c). Figure 12 – Dependence of the effective value of the currents of the keys $S1_k$ (a) and $VD1_k$ (b), on n_{21} at different values of the relative supply voltage \bar{U}_{in}

6 DISCUSSION

Thus, to equalize the effective values of the currents in the power switching elements in the tracking mode with the accumulation ratio $f_a < 0.5$, it is necessary to use a choke with a transformation ratio $n_{21} < 1$, with an accumulation ratio $f_a > 0.5$, it is necessary to use an inductor with a transformation ratio $n_{21} > 1$. In the stabilization mode, to equalize the effective value of the current between the power switching elements with a supply voltage to load ratio $\bar{U}_{in} > 2$, it is necessary to use a choke with a transformation ratio $n_{21} > 1$, with $\bar{U}_{in} < 2$, the transformation ratio of the choke should be less than one $n_{21} < 1$. It should also be noted, that when the effective values of the currents in the power switching elements are equal, the relative effective value of the current in them is 50% of the load current ($\bar{I}_{eS1k} = \bar{I}_{eVD1k} = 0.5$).

CONCLUSIONS

Based on the results of this article, the following conclusions can be drawn:

The paper discusses the main methods of automated research and design of radio engineering devices that can be used to analyze the electrical processes of pulsed DC voltage converters of a modular structure.

The main tasks to be solved by the developed software are formulated; the basic requirements for the software for

the study of pulsed DCV are given; with the help of the information model of the software complex, the connection of the research tasks to be solved with individual software modules is shown.

Algorithms of calculations are given, the analysis of research results obtained using the proposed method is given.

The scientific novelty of obtained results is that the algorithms and software modules have been firstly developed that constitute the computational basis for the analysis and study of electrical processes and energy parameters of converters of modular structure.

The practical significance of obtained results is that the developed calculation algorithms and software can be used to solve the problems of analysis and research of DCV, which have increased functional capabilities in comparison with the existing CAD systems of radio engineering devices.

Prospects for further research – the proposed approach is the basis for solving the problems of research and design of DCV of modular structure, plays an important role in identifying the features of functioning, choosing the optimal modes of its functioning and the option of circuit design.

REFERENCES

1. Mikhailenko V. S., Kharchenko R. Yu. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. DOI 10.3103/S0146411614060066
2. Kadatskyi A. F., Rusu A. P. Analysis of conversion power of switched-mode buck converters with two power sources, *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*, 2019, No. 2, pp. 52–60. DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-2-52-60
3. Andreev A., Kochetkov A., Kupratsevich A. Increasing of order astatism in amplifiers of D class with combined control, *Proceedings of the International conference TSET2006 : 28 Feb.– 4 March 2006, proceedings*. Lviv, Ukraine, IEEE, 2006, pp. 534–534. DOI 10.1109 / TCSET. 2006. 4404619
4. Kochetkov A. V., Gaur T. A., Mashin V. N. The enterprise information security risk assessment system based on fuzzy logic, *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*, 2019, No. 1, pp. 91–104. DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-1-97-104
5. Kharchenko R. Yu., Kochetkov O. V. Efficiency increasing of the ergatic control systems on ships, *Trends in the development of modern scientific thought : The Xth International scientific and practical conference, Vancouver, 23–26 November 2020, proceedings*. Canada, 2020, pp. 682–685. DOI 10.46299/ISG.2020.II.X
6. Mikhailenko V. S., Kharchenko R. Yu., Shcherbinin V. A. Analysis of the Predicting Neural Network Person Recognition System by Picture Image, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2020, Vol. 54, No. 3, pp. 249–258. DOI 10.3103/S0146411620030037
7. Mikhailov S. A., Kharchenko R. Yu. Intelligent climate management in vessels, *Ships' electrical engineering, electronics and automation, Materials of the 10th international scientific and practical conference Odessa, 24.11.2020 – 25.11.2020, proceedings*. Ukraine, NU «OMA»: 2020, pp. 217–219. DOI 10.31653/2706-7874. SSEEA-2020.11.1-245
8. Kharchenko R. Yu. Modern possibilities of intelligent climate control for enclosed spaces, *About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them : The VIth International scientific and practical conference, Milan, 26–30 October 2020, Library of Congress Cataloging-in-Publication Data*. Italy, 2020, pp. 487–490. DOI 10.46299/ISG.2020.II.VI
9. Kharchenko R. Yu., Kochetkov O. V. Energy parameters of DC voltage converters of the modular structure at the boundary mode of operation, *Using the latest technologies : Abstracts of III-rd International Scientific and Practical Conference, Groningen, 26–27 February 2021, European Conference*. Netherlands, 2021, pp. 86–89. URL: <https://eu-conf.com>.

Received 21.07.2021.

Accepted 18.08.2022.

УДК 621.362.2

АНАЛІЗ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПОСТІЙНОЇ НАПРУГИ МОДУЛЬНОЇ СТРУКТУРИ

Харченко Р. Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедри морського радіозв'язку, Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Кочетков О. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики, Одеський національний морський університет, Одеса, Україна.

Михайленко В. С. – канд. техн. наук, доцент кафедри електрообладнання та автоматики судів, Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Перетворювачі постійної напруги (ППН) входять до складу сучасних систем електроживлення (СЕЖ) та електропостачання, забезпечуючи роботу електронних та радіотехнічних пристроїв, телекомунікаційних систем та апаратури зв'язку, значною мірою визначаючи їх енергоспоживання, надійність, час готовності до роботи, масо-габаритні та вартісні показники. Незважаючи на те, що в інженерній практиці використовується велика кількість різних пакетів програм для дослідження та проектування радіотехнічних пристроїв, такі системи автоматизованого проектування (САПР) та віртуального комп'ютерного моделювання електронних схем мають деякі обмеження, що не дозволяють швидко провести весь комплекс досліджень ППН, необхідний для аналізу електричних процесів за різних режимів роботи апаратури.

Ціль. В даному розділі метою є вибір найбільш підходящих методів та алгоритмів, що дозволять розробити програмне забезпечення, необхідне для вирішення завдань дослідження та аналізу електричних процесів та енергетичних параметрів ППН модульної структури в окремо взятому силовому каналі (СК).

Метод. В роботі запропонований метод, який полягає у використанні математичних моделей, що описують електричні процеси в перетворювачах постійної напруги і створенні на базі розроблених алгоритмів розрахунку, спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизованого дослідження електричних процесів в ППН модульної структури за допомогою ЕОМ.

Результати. В роботі розглянуті основні методи автоматизованого дослідження радіотехнічних пристроїв, які можна використовувати для аналізу електричних процесів імпульсних перетворювачів постійної напруги модульної структури. Наведено алгоритми розрахунку і, як приклад, деякі результати автоматизованого дослідження, отримані при використанні даного методу.

Висновки. Проведено аналіз відомих методів автоматизованого дослідження перетворювачів постійної напруги модульної структури. Наведено їх переваги та недоліки. Показано, що найбільш підходящим є метод, заснований на використанні математичних моделей, що описують електричні процеси в перетворювачах постійної напруги даного типу. На основі наведених у другому розділі роботи математичних моделей, були розроблені алгоритми і спеціалізоване програмне забезпечення, які дозволяють широко їх використовувати при автоматизованому дослідженні і проектуванні перетворювачів постійної напруги модульної структури.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: модульні перетворювачі напруги, силовий канал, режими роботи перетворювача, алгоритм дослідження електричних процесів.

© Kharchenko R. Yu., Kochetkov A. V., Mikhailenko V. S., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-1

УДК 621.362.2

АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ

Харченко Р. Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедры морской радиосвязи, Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, Украина.

Кочетков А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики, Одесский национальный морской университет, Одесса, Украина.

Михайленко В. С. – канд. техн. наук, доцент кафедры электрооборудования и автоматики судов, Национальный университет «Одесская морская академия», Одесса, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Преобразователи постоянного напряжения (ПНН) входят в состав современных систем электропитания (СЭП) и электроснабжения, обеспечивая работу электронных и радиотехнических устройств, телекоммуникационных систем и аппаратуры связи, в значительной степени определяя их энергопотребление, надежность, время готовности к работе, массогабаритные и стоимостные показатели. Несмотря на то, что в инженерной практике используется большое количество различных пакетов программ для исследования и проектирования радиотехнических устройств, такие системы автоматизированного проектирования (САПР) и виртуального компьютерного моделирования электронных схем имеют некоторые ограничения, не позволяющие быстро провести весь комплекс исследований ПНН, необходимый для анализа электрических процессов при различных режимах работы аппаратуры.

Цель. В данном разделе целью является выбор наиболее подходящих методов и алгоритмов, что позволят разработать программное обеспечение, необходимое для решения задач исследования и анализа электрических процессов и энергетических параметров ПНН модульной структуры в отдельно взятом силовом канале (СК).

Метод. В работе предложен метод, который заключается в использовании математических моделей, описывающих электрические процессы в преобразователях постоянного напряжения и создании на базе разработанных алгоритмов расчета, специализированного программного обеспечения для автоматизированного исследования электрических процессов в ПНН модульной структуры при помощи ЭВМ.

Результаты. В работе рассмотрены основные методы автоматизированного исследования радиотехнических устройств, которые можно использовать для анализа электрических процессов импульсных преобразователей постоянного напряжения модульной структуры. Приведены алгоритмы расчета и, в качестве примера, некоторые результаты автоматизированного исследования, полученные при использовании данного метода.

Выводы. Проведен анализ известных методов автоматизированного исследования преобразователей постоянного напряжения модульной структуры. Приведены их преимущества и недостатки. Показано, что наиболее подходящим является метод, основанный на использовании математических моделей, описывающих электрические процессы в преобразователях постоянного напряжения данного типа. На основе приведенных во втором разделе работы математических моделей были разработаны алгоритмы и специализированное программное обеспечение, которые позволяют широко их использовать при автоматизированном исследовании и проектировании преобразователей постоянного напряжения модульной структуры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: модульные преобразователи напряжения, силовой канал, режимы работы преобразователя, алгоритм исследования электрических процессов.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Mikhailenko V. S. Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2014. – Vol. 48, No. 6. – P. 334–344. DOI 10.3103/S0146411614060066
2. Kadatskiy A. F. Analysis of conversion power of switched-mode buck converters with two power sources / A. F. Kadatskiy, A. P. Rusu // *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*. – 2019. – No. 2. – P. 52–60. DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-2-52-60
3. Andreev A. Increasing of order astatism in amplifiers of D class with combined control / A. Andreev, A. Kochetkov, A. Kupratsevich // *Proceedings of the International conference TSET2006* : 28 Feb.– 4 March 2006 : proceedings. – Lviv, Ukraine: IEEE, 2006. – P. 534–534. DOI: 10.1109/TCSET.2006.4404619
4. Kochetkov A. V. The enterprise information security risk assessment system based on fuzzy logic / A.V. Kochetkov, T. A. Gaur, V. N. Mashin // *Proceedings of the O. S. Popov ONAT*. – 2019. – No. 1. – P. 91–104. DOI 10.33243/2518-7139-2019-1-1-97-104
5. Kharchenko R. Yu. Efficiency increasing of the ergatic control systems on ships / R. Yu. Kharchenko, O. V. Kochetkov // *Trends in the development of modern scientific thought* : The X th International scientific and practical conference, Vancouver, 23–26 November 2020 : proceedings. – Canada, 2020. – P. 682–685. DOI 10.46299/ISG.2020.II.X
6. Mikhailenko V. S. Analysis of the Predicting Neural Network Person Recognition System by Picture Image / V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko, V. A. Shcherbinin // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2020. – Vol. 54, No. 3. – P. 249–258. DOI 10.3103/S0146411620030037
7. Mikhailov S. A. Intelligent climate management in vessels / S. A. Mikhailov, R. Yu. Kharchenko // *Ships' electrical engineering, electronics and automation : Materials of the 10th international scientific and practical conference Odessa, 24.11.2020 – 25.11.2020* : proceedings. – Ukraine, NU «OMA»: 2020. – P. 217–219. DOI:10.31653/2706-7874. SSEEA-2020.11.1-245
8. Kharchenko R. Yu. Modern possibilities of intelligent climate control for enclosed spaces / R. Yu. Kharchenko // *About the problems of science and practice, tasks and ways to solve them* : The VI th International scientific and practical conference, Milan, 26–30 October 2020: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. – Italy, 2020. – P. 487–490. DOI 10.46299/ISG.2020.II.VI
9. Kharchenko R.Yu. Energy parameters of DC voltage converters of the modular structure at the boundary mode of operation / R. Yu. Kharchenko, O. V. Kochetkov // *Using the latest technologies* : Abstracts of III-rd International Scientific and Practical Conference, Groningen, 26–27 February 2021: European Conference. – Netherlands, 2021. – P. 86–89. URL: <https://eu-conf.com>.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 519.242.5:620.179.147

ОДНОРІДНІ ПЛАНИ БАГАТОФАКТОРНИХ ЕКСПЕРИМЕНТІВ НА КВАЗИВИПАДКОВИХ R-ПОСЛІДОВНОСТЯХ РОБЕРТСА ДЛЯ СУРОГАТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У ВИХРОСТРУМОВІЙ СТРУКТУРОСКОПІЇ

Гальченко В. Я. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна.

Кошовий М. Д. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інтелектуальних вимірвальних систем та інженерії якості, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

Трембовецька Р. В. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Робота присвячена питанням створення багатофакторних планів експериментів на основі квазивипадкових рекурсивних R-последовательностей Робертса. Об'єктом досліджень є процес створення комп'ютерних однорідних планів експериментів. Мета статті полягає в створенні багатофакторних, а саме шести- та семи- факторних, однорідних планів експериментів з низькими показниками розбіжностей, дослідження їх проєкційних властивостей та демонстрації їх використання на прикладі сурогатного моделювання у вихрострумівій структуроскопії.

Метод. Для побудови багатовимірних планів експериментів застосовано ітеративний метод рівномірного заповнення одиничного гіперкубу опорними точками, що забезпечує прийнятні показники гомогенності та який реалізовано на основі квазивипадкових безпараметричних адитивних рекурсивних R-последовательностей Робертса з використанням ірраціональних чисел, які, в свою чергу, отримані на основі узагальненої послідовності Фібоначчі. Критерієм досконалості планів є оцінка гомогенності за показниками розбіжностей, інваріантних відносно обертання координат та перемаркування й упорядкування факторів та які кількісно характеризують відхилення згенерованого розподілу від ідеального рівномірного.

Результати. Для каталогізації створено шести- та семи-факторні комп'ютерні однорідні плани експериментів, які характеризуються низькими показниками розбіжностей та достатньо високоякісними проєкційними властивостями. Підтверджено, раніше доведена в дослідженнях авторів, тенденція щодо збереження цих характеристик планів експериментів в багатовимірних факторних просторах, яка спостерігається зі збільшенням кількості точок плану. Оцінка якості створених планів експериментів здійснена як візуальним аналізом матриці розсіювання всіх двовимірних проєкцій, так і за кількісними показниками неоднорідності сукупності векторів, які утворюють план, а саме центрованою та циклічною розбіжностями.

На прикладі начального етапу створення сурогатної моделі для розв'язку задачі ідентифікації профілів електрофізичних параметрів у вихрострумівій структуроскопії показано певні особливості застосування створених планів, зокрема перехід масштабування від плану для одиничного гіперкубу до плану в реальному факторному просторі у вигляді гіперпаралелепіпеда, що суттєво не впливає на його характеристики гомогенності розподілу точок.

Висновки. Вперше виконано завдання створення шести- та семи-факторних однорідних планів експериментів з низькими показниками центрованої та циклічної розбіжностей на основі R-последовательностей Робертса. Досліджено проєкційні властивості створених планів експериментів для різної кількості точок. Удосконалено метод побудови багатовимірних комп'ютерних планів експериментів із врахуванням особливостей вихрострумівій структуроскопії. Продемонстровано використання шести-вимірних планів експериментів на прикладі сурогатного моделювання у вихрострумівій структуроскопії. Результати дослідження можуть бути використані при побудові сурогатних математичних моделей фізичних процесів будь-якими відомими методами апроксимації.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: комп'ютерний план експерименту, сурогатна модель (метамодель), однорідний розподіл, квазивипадкові послідовності, проєкційні властивості, показники розбіжності.

АБРЕВІАТУРИ

ВСП – вихрострумний перетворювач;
КПЕ – комп’ютерний план експерименту;
ЛП_τ – послідовності Соболя;
ПЕ – план експерименту;
ОК – об’єкт контролю.

НОМЕНКЛАТУРА

a, c, g – параметри апроксимації;
 $CD(D_n)^2$ – центрована розбіжність;
 d – товщина приповерхневого шару ОК;
 E – індукована напруга у вихрострумному перетворювачі;
 f – частота струму збудження;
 f_{\min}, f_{\max} – мінімальна та максимальна частота струму збудження вихрострумного перетворювача;
 N – кількість точок плану експерименту;
 n – кількість умовних шарів розбиття приповерхневого шару;
 R_1, R_2, \dots, R_s – безпараметричні адитивні рекурсивні послідовності Робертса;
 s – розмірність вхідних даних;
 $WD(P)^2$ – циклічна розбіжність;
 X – матриця плану;
 z – висота розташування ВСП над ОК;
 z_{\min}, z_{\max} – мінімальне та максимальне значення висоти розташування вихрострумного перетворювача;
 $\delta T, \%$ – технологічний допуск;
 $\sigma(d)$ – номінальний профіль електричної провідності приповерхневого шару ОК;
 $\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$ – мінімальне та максимальне значення електричної провідності у приповерхневому шарі;
 $\mu(d)$ – номінальний профіль магнітної проникності приповерхневого шару ОК;
 μ_{\min}, μ_{\max} – мінімальне та максимальне значення магнітної проникності у приповерхневому шарі.

ВСТУП

Для дослідження складних нелінійних взаємозв’язків між багаточисельними входами та виходом ресурсномістких комп’ютерних імітаційних моделей фізичних процесів останнім часом досить продуктивно використовуються сурогатні моделі [1]. Сурогатну модель, тобто метамодель, зазвичай створюють на основі ретельно відібраних точок проектного простору, що складають доволі обмежені набори даних, в яких виконують обчислення з інтенсивним використанням процесора та пам’яті, задіяних комп’ютерними імітаційними моделями. Мета сурогатного моделювання полягає в знаходженні функції апроксимації (метамоделі), що дозволяє досліджувати процес, але виконувати це значно швидше. Отже, метамодель виконує функції проксі для комп’ютерної моделі фізичного процесу. Для забезпечення високої точності метамоделі важливою стає задача якісного вибору «навчальних» наборів даних. Якщо апріорна інформація щодо топології поверхні відгуку відсутня, а це для багатофакторних метамоделі майже правило, то доцільно використовувати схему рівномірного розподілу точок, в яких спостерігається відгук, у гі-

перпросторі. Дизайн «заповнення простору» (Space-Filling Design) дозволяє генерувати ефективні «навчальні» набори даних з отриманням максимальної інформації між входами та виходом досліджуваних взаємозв’язків. Якісний план експерименту (ПЕ) характеризується мінімальною кількістю обчислень з запусками ресурсної комп’ютерної моделі фізичного процесу. Крім того, ефективні плани у наслідку правильно зібраних даних дозволяють отримати достовірні результати, що в решті решт визначає важливість та актуальність їх створення та каталогізації.

Об’єкт дослідження – процес створення комп’ютерних однорідних планів експериментів.

Предмет дослідження – плани багатофакторних експериментів на основі квазівипадкових рекурсивних R -послідовностей.

Мета роботи – створення багатофакторних, а саме шести- та семи-факторних, однорідних планів експериментів з низькими показниками розбіжностей, дослідження їх проекційних властивостей та демонстрація їх використання на прикладі сурогатного моделювання у вихрострумній структуроскопії.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

План експерименту, який характеризується N зразками (samples) та s вхідними змінними, складається із N комбінацій векторів x_1, \dots, x_N , де $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{is})$, $i = 1, \dots, N$. Вони збираються у матрицю плану X розміром $N \times s$. Створення плану однорідного комп’ютерного експерименту полягає у виборі вхідних комбінацій x_1, \dots, x_N , які забезпечують гомогенне заповнення вхідного простору у вигляді одиничного (unit) гіперкубу при виконанні обмежень $0 < x_{ik} < 1$ для $i = 1, \dots, N$; $k = 1, \dots, s$ ($s = 6$ – для шести-факторного ПЕ; $s = 7$ – для семи-факторного ПЕ). В цих дослідженнях як векторні складові планів використано одновимірні безпараметричні адитивні рекурсивні R -послідовності Робертса. Критеріями досконалості планів є оцінки гомогенності за показниками узагальнених розбіжностей, які кількісно характеризують відхилення згенерованого розподілу від ідеального рівномірного.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Серед методів створення однорідних експериментів, які реалізують технологію «заповнення простору» та яким дослідниками останнім часом приділяється особлива увага, існує умовний поділ на реалізуємо однократно (one-shot algorithm) та ітеративні. В планах з однократною реалізацією, до яких відносяться всі їх класичні варіанти [1], а саме дробові плани (fractional designs) як найпростіша форма [2], латинські гіперкуби (Latin hypercubes) [3], ортогональні масиви (orthogonal arrays) [4], MaxPro designs [5, 6] та їх певні модифікації, зокрема Cascading, Nested і Sliced Latin Hypercube Designs [3, 7, 8], досить складною задачею є встановлення раціональної загальної кількості зразків (samples). Важливим результатом створених ПЕ також є їх проекційні властивості [9, 10], які

не завжди є прийнятними. Не дивлячись на таку перевагу цієї технології як суттєва простота реалізації, все ж таки досить важко уникнути ситуації передискретизації (oversampling) або недостатньої дискретизації (undersampling), тобто занадто малої кількості зразків у ПЕ. Але саме така ситуація є найбільш ймовірною на практиці, коли апріорна інформація щодо поведінки гіперповерхні відгуку є відсутньою. З цих причин при використанні однократних методологій при створенні проєктів планів вибір їх розмірів виконується довільним чином та є проблемним.

Ітеративні технології складання ПЕ, що є представниками іншої більш досконалої методології, реалізують їх послідовний дизайн [11, 12]. В його рамках фактично застосовується метод адаптивної вибірки точок експерименту (adaptive sampling method), в яких розміри планів мають можливість змінюватися в результаті додавання нових зразків із збереженням попередньо створених або їх видалення. Цей тип дизайну передбачає використання квазівипадкових послідовностей (Sequential Experimental Design). Найбільш розповсюдженими серед них є послідовності Гальтона (Halton sequences), Соболя (Sobol' sequences), Нодерайтера (Niederreiter sequences), що характеризуються як послідовності із низькими розбіжностями (Low-discrepancy sequences). В [12] надано короткий та досить детальний аналіз ПЕ, побудованих з їх використанням, й зазначено переваги застосування цього дизайну. В той же час в дослідженнях [13] доведено на прикладі використання для побудови комп'ютерних однорідних планів заслужено популярних ЛП_τ-послідовностей Соболя (LP_τ-sequences), що довільний вибір комбінацій послідовностей в них далеко не завжди дозволяє отримати їх варіанти з низькими показниками розбіжностей. Натомість використання з цією метою безпараметричних адитивних рекурсивних R-послідовностей Мартіна Робертса (Martin Roberts) гарантовано забезпечує отримання планів з низькими показниками розбіжностей без проведення додаткових досліджень щодо можливості поєднання їх в один варіант комбінації. В статті надано алгоритм обчислення квазіпослідовностей, зроблено порівняльний аналіз, згенерованих на їх основі планів, з найкращими альтернативними варіантами, побудованими на ЛП_τ-послідовностях Соболя. Приклади практичного використання таких три- та чотири-факторних планів [14] на послідовностях, які не залежать від загальної кількості зразків, довели їх достатньо високі проєкційні властивості, а також досягнення низьких показників розбіжностей.

Отже, є сенс поширення набутого досвіду на створення багатофакторних, а саме шести- та семи- факторних, однорідних комп'ютерних планів експериментів (КПЕ), що побудовані на вказаній методології, для їх подальшої каталогізації та практичного використання.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для побудови багатовимірних КПЕ застосовано метод рівномірного заповнення одиничного гіперкубу опорними точками, що має прийнятні характеристики гомогенності та який реалізовано на основі квазівипадкових безпараметричних адитивних рекурсивних R-послідовностей Робертса з використанням ірраціональних чисел, які в свою чергу отримані на основі узагальненої послідовності Фібоначчі [13].

Використовуючи математичні вирази для рекурсивних R-послідовностей в багатовимірному факторному просторі [13], створено сукупності послідовностей відповідно для шести та семи факторів, чисельні значення яких для $N = 100$ точок, наведено в таблиці 1 та таблиці 2.

Проте для створених КПЕ візуальна оцінка їх гомогенності в шести- та семи-вимірному просторі є неможливою. Тому для більшої наочності згенерованих послідовностей використано графічне їх зображення у вигляді матриці двовимірних проєкцій. Степінь високої гомогенності розподілу багатовимірних КПЕ можна спостерігати при збільшенні кількості точок ПЕ, що проілюстровано графіками для шести-вимірного плану на рис. 1 а, б, а на рис. 1 в, г – для семи- вимірного ПЕ.

Окрім цього, якість створених багатовимірних ПЕ також оцінюється за кількісними показниками неоднорідності сукупності векторів, а саме центрованою та циклічною розбіжностями [13]. Отримані показники центрованої та циклічної розбіжностей для деяких видів ПЕ із різною кількістю точок наведено в табл. 3.

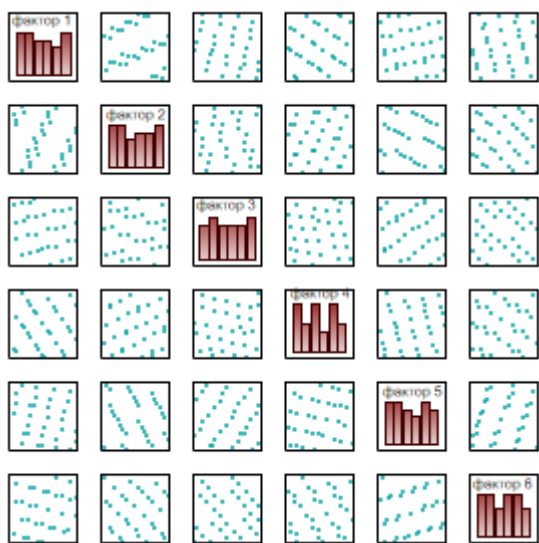
Таблиця 1 – Згенеровані R-послідовності в одиничному гіперкубі для шести-факторного ПЕ

Точки ПЕ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
1	0,399	0,308	0,226	0,152	0,086	0,027
2	0,297	0,115	0,951	0,804	0,672	0,553
3	0,196	0,923	0,677	0,457	0,258	0,08
4	0,095	0,73	0,403	0,109	0,844	0,607
5	0,993	0,538	0,129	0,761	0,43	0,133
6	0,892	0,345	0,854	0,413	0,017	0,66
7	0,791	0,153	0,58	0,065	0,603	0,187
8	0,689	0,961	0,306	0,717	0,189	0,714
9	0,588	0,768	0,032	0,37	0,775	0,24
10	0,487	0,576	0,757	0,022	0,361	0,767
...
30	0,46	0,727	0,272	0,065	0,083	0,301
31	0,358	0,535	0,998	0,718	0,669	0,827
32	0,257	0,343	0,723	0,37	0,255	0,354
...
92	0,176	0,797	0,267	0,501	0,42	0,955
93	0,075	0,605	0,993	0,153	0,00606	0,482
94	0,973	0,412	0,719	0,805	0,592	0,00876
94	0,872	0,22	0,445	0,457	0,178	0,535
96	0,771	0,028	0,17	0,11	0,764	0,062
97	0,669	0,835	0,896	0,762	0,35	0,589
98	0,568	0,643	0,622	0,414	0,936	0,116
99	0,467	0,45	0,348	0,066	0,523	0,642
100	0,365	0,258	0,073	0,718	0,109	0,169

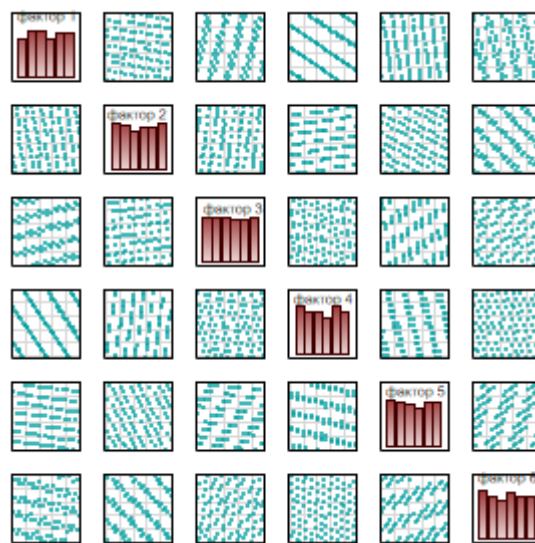
Таблиця 2 – Згенеровані R -послідовності в одиничному гіперкубі для семи- факторного ПЕ

Точки ПЕ	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
1	0,411	0,331	0,257	0,190	0,129	0,073	0,023
2	0,323	0,162	0,015	0,881	0,759	0,647	0,546
3	0,234	0,993	0,772	0,571	0,388	0,221	0,069
4	0,146	0,824	0,530	0,262	0,018	0,795	0,592
5	0,057	0,655	0,287	0,952	0,647	0,369	0,115
6	0,969	0,486	0,045	0,643	0,277	0,943	0,638
7	0,881	0,317	0,802	0,333	0,906	0,517	0,161
8	0,792	0,148	0,560	0,024	0,536	0,090	0,684
9	0,704	0,979	0,317	0,715	0,165	0,664	0,208
10	0,61	0,81	0,075	0,405	0,795	0,238	0,731
...

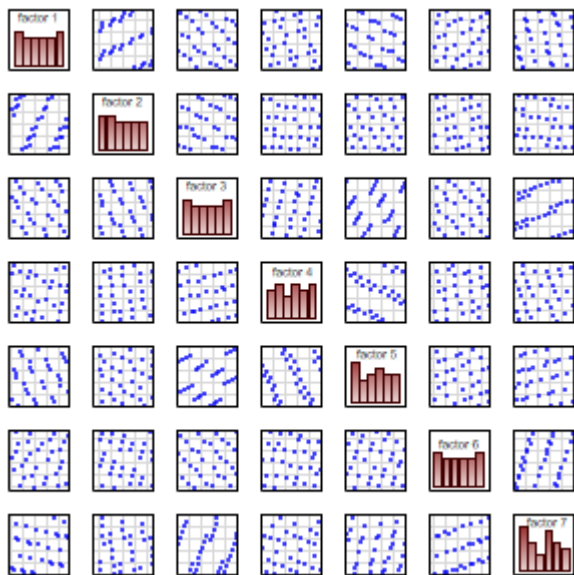
30	0,847	0,430	0,226	0,216	0,385	0,715	0,193
31	0,759	0,261	0,983	0,907	0,014	0,289	0,716
32	0,670	0,092	0,741	0,597	0,644	0,863	0,239
...
92	0,366	0,952	0,193	0,031	0,415	0,294	0,627
93	0,278	0,783	0,950	0,722	0,044	0,868	0,150
94	0,189	0,614	0,708	0,412	0,674	0,442	0,673
94	0,101	0,445	0,465	0,103	0,303	0,016	0,196
96	0,012	0,276	0,223	0,793	0,933	0,590	0,719
97	0,924	0,107	0,980	0,484	0,562	0,164	0,243
98	0,836	0,938	0,738	0,175	0,192	0,738	0,766
99	0,747	0,769	0,495	0,865	0,821	0,311	0,289
100	0,659	0,600	0,253	0,556	0,451	0,885	0,812



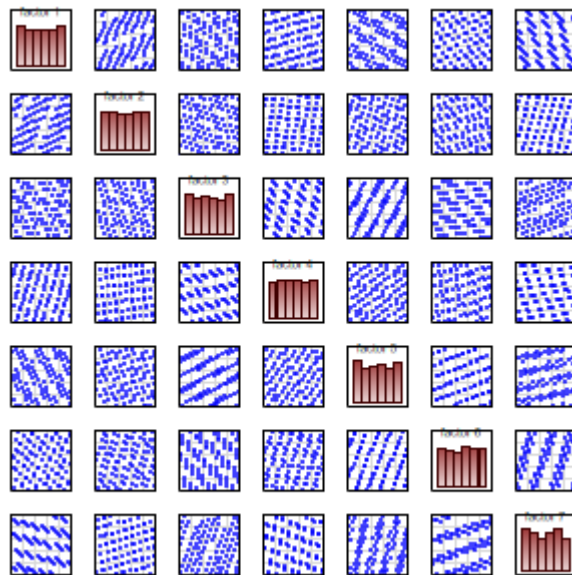
а



б



в



г

Рисунок 1 – Дослідження проєкційних властивостей всіх R -послідовностей попарно: а – шести- факторний ПЕ із кількістю точок $N = 32$; б – шести-факторний ПЕ $N = 100$; в – семи-факторний ПЕ із кількістю точок $N = 32$; г – семи-факторний ПЕ $N = 100$

Таблиця 3 – Показники узагальнених розбіжностей для багатовимірних ПЕ із різною кількістю точок

Кількість точок ПЕ	N = 10		N = 32		N = 100		N = 1000	
	CD(D _n) ²	WD(P) ²	CD(D _n) ²	WD(P) ²	CD(D _n) ²	WD(P) ²	CD(D _n) ²	WD(P) ²
Шести- факторний ПЕ	0,122	11,495	0,021	11,29	0,0053	11,25	0,000501	11,238
Семи- факторний ПЕ	0,199	15,491	0,038	15,08	0,0083	15	0,000564	14,98

Отже, із збільшенням розмірності гіперпростору та кількості точок підтверджується доволі прийнятна гомогенність та проєкційні властивості ПЕ в багатовимірних факторних просторах.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Продемонструємо використання одного із створених ПЕ на прикладі сурогатного моделювання в вихрострумівій структуроскопії.

Вихрострумива структуроскопія передбачає розв’язок оберненої задачі відновлення профілів електрофізичних характеристик ОК за сигналом вимірювального перетворювача, що базується на попередньому розв’язку прямої задачі і для реалізації якої в реальному масштабі часу необхідна високопродуктивна метамодель [14, 15].

При створенні метамоделі на «точну» фізичну модель процесу вимірювання профілів електрофізичних параметрів необхідно максимально врахувати умови проведення та можливі варіанти зміни впливових факторів на сигнал ВСП.

Функція апроксимації процесу вимірювання електрофізичних параметрів ОК у вихрострумівій структуроскопії є багатовимірною $E = f(\sigma(d), \mu(d), z, f, \dots)$, що залежить від низки параметрів, а саме, електропровідності та магнітної проникності, які мають неперервнозмінний профіль розподілу, висоти розташування ВСП z над ОК, частоти f струму збудження та ін.

Проте при вихрострумівій структуроскопії контроль електрофізичних параметрів у ході технологічного процесу виготовлення деталі має певні особливості. Так окрім номінальних профілів електричної провідності $\sigma(d)$ та магнітної проникності $\mu(d)$ можливий їх розкид в межах технологічного допуску $\delta T, \%$. Тобто при побудові багатовимірного ПЕ необхідно враховувати мінімальну і максимальну зміну електрофізичних параметрів профілів в межах цього допуску. В такому випадку кожний із впливових факторів прийматиме екстремальні значення, в межах яких генеруються точки ПЕ. Тоді метамодель, що враховуватиме, наприклад, шість впливових факторів матиме вигляд $E = f(\sigma_{\min}(d), \sigma_{\max}(d), \mu_{\min}(d), \mu_{\max}(d), z, f)$.

Враховуючи особливості, притаманні вихрострумівій структуроскопії, створення багатовимірного КПЕ для будь якої кількості впливових факторів здійснюється у декілька етапів. Перший етап полягає у генеруванні точок експерименту на основі безпараметричних адитивних рекурсивних R -послідовностей в одиничному гіперкубі. Другий етап – перехід розтягненням від одиничного гіперкубу до гіперпаралелепі-

педу реального факторного простору. Третій – розрахунок розподілу електрофізичних параметрів $\sigma(d)$ та $\mu(d)$ за типовим профілем, наприклад, «гаусіан» або «гіперболічний тангенс», які описуються формулами:

– профіль «гаусіан»

$$\begin{aligned} \sigma(d) &= \sigma_{\min} + (\sigma_{\max} - \sigma_{\min}) \cdot \exp(-d^2/g^2), \\ \mu(d) &= \mu_{\min} + (\mu_{\max} - \mu_{\min}) \cdot \exp(-d^2/g^2); \end{aligned} \quad (1)$$

– профіль «гіперболічний тангенс»

$$\begin{aligned} \sigma(d) &= \sigma_{\max} + ((\sigma_{\min} - \sigma_{\max})/2) \cdot (1 + \tanh((d-c)/2a)), \\ \mu(d) &= \mu_{\max} + ((\mu_{\min} - \mu_{\max})/2) \cdot (1 + \tanh((d-c)/2a)). \end{aligned} \quad (2)$$

Продемонструємо запропонований алгоритм на прикладі створення шести- факторного КПЕ, для якого електрофізичні параметри змінюються в межах технологічного допуску $\delta T = \pm 15 \%$. В якості номінального прийнято профіль для електропровідності, мінімальне і максимального значення якого складає $\sigma_{\min} = 2 \cdot 10^5$ См/м, $\sigma_{\max} = 8 \cdot 10^6$ См/м, а для магнітної проникності – $\mu_{\min} = 1$, $\mu_{\max} = 30$ відповідно. Тоді в межах технологічного допуску діапазони зміни електричної провідності будуть $1,7 \cdot 10^5 \leq \sigma_{\min} \leq 2,3 \cdot 10^5$ См/м, $6,8 \cdot 10^6 \leq \sigma_{\max} \leq 9,2 \cdot 10^6$ См/м; магнітної проникності – $0,85 \leq \mu_{\min} \leq 1,15$, $25,5 \leq \mu_{\max} \leq 34,5$. Інші вихідні дані, необхідні для створення ПЕ, наступні: діапазон зміни висоти розташування ВСП над ОК $0,5 \cdot 10^{-3} \leq z \leq 0,5 \cdot 10^{-3}$ м та діапазон частоти струму збудження складає $1 \cdot 10^3 \leq f \leq 10 \cdot 10^3$ Гц.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За згенерованими R -послідовностями (див. табл. 1) здійснено перехід масштабуванням від одиничного гіперкубу до гіперпаралелепіпеду реального факторного простору, числові значення яких наведено в таблиці 5 для кількості точок ПЕ $N = 75$. Така кількість точок обрана для зручності наочної демонстрації гомогенності ПЕ. Необхідно теж зазначити, що такий перехід не суттєво впливає на якість, а саме, гомогенність розподілу точок ПЕ. Деякі двовимірні проєкції такого ПЕ з використанням діаграм Вороного, які дозволяють візуально оцінити проєкційні властивості створеного плану за площею кожного утвореного сегменту, показано на рис. 2.

Таблиця 5 – Числові дані масштабованих R -последовностей для реального шести-факторного простору

Точки ПЕ	$\sigma_{\min} \times 10^5, \text{См/м}$	$\sigma_{\max} \times 10^6, \text{См/м}$	μ_{\min}	μ_{\max}	$z \times 10^{-3}, \text{м}$	$f, \text{Гц}$
1	1,939	7,538	0,918	26,87	0,7152	1240
2	1,878	7,076	1,135	32,74	2,18	5981
3	1,818	9,014	1,053	29,608	1,146	1721
4	1,757	8,553	0,971	26,478	2,611	6461
5	2,296	8,091	0,889	32,348	1,576	2201
6	2,235	7,629	1,106	29,218	0,5413	6941
7	2,174	7,167	1,024	26,088	2,006	2681
8	2,114	9,105	0,942	31,957	0,971	7421
9	2,053	8,644	0,859	28,826	2,437	3162
10	1,992	8,182	1,077	25,696	1,402	7902
...
30	1,976	8,546	0,932	26,089	0,705	3706
31	1,915	8,084	1,149	31,959	2,172	8447
32	1,854	7,622	1,067	28,829	1,137	4186
33	1,793	7,16	0,985	25,698	2,602	8926
34	1,733	9,098	0,902	31,568	1,567	4667
35	2,272	8,636	1,12	28,438	0,532	9407
...
65	2,248	9,182	1,052	33,527	1,989	7613
66	2,187	8,72	0,97	30,397	0,9543	3353
67	2,126	8,259	0,887	27,267	2,42	8094
68	2,065	7,797	1,105	33,136	1,385	3834
69	2,004	7,335	1,023	30,005	2,85	8573
70	1,943	6,873	0,94	26,875	1,815	4314
71	1,883	8,811	0,858	32,745	0,780	9054
72	1,822	8,35	1,076	29,615	2,246	4794
73	1,761	7,888	0,994	26,485	1,211	9535
74	1,7	7,426	0,911	32,353	2,676	5275
75	2,239	6,964	1,129	29,223	1,641	1015

Завершальним етапом формування масиву даних за створеним шести-факторним ПЕ є розрахунок профілів електричної провідності $\sigma(d)$ та магнітної проникності $\mu(d)$ за функціями (1) або (2). Визначимо вихідні дані для цього розрахунку наступними: товщина приповерхневого шару ОК $d = 3$ мм, кількість умовних шарів розбиття приповерхневого шару $n = 30$. Результат обчислення цих розподілів в приповерхневому шарі ОК в деяких точках ПЕ за профілями «гаусіан» та «гіперболічний тангенс» наведено на рис. 3.

Отже, для розглянутого прикладу сформована сукупність «навчальних» даних із врахуванням шести найвпливовіших факторів, яка необхідна для побудови гіперповерхні відгуку $E = f(\sigma(d), \mu(d), z, f)$ при створенні метамоделі.

6 ОБГОВОРЕННЯ

З ростом вимірності факторного простору задачі створення планів експерименту значно ускладнюються. Ця тенденція є справедливою також для однорідних планів, для створення яких використовуються квазівипадкові послідовності. Для успішного створення плану необхідною умовою є адекватний вибір одновимірної квазіпослідовності з низькими розбіжностями, що є ефективною щодо рівномірного розподілу навіть малої кількості точок плану. Крім того,

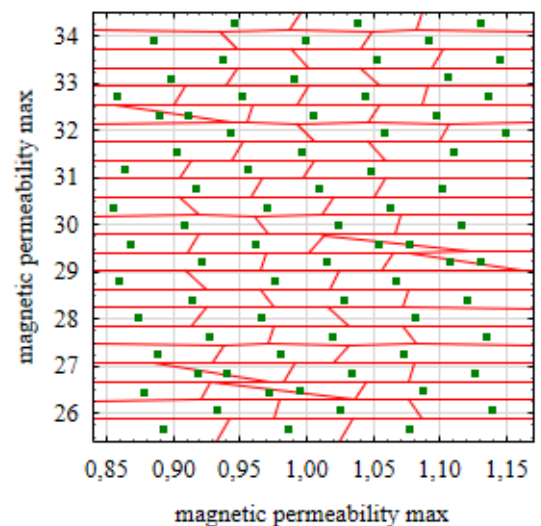
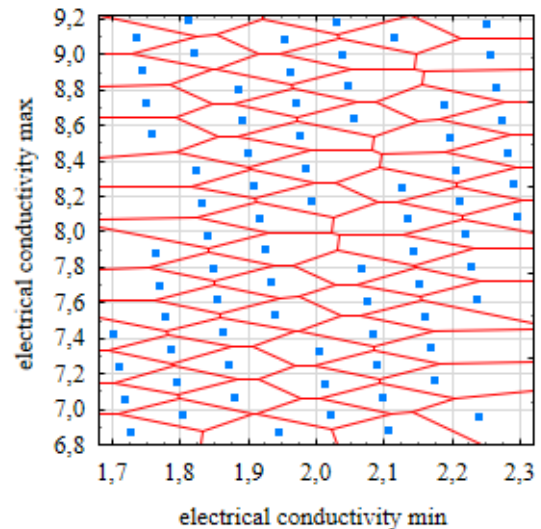


Рисунок 2 – Візуалізація деяких двовимірних проєкцій шести-факторного ПЕ з використанням діаграм Вороного: а – $(\sigma_{\min}, \sigma_{\max})$; б – (μ_{\min}, μ_{\max})

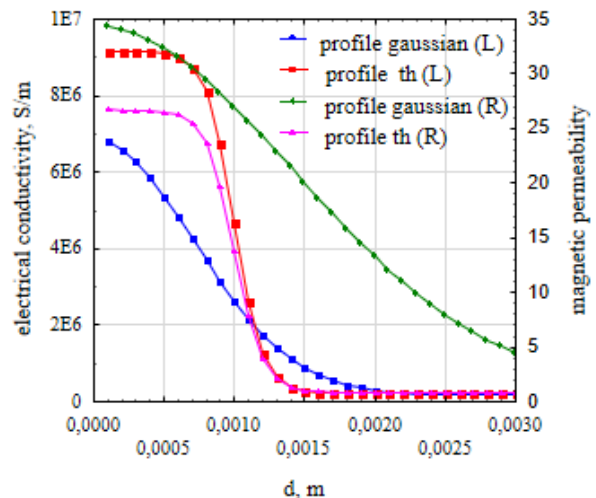


Рисунок 3 – Розподіл за профілем «гаусіан» та «гіперболічний тангенс» електричної провідності $\sigma(d)$ та магнітної проникності $\mu(d)$ по глибині приповерхневого шару ОК

дуже важливим наступним етапом є об'єднання необхідної кількості декількох одновимірних послідовностей в єдину комбінацію, яка реалізує в результаті багатовимірний план. Отже, навіть при наявності високоякісних одновимірних послідовностей із-за значної кількості варіантів комбінацій досить проблемно знайти такий, що забезпечує високу гомогенність та якісні проєкційні властивості плану, який створюється. З цих причин застосування нових квазівипадкових послідовностей, до яких відносяться послідовності Робертса, для побудови планів є доцільним. На даний час вважається, що найкращими серед одновимірних квазіпослідовностей є ЛП_r-послідовності Соболя. Проте найліпший результат з їх використанням досягається кропіткими дослідженнями із вибору їх вдалих комбінацій. Враховуючи відому кількість їх, що сягає близько п'яти десятків, виконання цього завдання для багатофакторних планів є фактично неможливим. В той же час застосування безпараметричних адитивних рекурсивних R -послідовностей Робертса дозволяє гарантовано забезпечити ПЕ з низькими показниками розбіжностей без проведення додаткових досліджень щодо можливості поєднання їх в один варіант комбінації, що було доведено дослідженнями [13] на планах до п'яти факторів включно. В цій статті наведена в [13] методологія створення однорідних планів була поширена на випадки більшої вимірності факторного простору. Отримані результати щодо побудови шести- та семи-факторних ПЕ підтверджують їх достатньо високоякісні проєкційні властивості та надають перспективи для їх практичного застосування як в моделюванні, так і для експериментальних досліджень.

ВИСНОВКИ

Розв'язано задачу створення однорідних планів багатофакторних експериментів на квазівипадкових R -послідовностях Робертса.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше для каталогізації запропоновані шести- та семи- факторні однорідні комп'ютерні плани експериментів із використанням квазівипадкових рекурсивних R -послідовностей Робертса, які забезпечують їх гарантовано низькі показники центрованої та циклічної розбіжностей та достатньо високоякісні проєкційні властивості без етапу добору вдалих комбінацій векторів плану. Це є відмінною особливістю запропонованих планів і відрізняє процес їх створення при застосуванні інших типів квазіпослідовностей.

Практична значущість результатів роботи полягає у тому, що результати досліджень можуть бути використані при побудові сурогатних математичних моделей фізичних процесів будь-якими відомими методами апроксимації. Також можливим є їх використання при реалізації кратного чисельного інтегрування, визначенні Парето-фронтів в задачах багатокритеріальної оптимізації.

© Гальченко В. Я., Кошовий М. Д., Трембовецька Р. В., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-2

Перспективи подальших досліджень полягають у пошуку можливостей щодо покращення показників узагальнених розбіжностей в однорідних комп'ютерних планах експериментів, що реалізують ітеративний дизайн заповнення простору.

ПОДЯКИ

Робота проведена в рамках науково-дослідної роботи Черкаського державного технологічного університету «Обернені задачі вихрострумове контролю: моделі, алгоритми, методи оптимізації» (№ держ. реєстрації – 0120U103875).

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Dean A. M. Design and analysis of experiments / A. M. Dean, D. Voss, D. Draguljic, 2nd edn. – New York : Springer, 2017. – 840 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
2. Antony J. Fractional Factorial Designs / J. Antony // Design of Experiments for Engineers and Scientists. – Elsevier, 2014. – P. 87–112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099417-8.00007-9>.
3. Crombecq K. Efficient space-filling and non-collapsing sequential design strategies for simulation-based modeling / K. Crombecq, E. Laermans, T. Dhaene // European Journal of Operational Research. – 2011. – Vol. 214, №3. – P. 683–696. DOI: [10.1016/j.ejor.2011.05.032](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.05.032).
4. Garud S. S. Design of Computer Experiments: A Review / S. S. Garud, A. I. Karimi, M. Kraft // Computers & Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 106. – P. 71–95. DOI: [10.1016/j.compchemeng.2017.05.010](https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.010).
5. Leatherman E. R. Computer Experiment Designs for Accurate Prediction / E. R. Leatherman, T. J. Santner, A. M. Dean // Statistics and Computing. – 2018. – Vol. 28. – P. 739–751. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/s11222-017-9760-8](https://doi.org/10.1007/s11222-017-9760-8).
6. Joseph V. R. Designing computer experiments with multiple types of factors: The MaxPro approach / V. R. Joseph, E. Gul, S. Ba // Journal of Quality Technology. – 2019. – Vol. 52, № 4. – P. 1–12. DOI: [10.1080/00224065.2019.1611351](https://doi.org/10.1080/00224065.2019.1611351).
7. Cui Q. A modified Latin hypercube sampling based on prior information / Q. Cui, H. Duan, X. Wang // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 768, № 5. – P. 052079. DOI: [10.1088/1757-899X/768/5/052079](https://doi.org/10.1088/1757-899X/768/5/052079).
8. Ba S. Optimal Sliced Latin Hypercube Designs / S. Ba, W. R. Myers, W. A. Breneman // Technometrics. – 2015. – Vol. 57, № 4. – P. 479–487. DOI: [10.1080/00401706.2014.957867](https://doi.org/10.1080/00401706.2014.957867).
9. Joseph V. R. Maximum projection designs for computer experiments / V. R. Joseph, E. Gul, S. Ba // Biometrika, Biometrika Trust. – 2015. – Vol. 102, №2. – P. 371–380. DOI: [10.1093/biomet/asv002](https://doi.org/10.1093/biomet/asv002).
10. Mu W. A class of space-filling designs and their projection properties / W. Mu, S. Xiong // Statistics & Probability Letters. – 2018. – Vol. 141. – P. 129–134. doi:[10.1016/j.spl.2018.06.002](https://doi.org/10.1016/j.spl.2018.06.002).
11. Surrogate Modelling with Sequential Design for Expensive Simulation Applications / [J. van der Herten, T. V. Steenkiste, I. Couckuyt, T. Dhaene]. – Computer Simulation, 2017. – 266 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/67739>.
12. Koziel S. Surrogate Modeling For High-frequency Design: Recent Advances / S. Koziel, A. Pietrenko-dabrowska. – EUROPE: WSPC, March 5, 2022. – 468 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/q0317>.
13. The construction of effective multi-dimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive R_d -sequence / [V. Halchenko, R. Trembovetska, V. Tyckov, A. Storchak] // Applied Computer Systems. – 2020. – Vol. 25, № 1. – P. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.2478/acss-2020-0009>.

14. Additive neural network approximation of multidimensional response surfaces for surrogate synthesis of eddy-current probes / [V. Ya Halchenko., R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov et al.] // *Przegląd Elektrotechniczny*. – 2021. – № 9. – P. 46–49. <https://doi.org/10.15199/48.2021.09.10>.
15. Halchenko V. Ya. Surrogate synthesis of frame eddy current probes with uniform sensitivity in the testing zone / V. Ya.

Halchenko, R. V. Trembovetska, V. V. Tychkov // *Metrology and Measurement Systems*. – 2021. – Vol. 28, № 3. – P. 551–564. <https://doi.org/10.24425/mms.2021.137128>.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2022.
Після доробки 20.08.2022.

УДК 519.242.5:620.179.147

ОДНОРОДНЫЕ ПЛАНЫ МНОГОФАКТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА КВАЗИСЛУЧАЙНЫХ R-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ РОБЕРТСА ДЛЯ СУРРОГАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ВИХРОСТИЛЬНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ

Гальченко В. Я. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры приборостроения, мехатроники и компьютеризированных технологий, Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, Украина.

Кошевой Н. Д. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры интеллектуальных измерительных систем и инженерии качества, Национальный аэрокосмический университет им. М. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

Трембовецкая Р. В. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры приборостроения, мехатроники и компьютеризированных технологий, Черкасский государственный технологический университет, Черкассы, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Работа посвящена вопросам создания многофакторных планов экспериментов на основе квазислучайных рекурсивных R-последовательностей Робертса. Объектом исследований является процесс создания однородных компьютерных планов экспериментов. Цель статьи состоит в создании многофакторных, а именно шести- и семи-факторных, однородных планов экспериментов с низкими показателями расхождений, исследовании их проекционных свойств и демонстрации их использования на примере суррогатного моделирования в вихреговой структуроскопии.

Метод. Для построения многомерных планов экспериментов применен итеративный метод равномерного заполнения единичного гиперкуба опорными точками, обеспечивающий приемлемые показатели гомогенности и реализуемый на основе квазислучайных безпараметрических аддитивных рекурсивных R-последовательностей Робертса с использованием иррациональных чисел, которые, в свою очередь, получены на основе обобщенной последовательности Фибоначчи. Критерием совершенства планов является оценка гомогенности по показателям расхождений, инвариантных относительно вращения координат и перемаркировки, а также упорядочивания факторов и которые количественно характеризуют отклонение сгенерированного распределения от идеального равномерного.

Результаты. Для каталогизации созданы шести- и семи-факторные однородные компьютерные планы экспериментов, которые характеризуются низкими показателями расхождений и достаточно высококачественными проекционными свойствами. Подтверждена, ранее доказанная в исследованиях авторов, тенденция сохранения этих характеристик планов экспериментов в многомерных факторных пространствах, которая также наблюдается с увеличением количества точек плана. Оценка качества созданных планов экспериментов осуществлялась как визуальным анализом матрицы рассеяния всех двумерных проекций, так и по количественным показателям неоднородности совокупности векторов, образующих план, а именно центрированным и циклическим расхождениям.

На примере начального этапа создания суррогатной модели для решения задачи идентификации профилей электрофизических параметров в вихреговой структуроскопии показаны некоторые особенности применения созданных планов, а именно переход масштабированием от плана для единичного гиперкуба к плану в реальном факторном пространстве в виде гиперпараллелепипеда, что существенно не влияет на его характеристики гомогенности распределения точек.

Выводы. Впервые решена задача создания шести- и семи-факторных однородных планов экспериментов с низкими показателями центрированного и циклического расхождений на основе R-последовательностей Робертса. Исследованы проекционные свойства созданных планов экспериментов для различного количества точек. Усовершенствован метод построения многомерных компьютерных планов экспериментов с учетом особенностей, характерных для вихреговой структуроскопии. Продемонстрировано использование шестимерных планов экспериментов на примере суррогатного моделирования в вихреговой структуроскопии. Результаты исследования могут быть использованы при построении суррогатных математических моделей физических процессов любыми известными методами аппроксимации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: компьютерный план эксперимента, суррогатная модель (метамодель), однородное распределение, квазислучайные последовательности, проекционные свойства, показатели расхождения.

UDC 519.242.5:620.179.147

HOMOGENEOUS PLANS OF MULTI-FACTORY EXPERIMENTS ON QUASI-RANDOM R-ROBERTS SEQUENCES FOR SURROGATE MODELING IN A VORTEX STYLE STRUCTUROSCOPY

Galchenko V. Ya. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Instrumentation, Mechatronics and Computerized Technologies, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine.

Koshevoy M. D. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Intelligent Measuring Systems and quality engineering, National Aerospace University. M. E. Zhukovsky “Kharkiv aviation institute”, Kharkiv, Ukraine.

Trembovetskaya R. V. – Dr. Sc., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Instrument Engineering, Mechatronics and Computerized Technologies, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The article is devoted to the creation of multifactorial experimental plans based on quasi-random recursive Roberts R -sequences. The object of the research is the process of creating computer-aided experimental design plans. The aim of the article is to create multifactorial, namely six- and seven-factor, uniform plans of experiments with low discrepancies, study of their projection properties and demonstrate their use on the example of surrogate modeling in eddy current structuroscopy.

Method. An iterative method of unit hypercube even filling with reference points was used for constructing multidimensional experimental plans. It provides acceptable indicators of homogeneity and is realized on the basis of quasi-random nonparametric additive recursive Roberts R -sequences using irrational numbers, which, in turn, are obtained on the basis of the generalized Fibonacci sequence. The criterion for plans perfection is the assessment of homogeneity in terms of differences invariant with respect to the rotation of coordinates and re-marking and ordering of factors and which quantitatively characterize the deviation of the generated distribution from the ideal uniform.

Results. Six- and seven-factor computer uniform experimental plans have been created for cataloging, which are characterized by low discrepancies and sufficiently high-quality projection properties. The tendency, which had been previously proved in the authors' research, for preserving these experimental plans characteristics in multidimensional factor spaces, which is observed with increasing number of plan points, has been confirmed. The evaluation of the quality of the created experimental plans is carried out both by visual analysis of the scattering matrix of all two-dimensional projections and by quantitative indicators of heterogeneity of the set of vectors that form the plan, namely centered and cyclic discrepancies.

The example of the initial stage of creating a surrogate model to solve the problem of identifying profiles of electrophysical parameters in eddy current structuroscopy shows certain features of the application for created plans, in particular the transition from the plan for a unit hypercube to the plan in real factor space in the form of a hyperparallelepiped, which does not significantly affect its characteristics of homogeneity of the distribution of points.

Conclusions. For the first time, the problem of creating six- and seven-factor uniform plans of experiments with low rates of centered and cyclic discrepancies based on R -sequences of Roberts was solved. The projection properties of the created experimental plans for different number of points were investigated. The method of constructing multidimensional computer plans of experiments taking into account the peculiarities of eddy current structuroscopy was improved. The use of six-dimensional experimental plans on the example of surrogate modeling in eddy current structuroscopy was demonstrated. The results of the study can be used in the construction of surrogate mathematical models of physical processes by any known methods of approximation.

KEYWORDS: computer plan of the experiment, surrogate model (metamodel), uniform distribution, quasi-random sequences, projection properties, indicators of discrepancy.

REFERENCES

1. Dean A. M., Voss D., Draguljic D. 2nd edn. Design and analysis of experiments. New York, Springer, 2017, 840 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52250-0>.
2. Antony J. Fractional Factorial Designs, *Design of Experiments for Engineers and Scientists*. Elsevier, 2014, pp. 87–112. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099417-8.00007-9>.
3. Crombecq K., Laermans E., Dhaene T. Efficient space-filling and non-collapsing sequential design strategies for simulation-based modeling, *European Journal of Operational Research*, 2011, Vol. 214, No. 3, pp. 683–696. DOI: 10.1016/j.ejor.2011.05.032.
4. Garud S. S., Karimi A. I., Kraft M. Design of Computer Experiments: A Review, *Computers & Chemical Engineering*, 2017, Vol. 106, pp. 71–95. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2017.05.010.
5. Leatherman E. R., Santner T. J., Dean A. M. Computer Experiment Designs for Accurate Prediction, *Statistics and Computing*, 2018, Vol. 28, pp. 739–751. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11222-017-9760-8>.
6. Joseph V. R., Gul E., Ba S. Designing computer experiments with multiple types of factors: The MaxPro approach, *Journal of Quality Technology*, 2019, Vol. 52, No. 4, pp. 1–12. DOI: 10.1080/00224065.2019.1611351.
7. Cui Q., Duan H., Wang X. A modified Latin hypercube sampling based on prior information, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, Vol. 768, No. 5, pp. 052079. DOI: 10.1088/1757-899X/768/5/052079.
8. Ba S., Myers W. R., Breneman W. A. Optimal Sliced Latin Hypercube Designs, *Technometrics*, 2015, Vol. 57, No. 4, pp. 479–487. DOI: 10.1080/00401706.2014.957867.
9. Joseph V. R., Gul E., Ba S. Maximum projection designs for computer experiments, *Biometrika, Biometrika Trust*, 2015. Vol. 102, No. 2, pp. 371–380. DOI: 10.1093/biomet/asv002.
10. Mu W., Xiong S. A class of space-filling designs and their projection properties, *Statistics & Probability Letters*, 2018. Vol. 141, pp. 129–134. doi:10.1016/j.spl.2018.06.002.
11. Herten J., Steenkiste T. V., Couckuyt I., Dhaene T. Surrogate Modelling with Sequential Design for Expensive Simulation Applications, *Computer Simulation*, 2017, 266 p. DOI: <https://doi.org/10.5772/67739>.
12. Koziel S., Pietrenko-dabrowska A. Surrogate Modeling For High-frequency Design: Recent Advances, *EUROPE: WSPC*, March 5, 2022, 468 p. DOI: <https://doi.org/10.1142/q0317>.
13. Halchenko V., Trembovetska R., Tychkov V., Storchak A. The construction of effective multi-dimensional computer designs of experiments based on a quasi-random additive recursive R_d -sequence, *Applied Computer Systems*, 2020. – Vol. 25, No. 1, pp. 70–76. DOI: <https://doi.org/10.2478/acss-2020-0009>.
14. Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. et al. Additive neural network approximation of multidimensional response surfaces for surrogate synthesis of eddy-current probes, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2021, No. 9, pp. 46–49. <https://doi.org/10.15199/48.2021.09.10>.
15. Halchenko V. Ya. Trembovetska R. V., Tychkov V. V. Surrogate synthesis of frame eddy current probes with uniform sensitivity in the testing zone, *Metrology and Measurement Systems*, 2021, Vol. 28, No. 3, pp. 551–564. <https://doi.org/10.24425/mms.2021.137128>.

KOLMOGOROV-WIENER FILTER FOR CONTINUOUS TRAFFIC PREDICTION IN THE GFSD MODEL

Gorev V. N. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Gusev A. Yu. – PhD, Associate Professor, Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

Korniienko V. I. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine.

ABSTRACT

Context. We investigate the Kolmogorov-Wiener filter weight function for the prediction of continuous stationary telecommunication traffic in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model.

Objective. The aim of the work is to obtain an approximate solution for the corresponding weight function and to illustrate the convergence of the truncated polynomial expansion method used in this paper.

Method. The truncated polynomial expansion method is used for the obtaining of an approximate solution for the Kolmogorov-Wiener weight function under consideration. In this paper we used the corresponding method on the basis of the Chebyshev polynomials of the first kind orthogonal on the time interval on which the filter input data are given. It is expected that the results based on other polynomial sets will be similar to the results obtained in this paper.

Results. The weight function is investigated in the approximations up to the eighteen-polynomial one. It is shown that approximations of rather large numbers of polynomials lead to a good coincidence of the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation. The quality of the coincidence is illustrated by the calculation of the corresponding MAPE errors.

Conclusions. The paper is devoted to the theoretical construction of the Kolmogorov-Wiener filter for the prediction of continuous stationary telecommunication traffic in the GFSD model. The traffic correlation function in the framework of the GFSD model is a positively defined one, which guarantees the convergence of the truncated polynomial expansion method. The corresponding weight function is obtained in the approximations up to the eighteen-polynomial one. The convergence of the method is illustrated by the calculation of the MAPE errors of misalignment of the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation under consideration. The results of the paper may be applied to practical traffic prediction in telecommunication systems with data packet transfer.

KEYWORDS: Kolmogorov-Wiener filter weight function, continuous telecommunication traffic, truncated polynomial expansion method, GFSD model, Chebyshev polynomials of the first kind.

ABBREVIATIONS

GFSD is the Gaussian fractional sum-difference;

ARMA is an autoregressive moving average;

ARIMA is an autoregressive integrated moving average;

FARIMA is a fractional autoregressive integrated moving average;

MAPE is a mean absolute percentage error.

NOMENCLATURE

T is a time interval on which the input process data are observed;

z is a time interval for which the forecast should be made;

$h(t)$ is the Kolmogorov-Wiener filter weight function;

H is the Hurst exponent;

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

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

$\theta \in (0,1)$ is a constant which depends on the packet arrival rate;

d is a fractional differencing parameter of the model;

a, b are auxiliary constants;

n is a number of polynomials in the corresponding approximations;

g_s are the coefficients multiplying the polynomials;

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

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

$\text{Left}(t)$ is the left-hand side of the Wiener-Hopf integral equation;

$\text{Right}(t)$ is the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation;

G_{ks} are the integral brackets;

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

N is a number of points in the numerical integration.

INTRODUCTION

The problem of telecommunication traffic prediction is an urgent problem for telecommunications. For example, it is important for the optimization of network resources, for the detection of cyber-attacks and for network planning, see [1–3].

There are many approaches to telecommunication traffic prediction, which are used in different situations. In fact, the traffic may be treated as a time series. For example, the so-called gray model approach [4] may be used for the monotone, nonnegative and smooth time-series prediction, the ARMA model may predict stationary and some special non-stationary time series [1]. More sophisticated approaches, for example, such as ARIMA, FARIMA approaches and neural networks, may be used in more complex cases [2, 3].

However, another approach that may be applicable to the prediction of stationary and rather smooth telecommunication traffic is the approach based on the Kolmogorov-Wiener filter. The investigation of such an approach and its applicability may be of interest because of its simplicity in comparison with many approaches known in the literature. As far as we know, the investigation of the Kolmogorov-Wiener filter approach is not enough developed in the literature.

There are many mathematical models that may describe telecommunication traffic, see [5]. Our recent papers [6–8] were devoted to the theoretical construction of the Kolmogorov-Wiener filter for telecommunication traffic in the power-law structure function model and the fractional Gaussian noise model. In this paper we investigate the corresponding filter for the traffic prediction in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model proposed in [9].

The object of study is the Kolmogorov-Wiener filter for the prediction of continuous stationary telecommunication traffic in the GFSD model.

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

The aim of the work is to obtain the weight function on the basis of the truncated polynomial expansion method.

1 PROBLEM STATEMENT

As is known [10], the Kolmogorov-Wiener weight function for the prediction of continuous time series obeys the Wiener-Hopf integral equation

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

The problem statement is as follows: to obtain the unknown filter weight function as an approximate solution of the Wiener-Hopf integral equation (1) on the basis of the truncated polynomial expansion method.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model for mathematical traffic description was proposed in paper [9]. In [9] it is stressed that the corresponding model gives a good mathematical description of live packet traces for traffic in both directions of 3 Internet links: Auckland, Leipzig, and Bell.

Our previous papers [6–8] were devoted to the theoretical construction of the Kolmogorov-Wiener filter for telecommunication traffic in the power-law structure function model and the fractional Gaussian noise model, but we don't know any papers devoted to the Kolmogorov-Wiener filter investigation for telecommunication traffic in the GFSD model. This fact justifies the scientific novelty of this paper.

In this paper we solve the integral equation (1) on the basis of the truncated polynomial expansion method. This method is a special case of the Galerkin method [11] and in this paper this method is based on the Chebyshev polynomials of the first kind orthogonal on the time interval $t \in [0, T]$. Of course, another polynomial system may also be chosen. But, for example, in [8] three different polynomial systems (Chebyshev polynomials of the second kind, Chebyshev polynomials of the first kind, and polynomials orthogonal without weight) were investigated for two different traffic models, and it was shown that the results for all three polynomial systems are, in fact, similar. Therefore, we expect that the results for other polynomial systems will also be similar in the framework of the GFSD model.

3 MATERIALS AND METHODS

The traffic correlation function for the discrete GFSD model is as follows [9]:

$$R(t) = (1-\theta) \frac{2(1-d)t^2 - (1-d)^2}{t^2 - (1-d)^2} \times \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(t+d)}{\Gamma(t-d+1)}, \quad t \geq 1. \quad (2)$$

the value $d = 0.31$ is chosen [9]. First of all, we should propose an expression for $R(t)$ for $t \in (0, 1)$. For $t \geq 1$ it is natural enough to require the correlation functions in the discrete and continuous cases to be the same. However, expression (2) is obviously not applicable for $R(t)$ for $t \in [0, 1]$ because it is not convergent at $t = 1 - d$ and the inequality $|R(t)| \leq R(0)$ fails. In [9] the corresponding model is written for the traffic with a variance equal to 1, so we propose to define the correlation function for $t \in [0, 1]$ as

$$R(t) = at^b + 1 \quad (3)$$

where the constants a and b are calculated on the basis of the joining conditions

$$R|_{t=1-0} = R|_{t=1+0}, \quad \frac{dR}{dt}|_{t=1-0} = \frac{dR}{dt}|_{t=1+0}. \quad (4)$$

In such a case the inequality $|R(t)| \leq R(0)$ holds, the process variance $R(0) = 1$, the function $R(t)$ and its derivative are continuous on the time axis. It should also be stressed that if $T \gg 1$, then the leading order in the integrals calculated in the paper is given by the interval $t \in [1, T]$ rather than the interval $t \in [0, 1]$, so the choice of $R(t)$ for $t \in [0, 1]$ may not have any significant effect on the paper results. For example, for the value $\theta = 0.8$ the following values are obtained: $a = -0.845$, $b = -0.206$ (rounded off to 3 significant digits). It is also known that the correlation function of a stationary random process is even one. Therefore, finally, we propose the following form of the correlation function $R(t)$ in the continuous case:

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

the constants a and b are given by expressions (4).

In what follows, we solve the integral equation (1) with the correlation function (5) as follows. The unknown weight function is sought in the form of the truncated polynomial expansion:

$$h(\tau) = \sum_{s=0}^{n-1} g_s S_s(\tau). \quad (6)$$

where

$$S_s(\tau) = T_s \left(\frac{2\tau}{T} - 1 \right), \quad (7)$$

see [8] and the definition of $T_s(x)$ in [12]. After substituting (6) into (1), multiplying by $S_k(t)$, and integrating over t , one can obtain the following expression for the coefficients g_s in the n -polynomial approximation:

$$\begin{pmatrix} g_0 \\ g_1 \\ \vdots \\ g_{n-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{00} & G_{01} & \cdots & G_{0,n-1} \\ G_{10} & G_{11} & \cdots & G_{1,n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n-1,0} & G_{n-2,0} & \cdots & G_{n-1,n-1} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} B_0 \\ B_1 \\ \vdots \\ B_{n-1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

where

$$G_{ks} = \int_0^T \int_0^T d\tau dt S_k(t) S_s(\tau) R(t-\tau), \quad (9)$$

$$B_k = \int_0^T dt S_k(t) R(t+z).$$

On the basis of the fact that $R(t)$ is an even function and on the basis of the properties of the Chebyshev polynomials, one can derive the following properties of the integral brackets G_{ks} :

$$G_{ks} = G_{sk}, \quad (10)$$

$$G_{ks} = 0 \text{ if } k \text{ and } s \text{ are of different parities,}$$

see a similar derivation for another polynomial system in [6]. The properties (10) significantly reduce the computation time.

Let us discuss the calculation of the integral brackets (9) in detail. In this paper they are calculated in the Wolfram Mathematica package as follows. Unfortunately, the package fails to calculate the integral brackets on the basis of the explicit expression (9) with account for (5), so expression (9) is rewritten on the basis of the following change of the variables:

$$G_{ks} = \int_0^T \int_0^T d\tau dt S_k(t) S_s(\tau) R(t-\tau) =$$

$$= \{x = t - \tau, y = t + \tau\} =$$

$$= \frac{1-\theta}{2} \int_{-T}^{-1} dx \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \times$$

$$\times \frac{\Gamma(-x+d)}{\Gamma(-x-d+1)} \int_{-x}^{x+2T} dy S_k\left(\frac{x-y}{2}\right) S_s\left(\frac{x+y}{2}\right) +$$

$$+ \frac{1-\theta}{2} \int_1^T dx \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \times \quad (11)$$

$$\times \frac{\Gamma(x+d)}{\Gamma(x-d+1)} \int_x^{2T-x} dy S_k\left(\frac{x-y}{2}\right) S_s\left(\frac{x+y}{2}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_{-1}^0 dx (a \cdot (-x)^b + 1) \times$$

$$\times \int_{-x}^{2T+x} dy S_k\left(\frac{x-y}{2}\right) S_s\left(\frac{x+y}{2}\right) +$$

$$+ \frac{1}{2} \int_0^1 dx (a \cdot x^b + 1) \int_x^{2T-x} dy S_k\left(\frac{x-y}{2}\right) S_s\left(\frac{x+y}{2}\right),$$

the integral brackets are calculated in the Wolfram Mathematica package on the basis of the explicit expressions (11).

4 EXPERIMENTS

We investigate the results for the following numerical values of the parameters:

$$T = 100, \quad z = 3, \quad d = 0.31, \quad \theta = 0.8. \quad (12)$$

The integral brackets G_{ks} are calculated on the basis of (11), the free terms B_k are calculated on the basis of (9), for each polynomial approximation the coefficients multiplying the polynomials are calculated on the basis of (8), the result for the corresponding weight function is given by (6). In order to justify the proposed algorithm, we compare the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation (1) by calculation of the MAPE errors:

$$\begin{aligned} \text{Left}(t) &= \int_0^T d\tau h(\tau)R(t-\tau), \\ \text{Right}(t) &= R(t+z), \\ \text{MAPE} &= \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{\text{Left}(t) - \text{Right}(t)}{\text{Right}(t)} \right| dt \cdot 100\%. \end{aligned} \quad (13)$$

In this paper the MAPE error is roughly estimated as

$$\begin{aligned} \text{MAPE} &= \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} \left| \frac{\text{Left}\left(\frac{jT}{N}\right) - \text{Right}\left(\frac{jT}{N}\right)}{\text{Right}\left(\frac{jT}{N}\right)} \right| \cdot 100\%, \\ N &= 10^2. \end{aligned} \quad (14)$$

It should be stressed that $\text{Left}(t)$ is calculated on the basis of the Wolfram Mathematica package using the following explicit expressions:

$$\text{Left}(t) = \begin{cases} L_1(t), & t \in (1, T-1) \\ L_2(t), & t \geq T-1 \\ L_3(t), & t \leq 1 \end{cases} \quad (15)$$

where

$$\begin{aligned} L_1(t) &= \int_{t-T}^{-1} dx h(t-x) \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \times \\ &\times (1-\theta) \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(-x+d)}{\Gamma(-x-d+1)} + \\ &+ \int_{-1}^0 h(t-x) (a(-x)^b + 1) dx + \\ &+ \int_0^1 h(t-x) (ax^b + 1) dx + \\ &+ \int_1^t dx h(t-x) \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \times \\ &\times (1-\theta) \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(x+d)}{\Gamma(x-d+1)}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} L_2(t) &= \int_{T-t}^0 h(t-x) (a(-x)^b + 1) dx + \\ &+ \int_0^1 h(t-x) (ax^b + 1) dx + \\ &+ \int_1^t dx h(t-x) \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \times \\ &\times (1-\theta) \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(x+d)}{\Gamma(x-d+1)}, \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} L_3(t) &= \int_{t-T}^{-1} dx h(t-x) \frac{2(1-d)x^2 - (1-d)^2}{x^2 - (1-d)^2} \times \\ &\times (1-\theta) \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \frac{\Gamma(-x+d)}{\Gamma(-x-d+1)} + \\ &+ \int_{-1}^0 h(t-x) (a(-x)^b + 1) dx + \\ &+ \int_0^t h(t-x) (ax^b + 1) dx. \end{aligned} \quad (18)$$

The calculation of all the integrals in this paper is made on the basis of the NIntegrate function built in the Wolfram Mathematica package.

5 RESULTS

The obtained results for the MAPE are given in Table 1.

Table 1 – MAPE for the approximations of n polynomials rounded off to two decimal places

n	MAPE, %
1	26.59
2	17.95
3	11.44
4	8.43
5	5.92
6	4.65
7	3.51
8	2.93
9	2.35
10	2.11
11	1.79
12	1.67
13	1.47
14	1.41
15	1.27
16	1.24
17	1.14
18	1.14

In order to illustrate the coincidence of the left-hand side and the right-hand side, we build the corresponding graphs for the 18-polynomial approximation, see Fig. 1. Therefore, it may be concluded that the truncated polynomial expansion method is convergent for the problem under consideration, and approximations of rather large numbers of polynomials are rather accurate.

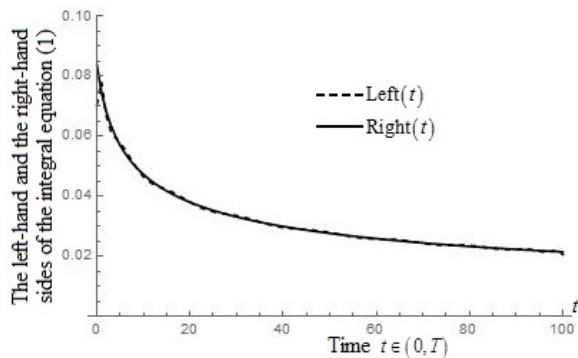


Figure 1 – Comparison of the left-hand and right-hand sides of eq. (1) for the parameters of (12) for the eighteen-polynomial approximation

6 DISCUSSION

The Kolmogorov-Wiener filter weight function for the prediction of continuous stationary telecommunication traffic in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model is investigated. The truncated polynomial expansion method based on the Chebyshev polynomials of the first kind is used in a search for an approximate solution of the Wiener-Hopf integral equation. The method is realized on the basis of the Chebyshev polynomials of the first kind orthogonal on the required time interval. The traffic correlation function in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model is a non-negative one, which justifies the convergence of the proposed method. Approximations up to the eighteen-polynomial one are investigated, and the method convergence is illustrated by the calculation of the corresponding MAPE errors of misalignment of the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation under consideration. It is shown that approximations of a large number of polynomials are rather accurate.

In [8], the truncated polynomial expansion method is investigated for three polynomial systems (Chebyshev polynomials of the second kind, Chebyshev polynomials of the first kind, and polynomials orthogonal without weight) for two different traffic models (power-law structure function model and fractional Gaussian noise model), and it is shown that the results for all the three polynomial sets are, in fact, the same. It should also be stressed that the structures of the correlation function for $t \gg 1$ are similar in the fractional Gaussian noise model and in the GFSD model (see [9]). Therefore, it is expected that the results of the truncated polynomial expansion method will be almost the same for different polynomial systems for the traffic in the GFSD model.

CONCLUSIONS

The Kolmogorov-Wiener filter weight function for the prediction of continuous stationary telecommunication traffic in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model is calculated on the basis of the truncated polynomial expansion method. Approximations up to the 18-polynomial one are investigated. It is shown that approximations of rather large numbers of polynomials lead

to a good coincidence between the left-hand side and the right-hand side of the Wiener-Hopf integral equation.

The results of this paper may be useful for the practical prediction of telecommunication traffic in systems with data packet transfer.

The scientific novelty of the paper is the fact that for the first time the Kolmogorov-Wiener filter weight function is calculated for the telecommunication traffic prediction in the GFSD (Gaussian fractional sum-difference) model.

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

Prospects for further research are to obtain a practical prediction on the basis of the obtained results and to investigate the solutions for the weight function on the basis of a non-polynomial orthogonal function system.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is made in the framework of the Project “Research of methods of increase of efficiency of the automated control of thermal work of units of high power of industrial and household function” (State Registration No. 0122U002601) of the Dnipro University of Technology.

REFERENCES

- Liu J. X., Jia Z. H. Telecommunication Traffic Prediction Based on Improved LSSVM, *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2018, Vol. 32, No. 3, 1850007 (16 pages). DOI: 10.1142/S0218001418500076
- Iqbal M. F., Zahid M., Habib D. et al. Efficient Prediction of Network Traffic for Real-Time Applications, *Journal of Computer Networks and Communications*, 2019, Vol. 2019, 4067135 (11 pages). DOI: 10.1155/2019/4067135.
- Katris C., Daskalaki S. // Comparing forecasting approaches for Internet traffic, *Expert Systems with Applications*, 2015, Vol. 42, Issue 21, pp. 8172–8183. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.06.029.
- Bilgil H. New grey forecasting model with its application and computer code, *AIMS Mathematics*, 2021, Vol. 6, Issue 2, pp. 1497–1514. DOI: 10.3934/math.2021091
- Al-Azzeh J. S., Al Hadidi M., Odarchenko R. et al. Analysis of Self-Similar Traffic Models in Computer Networks, *International Review on Modelling and Simulations*, 2017, Vol. 10, No. 5, pp. 328–336. DOI: 10.15866/iremos.v10i5.12009
- Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. Polynomial solutions for the Kolmogorov-Wiener filter weight function for fractal processes, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 2, pp. 44–52. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-5
- Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I. Approximate solutions for the Kolmogorov-Wiener filter weight function for continuous fractional Gaussian noise, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2021, No. 1, pp. 29–35. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-3
- Gorev V. N., Gusev A., Korniienko V., Aleksiev M., Vorobiyenko P., Ilchenko M., Strelkovska I. Kolmogorov-Wiener Filter Weight Function for Stationary Traffic Forecasting: Polynomial and Trigonometric Solutions, *Current*

- Trends in Communication and Information Technologies*. Cham, Springer, 2021, Chapter 7, pp. 111–129. DOI: 10.1007/978-3-030-76343-5_7
9. Anderson D., Cleveland W. S., Xi B. Multifractal and Gaussian fractional sum–difference models for Internet traffic, *Performance Evaluation*, 2017, Vol. 107, pp. 1–33. DOI: 10.1016/j.peva.2016.11.001
10. Miller S., Childers D. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition. Amsterdam, Academic Press, 2012, 598 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
11. Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of integral equations. Second edition. New York, Chapman and Hall, 2008, 1144 p. DOI: 10.1201/9781420010558
12. Gradshteyn I. S., Ryzhik I. M., Geronimus Yu. V. et al. Table of Integrals, Series, and Products. Eighth edition. Amsterdam, Academic Press, 2014, 1184 p. DOI: 10.1016/C2010-0-64839-5

Received 16.05.2022.

Accepted 23.08.2022.

УДК 51–74, 517.968.21

ФІЛЬТР КОЛМОГОРОВА-ВІНЕРА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ НЕПЕРЕРВНОГО ТРАФІКУ У GFSD МОДЕЛІ

Горев В. М. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

Гусев О. Ю. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, професор кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

Корнієнко В. І. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська Політехніка», Дніпро, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Досліджено вагову функцію фільтра Колмогорова-Вінера для прогнозування неперервного стаціонарного телекомунікаційного трафіку у GFSD (Gaussian fractional sum-difference) моделі.

Мета роботи. Метою роботи є отримати наближений розв’язок для відповідної вагової функції та проілюструвати збіжність методу обірваних розвинень за поліномами, що використано в цій статті.

Метод. Метод обірваних розвинень за поліномами використано для отримання наближеного розв’язку для досліджуваної вагової функції фільтра Колмогорова-Вінера. В цій статті нами використано відповідний метод на основі поліномів Чебишова першого роду які є ортогональними на часовому відрізку на якому задані вхідні дані фільтра. Очікується, що результати, які базуватимуться на інших поліноміальних системах будуть аналогічними до результатів, отриманих в даній статті.

Результати. Вагову функцію досліджено у наближеннях до вісімнадцяти поліномів включно. Показано, що наближення досить великої кількості поліномів призводять до хорошого співпадіння лівої та правої частин інтегрального рівняння Вінера-Хопфа. Якість співпадіння проілюстрована обчисленням відповідних середніх абсолютних помилок нев’язки.

Висновки. Статтю присвячено теоретичній побудові фільтра Колмогорова-Вінера для прогнозування неперервного стаціонарного телекомунікаційного трафіку у GFSD моделі. Кореляційна функція трафіку в рамках GFSD моделі є позитивно визначеною, що гарантує збіжність методу обірваних розвинень за поліномами. Відповідна вагова функція отримана у наближеннях до вісімнадцяти поліномів включно. Збіжність методу проілюстрована обчисленням середніх абсолютних помилок нев’язки лівої та правої частин інтегрального рівняння Вінера-Хопфа, що розглядається. Результати роботи можуть бути застосовні до практичного прогнозування трафіку в телекомунікаційних мережах з пакетною передачею даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вагова функція фільтра Колмогорова-Вінера, неперервний телекомунікаційний трафік, метод обірваних розвинень за поліномами, GFSD модель, поліноми Чебишова першого роду.

УДК 51–74, 517.968.21

ФИЛЬТР КОЛМОГОРОВА-ВИНЕРА ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНОГО ТРАФФИКА В GFSD МОДЕЛИ

Горев В. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет «Днепропетровская Политехника», Днепр, Украина.

Гусев А. Ю. – канд. физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет «Днепропетровская Политехника», Днепр, Украина.

Корниенко В. И. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет «Днепропетровская Политехника», Днепр, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследована весовая функция фильтра Колмогорова-Винера для прогнозирования непрерывного стационарного телекоммуникационного трафика в GFSD (Gaussian fractional sum-difference) модели.

Цель работы. Целью работы является получить приближенное решение для соответствующей весовой функции и проиллюстрировать сходимость метода оборванных разложений по полиномам, который использован в данной статье.

Метод. Метод оборванных разложений по полиномам использован для получения приближенного решения для исследуемой весовой функции фильтра Колмогорова-Винера. В этой статье нами использован соответствующий метод на основе полиномов Чебышева первого рода, которые являются ортогональными на временном отрезке, на котором заданы входные

данные фильтра. Ожидается, что результаты, которые будут базироваться на других полиномиальных системах, будут аналогичны результатам, полученным в данной статье.

Результаты. Весовая функция исследована в приближениях до восемнадцати полиномов включительно. Показано, что приближения достаточно большого числа полиномов приводят к хорошему совпадению левой и правой частей интегрального уравнения Винера-Хопфа. Качество совпадения проиллюстрировано вычислением соответствующих средних абсолютных ошибок невязки.

Выводы. Статья посвящена теоретическому построению фильтра Колмогорова-Винера для прогнозирования непрерывного стационарного телекоммуникационного трафика в GFSD модели. Корреляционная функция трафика в рамках GFSD модели положительно определена, что гарантирует сходимость метода оборванных разложений по полиномам. Соответствующая весовая функция получена в приближениях до восемнадцати полиномов включительно. Сходимость метода проиллюстрирована вычислением средних абсолютных ошибок невязки левой и правой частей исследуемого интегрального уравнения Винера-Хопфа. Результаты работы могут быть применимы к практическому прогнозированию трафика в телекоммуникационных сетях с пакетной передачей данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: весовая функция фильтра Колмогорова-Винера, непрерывный телекоммуникационный трафик, метод оборванных разложений по полиномам, GFSD модель, полиномы Чебышева первого рода.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Liu J. X. Telecommunication Traffic Prediction Based on Improved LSSVM / J. X. Liu, Z. H. Jia // *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. – 2018. – Vol. 32, № 3. – 1850007 (16 pages). DOI: 10.1142/S0218001418500076
2. Efficient Prediction of Network Traffic for Real-Time Applications / [M. F. Iqbal, M. Zahid, D. Habib et al.] // *Journal of Computer Networks and Communications*. – 2019. – Vol. 2019. – 4067135 (11 pages). DOI: 10.1155/2019/4067135.
3. Katris C. Comparing forecasting approaches for Internet traffic / C. Katris, S. Daskalaki // *Expert Systems with Applications*. – 2015. – Vol. 42, Issue 21. – P. 8172–8183. DOI: 10.1016/j.eswa.2015.06.029.
4. Bilgil H. New grey forecasting model with its application and computer code / H. Bilgil // *AIMS Mathematics*. – 2021. – Vol. 6, Issue 2. – P. 1497–1514. DOI: 10.3934/math.2021091
5. Analysis of Self-Similar Traffic Models in Computer Networks / [J. S. Al-Azzeh, M. Al Hadidi, R. Odarchenko et al.] // *International Review on Modelling and Simulations*. – 2017. – Vol. 10, № 5. – P. 328–336. DOI: 10.15866/iremos.v10i5.12009
6. Gorev V. N. Polynomial solutions for the Kolmogorov–Wiener filter weight function for fractal processes / V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2019. – № 2. – P. 44–52. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-2-5
7. Gorev V. N. Approximate solutions for the Kolmogorov–Wiener filter weight function for continuous fractional Gaussian noise / V. N. Gorev, A. Yu. Gusev, V. I. Korniienko // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2021. – № 1. – P. 29–35. DOI: 10.15588/1607-3274-2021-1-3
8. Gorev V. N. Kolmogorov–Wiener Filter Weight Function for Stationary Traffic Forecasting: Polynomial and Trigonometric Solutions / V. Gorev, A. Gusev, V. Korniienko, M. Aleksieiev // *Current Trends in Communication and Information Technologies* / P. Vorobiyenko, M. Ilchenko, I. Strelkovska. – Cham: Springer, 2021. – Chapter 7. – P. 111–129. DOI: 10.1007/978-3-030-76343-5_7
9. Anderson D. Multifractal and Gaussian fractional sum-difference models for Internet traffic / D. Anderson, W. S. Cleveland, B. Xi // *Performance Evaluation*. – 2017. – Vol. 107. – P. 1–33. DOI: 10.1016/j.peva.2016.11.001
10. Miller S. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition / S. Miller, D. Childers. – Amsterdam: Academic Press, 2012. – 598 p. DOI: 10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
11. Polyanin A. D. Handbook of integral equations. Second edition / A. D. Polyanin, A. V. Manzhirov. – New York: Chapman and Hall, 2008. – 1144 p. DOI: 10.1201/9781420010558
12. Table of Integrals, Series, and Products. Eighth edition / [I. S. Gradshteyn, I. M. Ryzhik, Yu. V. Geronimus et al.] – Amsterdam: Academic Press, 2014. – 1184 p. DOI: 10.1016/C2010-0-64839-5

MATHEMATICAL MODEL FOR DECISION MAKING SYSTEM BASED ON THREE-SEGMENTED LINEAR REGRESSION

Kuzmin V. M. – PhD, Associate Professor, Department of Telecommunication and Radioelectronic Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Khrashchevskiy R. V. – Dr. Sc., Professor, First Vice-Rector National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Kulik M. S. – Dr. Sc., Professor, Head of the of the Aerospace Faculty, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Ivanets O. B. – PhD, Associate Professor, Department of Electronics, Robotics, Monitoring Technology and the Internet of Things, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Zaliskiy M. Yu. – Dr. Sc., Associate Professor, Department of Telecommunication and Radioelectronic Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

Petrova Yu. V. – PhD, Associate Professor, Department of Telecommunication and Radioelectronic Systems, National Aviation University, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of approximation of empirical data in the decision-making system in safety management.. The object of the study was to verify the adequate coefficients of the mathematical model for data approximation using information technology.

Objective. The goal of the work is the creation adequate math-ematical model using information technology on the bases analyze different approaches for approximating empirical data an that can be used to predict the current state of the operator in the flight safety system..

Method. A comparative analysis of the description of the transformation of information indicators with a non-standard structure. The following models of transformation of information indicators with similar visual representation are selected for comparison: parabolas of the second and third order, single regression and regression with jumps. It is proposed to use new approaches for approximation, based on the use of the criterion proposed by Kuzmin and the Heaviside function. The adequacy of the approximation was checked using these criteria, which allowed to choose an adequate mathematical model to describe the transformation of information indicators. The stages of obtaining a mathematical model were as follows: determining the minimum sum of squares of deviations for all information indicators simultaneously; use of the Heaviside function; optimization of the abscissa axis in certain areas; use of the linearity test. The obtained mathematical model adequately describes the process of transformation of information indicators, which will allow the process of forecasting changes in medical and biological indicators of operators in the performance of professional duties in aviation, as one of the methods of determining the human factor in a proactive approach in flight safety.

Results. The results of the study can be used during the construction of mathematical models to describe empirical data of this kind.

Conclusions. Experimental studies have suggested recommending the use of three-segment linear regression with jumps as an adequate mathematical model that can be used to formalize the description of empirical data with non-standard structure and can be used in practice to build models for predicting operator dysfunction as one of the causes of adverse events in aviation.

Prospects for further research may be the creation of a multiparameter mathematical model that will predict the violation of the functional state of the operator by informative parameters, as well as experimental study of proposed mathematical approaches for a wide range of practical problems of different nature and dimension.

KEYWORDS: flight safety system, approximation, least squares method, three-segmented linear regression with jumps, abscissa optimization of the jump point, linearity test sample, fractal dimension, quality metric, cluster, sample formation.

ABBREVIATIONS

ALoSP – Acceptable level of safety performance;
AP – Adaptive potential;
DF – Factor of destabilization;
EASA – European Union Aviation Safety Agency;
EC – European Commission;
EPAS – European Plan for Aviation Safety
ERCP – European Regional Safety Plan;
ERCS – European Risk Classification Scheme;
ESARR – Eurocontrol Safety Regulatory Requirement;
KRA – Key risk areas;
SI – Safety issues;
SRM – Safety risk management.

NOMENCLATURE

a is a unknown approximation coefficient;
 b is a unknown approximation coefficient;
 c is a unknown approximation coefficient;

$x_{\text{jump}1}$ is a 1-st abscissa of the jumps cross sections;
 $x_{\text{jump}2}$ is a 2-nd abscissas of the jumps cross sections,
 $h(x)$ is Heaviside function;
 n is the total quantity of empirical data.

INTRODUCTION

Statistical analysis, which uses as empirical data information indicators from unstable objects is one of the most difficult tasks [1, 2]. The use of statistical analysis is closely related to the use of mathematical statistics, spectral analysis, regression and variance analysis, splines, applied geometry, etc. [3–5]. However, the use of empirical data obtained from the transformation of information indicators of unstable objects often cannot be adequately described using standard methods that are widely used, for example, for stable technical objects.

The object of study is the process of approximation of information indicators to determine an adequate model

that can be used in the decision-making process on the functional state of operators

The process of deciding on the state of the object takes a long time due to the need to analyze the information indicators of different informativeness and is often subjective. Therefore, to reduce the time of decision-making and increase its reliability requires the development of a mathematical model that adequately describes the state of the object on the information indicators.

The subject of study is the process of modeling information indicators that can be used to predict changes in the functional state of the operator as one of the triggers of an adverse event in the aviation security management system.

Due to the variability, unpredictability and instability of the object from which the information indicators are obtained, there are many factors influencing the correct choice of the transformation model and the accuracy of estimating the coefficients of the mathematical model. This is due to the fact that such information indicators have structural features and therefore cannot be adequately described by standard methods, therefore, for adequate mathematical modeling it is necessary to approximate the experimentally obtained data using new non-standard approaches. The subject of the study is the process of modeling with non-standard approaches to the approximation of empirical data.

The purpose of the work is to increase the hang the reliability of the use of mathematical methods to describe the functional state change of the operator using transformation information indicator in decision-making system.

1 PROBLEM STATEMENT

The purpose of the EPAS (the European Plan for Aviation Safety (EPAS) – Safety Management at European Level) is to ensure that the principles of safety management are applied within the European Aviation Community so as to continually improve safety performance. Using the Regulation (EU) 2018/1139, known as the European Union Aviation Safety Agency (EASA) Basic Regulation, are fundamental to the continuous improvement of civil aviation safety [6]. It to ensure the application of ICAO safety management principles. The EPAS seeks to anticipate emerging industry safety risks and make best use of technical, mathematical resources and information technology for planning and implementing safety improvement actions. EASA develops the EPAS in close collaboration with the Member States and other relevant stakeholders and is being developed annually and looks ahead to the following four years. There are determined prioritisation of issues and evaluates options to address them on based relevant safety information sources (notably occurrences). It identifies the main areas of concern affecting the European aviation safety system, one such problem is the influence of the human factor [7] (Fig. 1).

The ability of a person to make erroneous or illogical decisions in specific situations, which is referred to as a human factor is associated with limitations or errors that are characteristic of any person moreover psychophysiological characteristics of a operator do not always correspond to the level of complexity of the tasks or problems to be solved. The resolution adopted by the ICAO Assembly on flight safety and the role of the human factor in the interaction with equipment, processes, the environment and interaction with each other is to identify features of human factor assessment as a source of risk [8]. This assessment should be based on a practical solution to safety problems, based on the analysis of erroneous actions of all participants in the human-machine system, which led or could lead to accidents [8]. The goal of a pro-active approach to the human factor is to minimize aviation accidents through erroneous or illogical decisions in non-standart situations human fault. In this regard, the ideology of risk management is developed, which directs the search for ways and determines the early detection of hazards and dangerous factors that occur in the form of certain events, predictors of Fig. 1. [9]. Given that due to a number of circumstances due to the complexity of the process to quickly identify hazards associated with the human factor, proactive approach to assessing the current functional state of the operator will allow to reduce the development of adverse events. The use of mathematical methods to describe and formalize the current functional state of the operator will allow on the basis of the obtained mathematical model to predict the imbalance of the operator, which can cause erroneous decisions. But the mathematical description of such a complex object has a number of difficulties [10]. Often, empirical data obtained in the process of measuring various information indicator describing the current state of the operator rarely have a pronounced pattern and are characterized by a limited amount of data, which complicates the formalization process.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Analysis of literature sources [10–23], specializing in statistical analysis allows us to draw conclusions about the active use of researchers to build multi-segment mathematical models with jumps.

Thus, in [23], researchers used a mathematical model of two linear regression lines for one data set, but the peculiarity of this use was the fact that empirical data were clearly divided into clusters. Based on the research conducted in [23], the author developed a method for constructing two regression lines, but this method has a number of technical difficulties in its practical use for engineering problems.

In books [15, 16] the authors solve the problem of constructing a multistage regression using a fictitious variable. The peculiarity of this study is that the author considers an option in which there is only one jump. While often empirical data may contain a certain number of jumps.

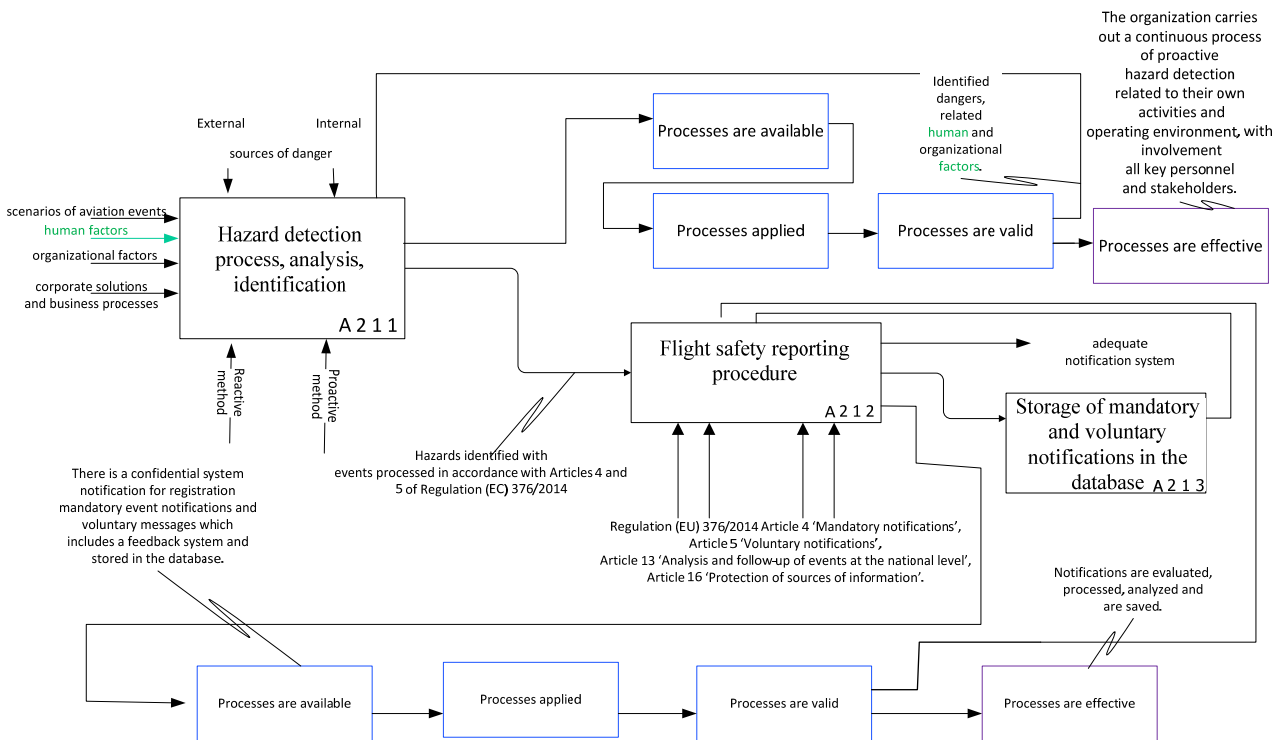


Figure 1 – The place of the human factor in aviation safety management methodologies

So, the results of modern research show that although jump regressions are used, the problems of optimizing the abscissa of the jump point and constructing models with multiple jumps have not been given enough attention.

Therefore, this article solves the urgent scientific, technical and practical problem of constructing a multi-segmented regression with jumps with optimization of the jump point abscissa and using the Heaviside function to obtain the general equation.

3 MATERIALS AND METHODS

The functional purpose of the decision-making system is to ensure the maximum completeness of obtaining information about the parameter of the object by controlled physical quantities correlated with this parameter.

The fact that the primary information after transformation takes the form of quantitative judgments about the state of the object does not prevent us from considering any multi-parameter diagnostic system as an information system.

If we consider a complex object characterized by the Y parameter, then X_1, \dots, X_k are measured physical quantities that reflect the properties of a physical object. Often, Y must be considered as a random variable in a certain sense, which is due to the lack of the possibility of an accurate, metrologically justified reproduction of its given value in the range of A_y of all its possible changes. However, the dispersion of the Y value at any point in the range is a constant value ($\sigma_y^2 = \text{const}$).

Moreover, at the functional level, there is an a priori unknown relationship between the mean value Y and $\{X_i\}$:

$$M[Y] = F(M[X_1], \dots, M[X_k]).$$

In addition, for any of the controlled values there is a conditional density $f(X_i Y | Y_j, \{X_l\}_1^k, l \neq i)$ in addition, for any of the controlled values there is a conditional density, which reflects the stochastic relationship between the X_i value and the remaining controlled values, provided that ($Y = Y_j = \text{const}, j = 1, 2, \dots$). All quantities belong to the set of real numbers, and their number is theoretically considered unlimited, although for technical reasons, the condition $k < \infty$ takes place.

The generalized decision-making structure based on the transformation of measurement information about the Y value based on the measurement of the values of controlled quantities, Fig. 2.

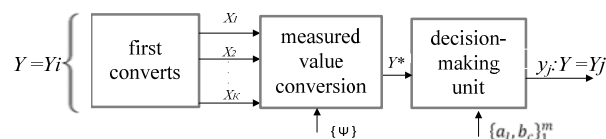


Figure 2 – The generalized decision-making structure

According to the structure in Fig. 2, in order to make a decision about the state of a complex object, it is necessary at the first stage to obtain the value X_1^*, \dots, X_k^* by primary converters, which at the second stage are converted into an estimate Y^* of the value of the parameter Y :

$$Y^* = \hat{F}(X_1, \dots, X_n | a_1, \dots, a_p),$$

where a_1, \dots, a_p – are the coefficients of the mathematical model of transformation. The coefficients a_1, \dots, a_p are estimated at the stage of studying the object according to the sample data of size n for each of the fixed values $Y_j, j = \overline{1, m}$ of the levels of parameter Y (training stage).

Decision making selects one $y_j \{a_l, b_c\}_1^m$ from the set $\{y_l\}_1^m$ of decisions about the value of Y in accordance with the decision selection rule

$$\forall Y^* [Y^* \in (a_j, b_j) \rightarrow Y^* \in Y_j]$$

Figure 2 $\{\psi\}$ indicates the factors that affect the correct choice of the transformation model $\hat{F}(\cdot)$ and the accuracy of estimating the coefficients a_1, \dots, a_p of this model.

The estimate of the amount of information about the parameter Y (assuming that the width Δ of the tolerance intervals $(a_j, b_j), j = \overline{1, k}$ is the same, and their total number is equal to k) is determined by the difference between the initial $H(Y)$ and the conditional entropy $H(Y | Y_j)$:

$$I = H(Y) - H(Y | Y_j).$$

The initial entropy depends on the distribution density $f(y)$ of the value Y in the range A_y :

$$H(Y) = - \sum_{j=1}^k \left[\int_{a_j}^{b_j} f(y) dy \right] \ln \left[\int_{a_j}^{b_j} f(y) dy \right].$$

We find the conditional entropy by the conditional probability $P(Y_i | Y_j)$ that the true value of $M[Y] = Y_j$, while the result of the solution y_j gives the value $Y = Y_j$:

$$H(Y | Y_j) = - \sum_{i=1}^k P(Y_i | Y_j) \ln P(Y_i | Y_j).$$

Assuming the model $\hat{F}(\cdot)$ is represented by linear multiple regression

$$\hat{y} = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i$$

estimation of the coefficients $a_0 \dots a_k$ to give an adequate mathematical model based on empirical data. However, empirical data that can be used to assess the functional state of the operator often have structural features and therefore cannot be adequately described by standard methods.

4 EXPERIMENTS

The construction of a mathematical model was based on empirical data. When it comes to empirical data obtained from biological objects, obtaining the amount of data necessary for reliable statistical processing is always difficult. Therefore, the use of methods that show good predictive performance on small samples are necessary. Also, finding mathematical approaches tested for adequacy based on real data is the main step in the decision-making system. Empirical data were used in the work, which described the dependence of systolic blood pressure and anthropometric characteristics, among which body weight was chosen. The measurements were carried out in male operators of the age group from 25 to 30 years. The measurement results are presented in Table 1.

Table 1 – Empirical data

the first nine									
X	143	149	155	158	159	165	167	168	169
Y	124	125	128	133	128	130	133	132	135
another nine									
X	170	172	174	175	180	180	183	187	190
Y	150	153	149	146	156	156	158	159	150
the rest									
X	192	195	200	210	212	215	235	240	
Y	160	163	148	140	151	150	165	170	

Based on the measured values, a graph was representation for visual interpretation of their results Fig. 3.

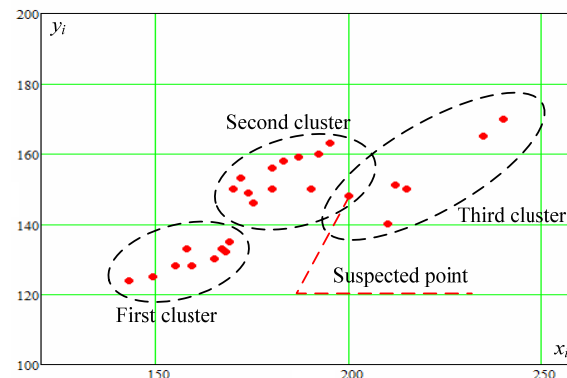


Figure 3 – Distribution of input data into clusters

According to Fig. 3, after visual analysis of the initial data, the following conclusion can be drawn. The distribution of the initial data has a non-standard form, which causes difficulties in their description. Such a description of a single functional dependence with satisfactory accuracy is hampered by the presence of several clusters, which are clearly visible in Fig. 3. (indicated by a dash-dotted line).

As can be seen from Fig. 3, one of the clusters is shifted up relative to the linear trend, which forces to choose non-standard approaches for approximation. One such approach is to use the Heaviside function together with the criterion proposed by Kuzmin [25]. Kuzmin's criterion [25] is used to determine nonlinearity, but in this paper the authors used it to test the mathematical model for adequacy.

Several hypotheses have been put forward in the paper to determine the most adequate mathematical model.

5 RESULTS

Hypothesis 1. Using a simple linear regression.

The least squares method for approximating the function of one variable was used, which allowed to obtain the following regression equation:

$$y(x) = 69.104 + 0.419x.$$

Visualization of the obtained regression equation to approximate the data is shown in Fig. 5.

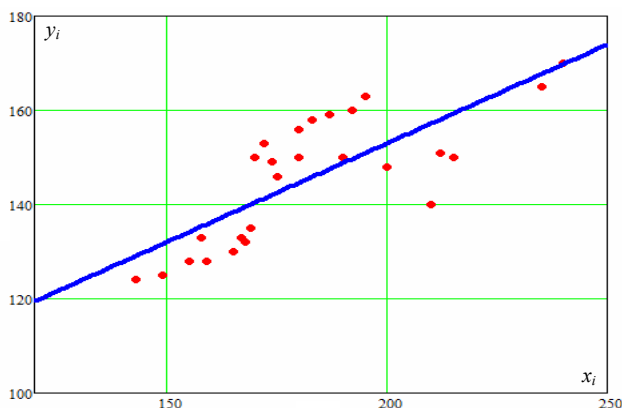


Figure 5 – Approximation by linear regression

The nonlinearity test conducted in this work provided an opportunity to conclude that it is impossible to approximate the data in Table 1 using a single regression line. A sequence of deviations of the data from the line found by the least squares method was found.

The cumulative residual curve is defined as the sum of deviations of data from the line obtained by the method of least squares. Visualization of the results is presented in Fig. 6. Features of the use of the cumulative curve are given in [25].

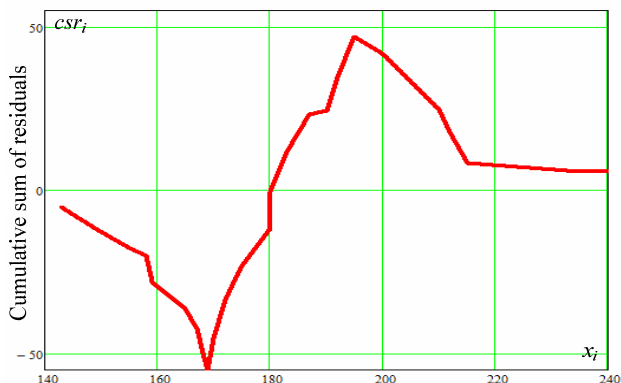


Figure 6 – The cumulative curve of residues (deviations)

Calculation results: range of cumulative residual curve: 101.7; relative range (range to standard deviation ratio): 11.4. Using the table of critical values [26], the

limit value is 10.44 (for a probability of 0.99). Carrying out calculations makes it possible to draw a conclusion about the nonlinearity of data and the impossibility of their approximation by a single linear regression: that is, Hypothesis 1 is rejected.

Hypothesis 2. Using the second order parabola.

The second hypothesis suggests the possibility of using as a mathematical model to approximate the data of the parabola function of the second order:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2,$$

where a_0 , a_1 , a_2 are unknown coefficients of the mathematical model.

Using empirical data using the least squares method, the unknown coefficients of the mathematical model were determined, which allowed the equation to be written as follows:

$$y(x) = -112.77 + 2.36x - 5.09 \cdot 10^{-3}x^2.$$

The results of the second-order parabolic approximation are shown in Fig. 7.

As can be seen from Fig. 7, the curve tends to decrease after passing the extremum, while this contradicts the nature of the change in empirical data. An analysis of the results obtained indicates the need to build a more accurate approximation. Hypothesis 2 is rejected.

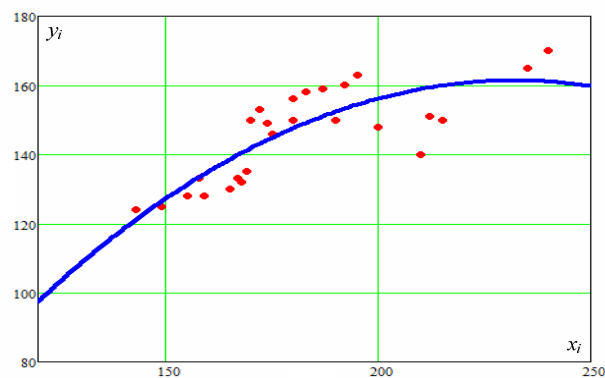


Figure 7 – Approximation by the second order parabola

Hypothesis 3. Using the third order parabola.

An analysis of the results obtained in the study of the second hypothesis allows us to put forward a new hypothesis about the possibility of using a third order parabola to describe empirical data:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3,$$

where a_0 , a_1 , a_2 , a_3 are unknown coefficients of the mathematical model.

Similarly, the unknown coefficients of approximation are found. As a result, we obtain the equation

$$y(x) = -1112 + 18.48x - 0.09x^2 + 1.49 \cdot 10^{-4}x^3.$$

The results of the third ordera parabolic approximation are shown in Fig. 8.

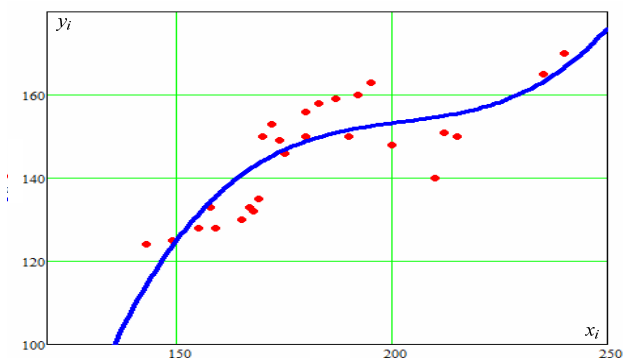


Figure 8 – Approximation initial data by the third ordera parabola

Visual analysis of the graph in Fig. 8 shows the discrepancy between the obtained approximating curve and the empirical data. This discrepancy is especially manifested at the beginning and at the end of the graph, which does not correspond to the physical properties of changes in systolic pressure. All this does not allow us to accept the hypothesis about the possibility of using the third-order parabola function as a mathematical model for describing the change in the values of the processed empirical data. The data approximation curve using the third-order parabola function is shown in Fig. 8

Hypothesis 4. Using of a three-segmented linear regression with jumps.

After carrying out the analysis and analysis of hypotheses 1..3, the authors is a precondition for choosing of a three-segment linear regression with lines for approximating empirical data.

As shown in Fig. 3 empirical data can be divided into three clusters. The first cluster is filled by points 1 to 9 (Table 1). But the second and third clusters have a questionable point with coordinates (200; 148). The importance of the correct hit of the point in the corresponding cluster significantly affects both the accuracy of the approximation and, accordingly, the quality of the forecast, which will be carried out according to the obtained mathematical model. To determine the location of this point in the corresponding cluster, the following calculations were performed.

Due to the lack of data for calculating the angle of inclination within each segment, it is assumed that these angles are the same, which simplifies the calculations when building a mathematical model.

Incorrect assignment of questionable point to any clusters can significantly affect the approximation accuracy, as well as the prediction quality. We make the assumption that the slope angles inside each segments of the poly-segmented regression are the same to simplify the calculations when constructing a mathematical model. General view of the equation of three-segment linear regression with jumps:

$$y(x) = a_0 + a_1x + a_2h(x - x_{\text{jump}1}) + a_3h(x - x_{\text{jump}2}),$$

where a_0, a_1, a_2, a_3 are unknown coefficients of the mathematical model, $x_{\text{jump}1}, x_{\text{jump}2}$ are abscissas of the jumps cross sections, $h(x)$ is Heaviside function.

The system of normal equations for finding the unknown approximation coefficients is given below:

$$\begin{cases} a_0n + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}1}) + a_3 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}2}) = \sum_{i=1}^n y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i h(x - x_{\text{jump}1}) + a_3 \sum_{i=1}^n x_i h(x - x_{\text{jump}2}) = \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}1}) + a_1 \sum_{i=1}^n x_i h(x - x_{\text{jump}1}) + a_2 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}1}) + a_3 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}2}) = \sum_{i=1}^n y_i h(x - x_{\text{jump}1}), \\ a_0 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}2}) + a_1 \sum_{i=1}^n x_i h(x - x_{\text{jump}2}) + a_2 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}2}) + a_3 \sum_{i=1}^n h(x - x_{\text{jump}2}) = \sum_{i=1}^n y_i h(x - x_{\text{jump}2}). \end{cases} \quad (1)$$

where n is the total quantity of empirical data.

The solution of system of normal equations allows to determine unknown coefficients.

As can be seen from Fig. 3, the first cluster is clearly defined, and the abscissa of the cross section of the first jump $x_{\text{jump}1}$ can be calculated as the sum of the two limit values of the first and second clusters:

$$x_{\text{jump}1} = \frac{x_9 + x_{10}}{2} = 169.5.$$

The stages of optimization calculations to determine the boundary between clusters are given below.

Step 1. The calculation of five options for the abscissa of the second jump. To do this, determine the limit of change of the abscissa axis. Based on the visual analysis, the boundary of the abscissa variation $x_{\text{jump}2}$ change is determined, and the abscissa of the second jump section has the following values $x_{\text{jump}2} = \{188, 194, 200, 206, 212\}$.

Step 2. The calculation of the unknown coefficients of the regression model a_0, a_1, a_2, a_3 for the values of obtained abscissa variation x_{jump2} in stage 1 is performed. The results of the calculations are shown in Table 2.

Table 2 – Calculations of approximation coefficients

x_{jump2}	188	194	200	206	212
a_0	83.13	71.51	46.16	58.23	113.89
a_1	0.293	0.366	0.525	0.449	0.100
a_2	18.21	16.21	12.99	13.46	20.22
a_3	-7.61	-11.22	-19.99	-16.43	4.61

Step 3. The sum of squares of deviations for each variant of three-level regression with jumps according to the following formula is calculated:

$$S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n y_i^2 - a_0 \sum_{i=1}^n y_i - a_1 \sum_{i=1}^n x_i y_i - a_2 \sum_{i=1}^n y_i h(x - x_{jump1}) - a_3 \sum_{i=1}^n y_i h(x - x_{jump2}).$$

The obtained data are given in Table 3.

Table 3 – The sum of the squared deviations for various variants of the approximation function

x_{jump2}	188	194	200	206	212
S_{Σ}	721.028	641.642	322.882	531.575	807.057

Step 4. The optimization of the data values from table 3 is performed on the basis of the least squares method [27]. The resulting equation has the form:

$$S_{\Sigma}(x_{jump2}) = 9841 - 980.863x_{jump2} + 2.455x_{jump2}^2.$$

The optimal abscissa of the second section of the jump has the following form (in the case when the first derivative of this equation is zero):

$$x_{jump2opt} = 199.7896.$$

It can be concluded that the 21st point (with coordinates (200; 148)) of empirical data belongs to the third cluster. This partition optimization technique can be used as a special approach to data clustering.

As a result of using the usual least squares method, the final optimal three-segment linear regression with jumps is searched for. We obtain the final equation:

$$y(x) = 46.160 + 0.525x + 12.997h(x - 169.5) - 19.992h(x - 199.79).$$

A graphical representation of the final approximation is shown in Fig. 9.

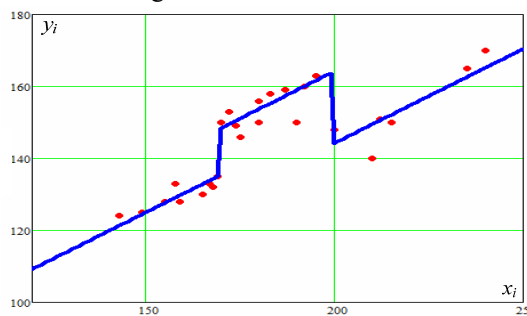


Figure 9 – Approximation by the final three-segmented linear regression with jumps

A comparative analysis of the four approximation methods considered above is performed. The coefficient of adequacy and standard deviation values were calculated to determine a mathematical model that adequately describes the empirical data of Table 1 and can be used in the decision-making system.

Calculating the amplitude of the cumulative residual curve and the standard deviation is the relative maximum range, which is defined as the adequacy factor. Despite the fact that criterion [25] is used to verify the data on nonlinearity in this article, it was used for testing adequacy. was originally planned to test empirical data for non-linearity. However, studies have shown that in some cases it can be used for testing adequacy, it was done in this article.

The calculation results are given in Table 4. As can be seen from table 4, linear regression with jumps has lower values of standard deviation and adequacy ratio: for example 3.6 and 4.05 compared to 7.5 and 8.4 (compared to single third order parabola).

It indicates that the special approximation proposed by the authors in the form of a three-segmented linear regression with jumps is the is a more reliable mathematical model for describing studied variant empirical data.

Table 4 – Comparative table of approximation results

Approximation type	Coefficients number	Standard deviation	Adequacy coefficient
Single linear regression	2	8.920	11.420
Single second order parabola	3	8.097	8.744
Single third order parabola	4	7.558	8.396
Three segmented linear regression with jump	4	3.668	4.050

At the same time have proposed a special approximation in the form of a trisegment linear regression with stripes, which is promising for selection in the formalization of the process of describing of biological parameters.

6 DISCUSSION

As can be seen from Fig. 1, real empirical data obtained from non-standard objects with stochastic influence are difficult to approximate by standard methods. So, using 3 methods of linear regression, it was not possible to achieve an adequacy coefficient below 8.3.

This gave impetus to finding standard approaches for approximating empirical data. The importance of a reliable approximation of empirical data obtained from real biological data is related to the content in these values of an important component that can serve as an indicator of a violation of the functional state of a biological object and plays an important role in making a decision about the state of the operator as a possible trigger in aviation safety management.

The use of standard methods leads to the formation of approximation functions, which often contradict the physical processes that form empirical data obtained from biological objects or inaccurately describe the pattern of their behavior (Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8). This is due to the fact that the distribution of values obtained from biological objects often cannot be described by standard mathematical models, because the behavior of parameter values that describe biological objects is influenced by many factors of both external and internal nature. Therefore, the description of such complex objects must be carried out with the maximum similarity of the approximating curve to real values. Also, a feature of the empirical data of biological objects is their non-linearity. The use of data clustering methods also has its own difficulties in determining the belonging of doubtful points that can be attributed to different classes (suspected point Fig. 3).

Another reason may be that points located on the outer boundaries of classes, but not important for the separation of adjacent classes, can be recognized as individually significant if their belonging to classes is neglected. Point characterize separately the properties of an instance as informative with respect to external and internal boundaries which is their specific in tasks of visualization and data analysis.

It should also be noted that obtaining adequate coefficients of a mathematical model significantly affects its reliability. It has been established that an increase in the coefficients of mathematical models of various forms of approximation increases the value of the adequacy coefficient.

The methodology for calculating the information content indicators of individual specimens not only quantitatively, but also qualitatively affects the formed sample. Therefore, the paper presented a methodology for determining the boundaries of clusters, which should be performed taking into account the complexity of describing specific empirical data.

The closest analogue of the proposed method is the nonlinearity test proposed in [25]. In contrast to those proposed in this paper, this technique was also used to check for the adequacy of the approximation of the mathematical model.

At the same time have proposed a special approximation in the form of a trisegment linear regression with stripes, which is promising for selection in the formalization of the process of describing of biological parameters.

CONCLUSIONS

The article is devoted to the approximation of empirical data. In general, four data approximation options were considered: a single linear regression, the second order parabola, the third order parabola, three-segmented linear regression with jumps.

Analysis of empirical data obtained from biological objects indicates their unusual structure, which cannot be correctly described by standard methods, which became a prerequisite for the use of non-standard approximating function – three-segment linear regression with jumps.

The equation for three-segment linear regression with jumps was obtained using the following methods: using the Heaviside function, determining the minimum sum of squares of deviations for the whole set of empirical data simultaneously, optimizing the abscissa cross section, using the linearity test.

The scientific novelty of obtained results is that the method of approximating empirical data was previously proposed, which characterizes the relevance of the biological parameters of the operator for the three-segment linear regression with lines. The use of this method allows us to take a more reliable result of the formalization of the fallibility of biological parameters, which was demonstrated on specific butts. The variation of the optimization of the position of the sections can serve as a new approach to the clustering of data and it allows to take into account the fallow of the empirical data. Data can be compared to change the parameter of the cardiovascular system according to changes in anthropometric data for the prognosis.

The calculations showed that the standard deviation and the adequacy coefficient for a three-segmented linear regression with jumps are more than two times better than other approximation methods. This corroborates the necessity for a three-segmented linear regression with jumps.

The results of the study can be used during the construction of mathematical models to describe empirical data of this kind.

The practical significance of obtained results is that the software realizing the proposed indicators is developed, as well as experiments to study their properties are conducted. The experimental results allow to recommend the proposed indicators for use in practice, as well as to determine effective conditions for the application of the proposed indicators.

Prospects for further research are to study the proposed set of indicators for a broad class of practical problems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author expresses gratitude to Yevhen Romanenko, Doctor of Public Administration Professor Vice-Rector for Research for support and a fruitful paper discussion. The work is supported by the state budget scientific research project National Aviation University “Development of methods and conducting flight certification tests of the complex of civil aviation aircraft” code 395-MX-05/07 (state registration number 0121U114093).

REFERENCES

1. Kuzmin V., Zaliskyi M., Odarchenko R., Ivanets O., Shcherbyna O. Method of Probability Distribution Fitting for Statistical Data with Small Sample Size, *10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2020: proceedings.* – Degendorf, Germany, 2020, pp. 221–224. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208842
2. Himmelblau D. M. Process analysis by statistical methods. NY, John Wiley and Sons, 1970, 958 p.
3. Shchapov P.F., Ivanets O. B., Sevryukova O. S. Dynamic properties of the time series of results of biomedical measurements, *Science-intensive technologies*, 2020, Vol. 2 (46), pp. 236–244. DOI: 10.18372 / 2310-5461.46.14811.
4. Ivanets O., Morozova I. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters, *11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021: proceedings.* Degendorf, Germany, 2021, pp. 159–162. DOI: 10.1109 /ACIT52158.2021.9548579.
5. Eremenko V. S., Burichenko M. Yu., Ivanets O. B. Method of processing the results of measurements of medical indicators, *Science-intensive technologies*, 2020, Vol 47, No. 3, pp. 392–398. DOI: 10.18372 / 2310-5461.47.
6. Annex 18 – The Safe Transport of Dangerous Goods by Air. 999 Robert-Bourassa Boulevard. Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7 <http://caa.gov.by/uploads/files/ICAO-Pr19-ru-izd-2-2016.pdf>
7. Arcúrio Michelle Security Culture and Human Factors . Global Aviation Security Symposium (AVSEC2020). Virtual Symposium is Improving Security Culture by Connecting the Dots. 18 december 2020, proceedings, ICAO, 2020.
8. THE EUROPEAN PLAN for AVIATION SAFETY (EPAS 2020–2024) https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EPAS_2020-2024.pdf
9. Khrashchevsky R. V., Ivanets O. B. Features of a proactive approach in the flight safety syste, *Science-intensive technologies*, 2021, Vol. 52, No. 4, pp. 364–372. ISSN 2075-078.
10. Novitsky P. V., Zograf I. A. Error estimation of measurement results. Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 304 p. [In Russian].
11. Demidenko E. Z. Linear and nonlinear regression. Moscow: Finance and Statistics, 1981, 302 p. [In Russian].
12. Mordecai Ezekiel, Fox K. Method of correlation and regression analysis, *Linear and curvilinear*. New York, John Wiley and Sons, 1959, 548 p.
13. Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov E. Applied linear regression analysis, *Finance and Statistics*, 1987, 240 p. [In Russian].
14. Draper N., Smith G. Applied regression analysis Book 1, *In 2 book*. Moscow, Finance and Statistics, 1986, 366 p. [In Russian].
15. Draper N., Smith G. Applied regression analysis Book 2, *In 2 book*. Moscow, Finance and Statistics, 1986, 351 p. [In Russian].
16. Romanenko Ye. O., Chaplay I. V. The essence and specifics of the services marketing system in the mechanisms of public administration, *Actual Problems of Economics*, 2016, No. 12, pp. 81–89. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ape_2016_12_11.
17. Jonhson N., Leone F. Statistical and experimental design, *Engineering and the Physical Science*. New York-London-Sidney-Toronto, Wiley and Sons, 1977, Vol. 2, second ed.
18. Ostroumov I. V., Kuzmenko N. S. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation, *International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control*. Kyiv, Ukraine, 2016, pp. 291–294. DOI: 10.1109/MSNMC.2016.7783164.
19. Kuzmin V. M., Zaliskyi M. Yu., Odarchenko R. S., Petrova Y. V. New approach to switching points optimization for segmented regression during mathematical model building, *CEUR Workshop Proceedings*, 2022, Vol. 3077, pp. 106–122.
20. Zaliskyi M., Petrova Y., Asanov M. and Bekirov E. Statistical Data Processing during Wind Generators Operation, *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications*, 2019, Vol. 8, No. 1, pp. 33–38, DOI:10.18178/ijeetc.8.1.33-38.
21. Ostroumov I. V., Kuzmenko N.S. Accuracy Improvement of VOR/VOR Navigation with Angle Extrapolation by Linear Regression, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2019, Vol. 78, No. 15, pp. 1399–1412. doi:10.1615/TelecomRadEng.v78.i15.90.
22. Hald A. Mathematical statistics with technical applications. Moscow, Publishing house of foreign. lit., 1956, 642 p. [In Russian].
23. Brownley K. A. Statistical theory and methodology in science and technology. Moscow, Nauka, 1977, 408 p. [In Russian].
24. Kuzmin V. N., Bidyuk P. I. Analysis of stochastic process with jumps under conditions of heteroscedasticity, *International conference on Stochastic analysis and random dynamics*. Lviv, 2009, June 14–20, proceedings, pp. 136–138.
25. Kuzmin V. N. New Statistical Method for Identification of Nonlinearity of Empirical Data, *Computer data analysis and modeling: proceedings of the Fifth International Conference, June, 8–12, 1998*. Minsk, Volume 1: A–M, pp. 159–164.
26. Kuzmin V. M., Solomentsev O. V., Zaliskiy M. Yu. The use of multi-segmented regression to assess the durability of the systems structural elements, *Problems of informatization and management*, 2016, Vol. 53, No. 1, pp. 42–45. [In Russian].
27. Reklaitis G. V., Ravindran A., Ragsdell K.M. Engineering optimization. Methods and applications. New York, John Wiley and sons, 1983, 688 p.

Accepted 26.05.2022.
Received 23.08.2022.

УДК 004.93

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЮВАННЯ НА ОСНОВІ ТРИ СЕГМЕНТНОЇ ЛІНІЙНОЇ РЕГРЕСІЇ ЗІ СТРИБКАМИ

Кузьмін В. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікацій та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Хращевський Р. В. – д-р техн. наук, професор, перший проректор Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Кулик М. С. – д-р техн. наук, професор, декан аерокосмічного факультету Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Іванець О. Б. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроніки, робототехніки, технологій моніторингу та Інтернету речей, Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Заліський М. Ю. – д-р техн. наук, доцент кафедри телекомунікацій та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

Петрова Ю. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри телекомунікацій та радіоелектронних систем Національного авіаційного університету, Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проблема апроксимації емпіричних даних у системі прийняття рішень в управлінні безпекою. Об'єктом дослідження була перевірка адекватних коефіцієнтів математичної моделі для апроксимації даних за допомогою інформаційних технологій. Метою роботи є створення адекватної математико-матичної моделі з використанням інформаційних технологій на основі аналізу різних підходів до апроксимації емпіричних даних, які можуть бути використані для прогнозування поточного стану оператора в системі безпеки польотів. Аналіз літератури показав, що метод найменших квадратів часто використовується в задачах апроксимації навіть у тих випадках коли досліджуваний набір даних різко змінює геометричну структуру. У статті аналізуються статистичні дані з незвичайною структурою. Для побудови математичної моделі для їх опису висувуються чотири гіпотези: опис за допомогою однієї лінійної регресії, параболою другого порядку, параболою третього порядку, трисегментної лінійної регресії зі стрибками. Проведені розрахунки та візуальний аналіз відхили перші три гіпотези та четверта гіпотеза про можливість опису емпіричних даних за допомогою три сегментної лінійної регресії була детально розглянута. Під час побудови трисегментної лінійної регресії зі стрибками оптимізували абсцис перерізу стрибка. Отримання аналітичного виразу для трисегментної лінійної регресії зі стрибками стало можливим завдяки використанню функції Хевісайда. Аналіз показав перевагу трисегментної лінійної регресії зі стрибками з точки зору точності апроксимації та надійності передбачення.

Метод. Проведено порівняльний аналіз опису трансформації інформаційних показників нестандартної структури. Для порівняння вибрано такі моделі перетворення інформаційних показників з подібним візуальним відображенням: параболи другого і третього порядку, одиночна регресія та регресія зі стрибками. Запропоновано використовувати нові підходи для апроксимації, засновані на використанні критерію, запропонованого Кузьмінім, та функції Хевісайда. За цими критеріями було перевірено адекватність апроксимації, що дозволило вибрати адекватну математичну модель для опису перетворення інформаційних показників. Етапи отримання математичної моделі були такими: визначення мінімальної суми квадратів відхилень за всіма інформаційними показниками одночасно; використання функції Хевісайда; оптимізація осі абсцис на окремих ділянках; використання тесту на лінійність. Отримана математична модель адекватно описує процес перетворення інформаційних показників, що дозволить здійснювати процес прогнозування зміни медико-біологічних показників експлуатантів при виконанні професійних обов'язків в авіації, як один із методів визначення людського фактора в авіації. ініціативний підхід до безпеки польотів.

Результати. Результати дослідження можуть бути використані під час побудови математичних моделей для опису емпіричних даних такого роду.

Висновки. Експериментальні дослідження довели можливість використання трьохсегментної лінійної регресії зі стрибками як адекватної математичної моделі, яка може бути використана для формалізації опису емпіричних даних з нестандартною структурою та може бути використана на практиці для побудови моделей для прогнозування функціонального стану оператора як однієї з причин несприятливих подій в авіації.

Перспективами подальших досліджень може бути створення багатопараметричної математичної моделі, яка дозволить прогнозувати порушення функціонального стану оператора за інформативними параметрами, а також експериментальне вивчення запропонованих математичних підходів для широкого кола практичних задач різного характеру та розмірності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: система безпеки польоту, апроксимація, метод найменших квадратів, трисегментна лінійна регресія зі стрибками, оптимізація точки стрибка по абсцисах, тестовий зразок лінійності, фрактальна розмірність, метрика якості, кластер, формування вибірки.

УДК 004.93

ПОСТРОЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ТРЕХСЕГМЕНТНОЙ ЛИНЕЙНОЙ РЕГРЕССИИ С СКАЧКАМИ

Кузьмин В. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникаций и радиоэлектронных систем Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Хращевский Р. В. – д-р техн. наук, профессор, первый проректор Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Кулик М. С. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой аэрокосмического факультета Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Иванец О. Б. – канд. техн. наук, доцент кафедры электроники, робототехники, технологий мониторинга и Интернета вещей Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Залиский М. Ю. – д-р техн. наук, доцент кафедры телекоммуникаций и радиоэлектронных систем Национального авиационного университета, Киев, Украина.

Петрова Ю. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры телекоммуникаций и радиоэлектронных систем Национального авиационного университета, Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проблема аппроксимации эмпирических данных в системе принятия решений в управлении безопасностью полетов. Объектом исследования является проверка на адекватность коэффициентов математической модели для аппроксимации данных с помощью информационных технологий. Целью работы является разработка адекватной математической модели с использованием информационных технологий на основе анализа разных подходов к аппроксимации эмпирических данных, которые могут быть использованы для прогнозирования функционального состояния оператора в системе безопасности полетов. Анализ литературы показал, что метод наименьших квадратов часто используется в задачах аппроксимации даже в тех случаях, когда исследуемый набор данных резко меняет геометрическую структуру. В статье анализируются статистические данные с необычной структурой. Для построения математической модели для их описания выдвигаются четыре гипотезы: описание с помощью простой линейной регрессией, параболой второго порядка, параболой третьего порядка, три сегментной линейной регрессии со скачками. Проведенные расчеты и визуальный анализ опроверг первые три гипотезы, а четвертая гипотеза про возможность описания эмпирических данных с помощью три сегментной линейной регрессии был детально рассмотрен. Во время построения три сегментной линейной регрессии со скачками была оптимизирована абсцисса сечения скачка. Полученный аналитический вид для трисегментной линейной регрессии со скачками стал возможным благодаря использованию функции Хэвисайда. Проведенный анализ подтвердил гипотезу о возможности использования трисегментной регрессии со скачками в сравнении с рассмотренными первыми тремя гипотезами. Анализ показав преимущество использования три сегментной линейной регрессии со скачками за параметрами точности аппроксимации и прогноза.

Метод. Предлагаются четыре варианта аппроксимации данных с нестандартной структурой, а именно: одиночная линейная регрессия; парабола второго порядка; парабола третьего порядка; трисегментная линейная регрессия со скачками. Предлагается использовать новые подходы для аппроксимации, основанные на использовании критерия, предложенного Кузьминым, и функции Хэвисайда. Проверка адекватности аппроксимации по этим критериям позволит определить адекватную математическую модель для описания информационных параметров. Для получения математической модели использовались следующие подходы: определение минимальной суммы квадратов отклонений для всего набора данных одновременно; использование функции Хэвисайда; оптимизация оси абсцисс прыжкового участка; использование теста на линейность. Данная математическая модель позволит осуществлять процесс прогнозирования изменений функционального состояния эксплантата при выполнении профессиональных обязанностей в авиации, как основного триггера человеческого фактора в парадигме про активного подхода в обеспечении безопасности полетов.

Результаты. Результаты исследования могут быть использованы при построении математических моделей для описания эмпирических данных подобного рода.

Выводы. Эксперименты подтвердили адекватность использования трисегментной линейной регрессии со скачками для задачи описания эмпирических данных с нестандартной структурой и позволили рекомендовать ее к использованию на практике для решения задач формализации описания изменений функционального состояния эксплуатанта как часть человеческого фактора в системе безопасности полетов.

Перспективами дальнейших исследований может быть создание математической модели прогнозирования изменения функционального состояния оператора при различных дестабилизирующих факторах, а также экспериментальное изучение предложенных показателей на более сложных практических задачах разного характера и размерности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: система безопасности полетов, аппроксимация, метод наименьших квадратов, трисегментная линейная регрессия со скачками, абсциссная оптимизация точки скачка, тестовая выборка линейности, фрактальная размерность, метрика качества, кластер, формирование выборки.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Method of Statistical Data with Small Sample Size / [V. Kuzmin, M. Zaliskyi, R. Odarchenko et al.] // 10th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2020: proceedings. – Deggendorf, Germany, 2020. – P. 221–224. DOI: 10.1109/ACIT49673.2020.9208842
2. Himmelblau D. M. Process analysis by statistical methods / D. M. Himmelblau. – NY : John Wiley and Sons, 1970. – 958 p.
3. Shchapov P. F. Dynamic properties of the time series of results of biomedical measurements / P. F. Shchapov, O. B. Ivanets, O. S. Sevryukova // Science-intensive technologies, 2020. – Vol. 2 (46). – P. 236–244. DOI: 10.18372 / 2310-5461.46.14811.
4. Ivanets O. Features of Evaluation of Complex Objects with Stochastic Parameters / O. Ivanets, I. Morozova // 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies, ACIT 2021: proceedings. – Deggendorf, Germany. – 2021. – P. 159–162. DOI: 10.1109 /ACIT52158.2021.9548579.
5. Eremenko V. S. Method of processing the results of measurements of medical indicators / V. S. Eremenko, M. Yu. Burichenko, O. B. Ivanets // Science-intensive technologies. – 2020. – Vol. 47, № 3. – P. 392–398. DOI: 10.18372 / 2310-5461.47.
6. Annex 18 – The Safe Transport of Dangerous Goods by Air. 999 Robert-Bourassa Boulevard, Montréal, Quebec, Canada H3C 5H7 <http://caa.gov.by/uploads/files/ICAO-Pr19-ru-izd-2-2016.pdf>

7. Arcúrio Michelle Security Culture and Human Factors . Global Aviation Security Symposium (AVSEC2020). Virtual Symposium is Improving Security Culture by Connecting the Dots. 18 december 2020: proceedings. – ICAO, 2020.
8. THE EUROPEAN PLAN for AVIATION SAFETY (EPAS 2020-2024) https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/EPAS_2020-2024.pdf
9. Khrashchevsky R. V. Features of a proactive approach in the flight safety syste / R. V. Khrashchevsky, O. B. Ivanets // Science-intensive technologies. – 2021. – Vol. 52, № 4. – P. 364–372. ISSN 2075-078.
10. Novitsky P. V. Error estimation of measurement results. / P. V. Novitsky, I. A. Zograf. – Leningrad : Energoatomizdat, 1991. – 304 p. [In Russian].
11. Demidenko E. Z. Linear and nonlinear regression / E.Z. Demidenko. – Moscow : Finance and Statistics, 1981. – 302 p. [In Russian].
12. Mordecai Ezekiel. Method of correlation and regression analysis / M. Ezekiel, K. Fox // Linear and curvilinear. – New York : John Wiley and Sons, 1959. – 548 p.
13. Vuchkov I. Applied linear regression analysis / I. Vuchkov, L. Boyadzhieva, E. Solakov // Finance and Statistics. – 1987. – 240 p. [In Russian].
14. Draper N. Applied regression analysis Book 1/ N. Draper, G. Smith // In 2 book. – Moscow : Finance and Statistics, 1986. – 366 p. [In Russian].
15. Draper N. Applied regression analysis Book 2/ N. Draper, G. Smith // In 2 book. – Moscow : Finance and Statistics, 1986. – 351 p. [In Russian].
16. Romanenko Ye. O. The essence and specifics of the services marketing system in the mechanisms of public administration / Ye. O. Romanenko, I. V. Chaplay // Actual Problems of Economics. – 2016. – № 12. – P. 81–89. http://nbuv.gov.ua/UJRN/ape_2016_12_11.
17. Jonhson N. Statistical and experimental design / N. Jonhson, F. Leone // Engineering and the Physical Science. New York-London-Sidney-Toronto : Wiley and Sons, 1977. – Vol. 2, second ed.
18. Ostroumov I. V. Accuracy estimation of alternative positioning in navigation / I. V. Ostroumov, N. S. Kuzmenko // International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control. – Kyiv, Ukraine. – 2016. – P. 291–294. doi:10.1109/MSNMC.2016.7783164.
19. New approach to switching points optimization for segmented regression during mathematical model building / [V. M. Kuzmin, M. Yu. Zaliskiy, R. S. Odarchenko, Y. V. Petrova] // CEUR Workshop Proceedings. – 2022. – Vol. 3077. – P. 106–122.
20. Statistical Data Processing during Wind Generators Operation. / [Zaliskiy M., Petrova Y., Asanov M. and Bekirov E.] // International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications. – 2019. – Vol. 8, No. 1. – P. 33–38, DOI:10.18178/ijetc.8.1.33-38.
21. Ostroumov I. V. Accuracy Improvement of VOR/VOR Navigation with Angle Extrapolation by Linear Regression / I. V. Ostroumov, N. S. Kuzmenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2019. – Vol. 78, № 15. – P. 1399–1412. DOI:10.1615/TelecomRadEng.v78.i15.90.
22. Hald A. Mathematical statistics with technical applications / A. Hald. – Moscow, Publishing house of foreign. lit., 1956. – 642 p. [In Russian].
23. Brownley K. A. Statistical theory and methodology in science and technology / K. A. Brownley. – Moscow : Nauka, 1977. – 408 p. [In Russian].
24. Kuzmin V. N. Analysis of stochastic process with jumps under conditions of heteroscedasticity / V. N. Kuzmin, P. I. Bidyuk // International conference on Stochastic analysis and random dynamics. – Lviv, 2009, June 14–20, proceedings. – P. 136–138.
25. Kuzmin V. N. New Statistical Method for Identification of Nonlinearity of Empirical Data / V. N. Kuzmin // Computer data analysis and modeling: proceedings of the Fifth International Conference. June, 8–12, 1998. – Minsk, Volume 1: A-M. – P. 159–164.
26. Kuzmin V. M. The use of multi-segmented regression to assess the durability of the systems structural elements / V. M. Kuzmin, O. V. Solomentsev, M. Yu. Zaliskiy // Problems of informatization and management. – 2016. – Vol. 53, № 1. – P. 42–45. [In Russian].
27. Reklaitis G. V. Engineering optimization. Methods and applications. / G. V. Reklaitis, A. Ravindran, K. M. Ragsdell. – New York : John Wiley and sons, 1983. – 688 p.

OUTLIER DETECTION TECHNIQUE FOR HETEROGENEOUS DATA USING TRIMMED-MEAN ROBUST ESTIMATORS

Shved A. V. – Dr. Sc., Associate professor, Associate professor of Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.

Davydenko Ye. O. – PhD, Associate professor, Head of Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Fortunately, the most commonly used in parametric statistics assumptions such as normality, linearity, independence, are not always fulfilled in real practice. The main reason for this is the appearance of observations in data samples that differ from the bulk of the data, as a result of which the sample becomes heterogeneous. The application in such conditions of generally accepted estimation procedures, for example, the sample mean, entails the bias increasing and the effectiveness decreasing of the estimates obtained. This, in turn, raises the problem of finding possible solutions to the problem of processing data sets that include outliers, especially in small samples. The object of the study is the process of detecting and excluding anomalous objects from the heterogeneous data sets.

Objective. The goal of the work is to develop a procedure for anomaly detection in heterogeneous data sets, and the rationale for using a number of trimmed-mean robust estimators as a statistical measure of the location parameter of distorted parametric distribution models.

Method. The problems of analysis (processing) of heterogeneous data containing outliers, sharply distinguished, suspicious observations are considered. The possibilities of using robust estimation methods for processing heterogeneous data have been analyzed. A procedure for identification and extraction of outliers caused by measurement errors, hidden equipment defects, experimental conditions, etc. has been proposed. The proposed approach is based on the procedure of symmetric and asymmetric truncation of the ranked set obtained from the initial sample of measurement data, based on the methods of robust statistics. For a reasonable choice of the value of the truncation coefficient, it is proposed to use adaptive robust procedures. Observations that fell into the zone of smallest and lowest ordinal statistics are considered outliers.

Results. The proposed approach allows, in contrast to the traditional criteria for identifying outlying observations, such as the Smirnov (Grubbs) criterion, the Dixon criterion, etc., to split the analyzed set of data into a homogeneous component and identify the set of outlying observations, assuming that their share in the total set of analyzed data is unknown.

Conclusions. The article proposes the use of robust statistics methods for the formation of supposed zones containing homogeneous and outlying observations in the ranked set, built on the basis of the initial sample of the analyzed data. It is proposed to use a complex of adaptive robust procedures to establish the expected truncation levels that form the zones of outlying observations in the region of the lowest and smallest order statistics of the ranked dataset. The final level of truncation of the ranked dataset is refined on the basis of existing criteria that allow checking the boundary observations (minimum and maximum) for outliers.

KEYWORDS: outliers, robust estimates, trimmed mean, symmetric and asymmetric truncation.

NOMENCLATURE

X is an initial data set;
 X^* is an ordered sample, constructed on the basis of X ;
 n is a data sample size;
 $x_{(i)}$ is an order statistics from the data set X^* ;
 α is a trimming proportion;
 α_L is a trimming proportion of smallest order statistics of X^* (an asymmetric case);
 α_U is a trimming proportion of largest order statistics of X^* (an asymmetric case);
 ε is a proportion of outliers;
 $L(\alpha)$ is an average of $[an]$ smallest order statistics of X^* ;
 $U(\alpha)$ is an average of $[an]$ largest order statistics of X^* ;
 $M(\alpha)$ is an average of $[an]$ middle order statistics of X^* ;
 Es_{sym} is a group of robust estimators based on symmetric trimming;
 Es_{asym} is a group of robust estimators based on asymmetric trimming;
 $T_j(\alpha)$ is a symmetric trimmed mean obtained in accordance with the selected adaptive robust estimator;

$T_j(\alpha_L, \alpha_U)$ is an asymmetric trimmed mean obtained in accordance with the selected adaptive robust estimator;
 $e_{T_j(\alpha)}$ is a standard error of the symmetric trimmed mean;
 $e_{T_j(\alpha_L, \alpha_U)}$ is a standard error of the asymmetric trimmed mean;
 A_l is a set of possible truncation levels;
 $u_{(i)}$ is a statistics of Smirnov criterion;
 u_α is a critical value of the Smirnov criterion;
 $G(x; \bar{x}; \sigma^2)$ is a normal distribution with mean \bar{x} and variance σ^2 ;
 $[y]$ is an integer part of y .

INTRODUCTION

In the act of processing of real data that are collected on the basis of registration (observation) methods, measurements (experiments, tests) or the participation of third parties (interviews, focus groups, expert assessment methods), analysts are often faced with a situation when data sets (samples) have observations that, to one degree or another, differ (stand out) from the rest in terms of the analyzed attribute.

In statistical analysis, such observations were called “abnormal”, “outliers”, “sharply distinguished”, “suspicious”, etc. The gross errors, measurement errors, failures of measuring equipment, human factors (operator errors), as well as short-term abrupt changes in measurements (experiments), for example, vibration, can cause of them. The share of outliers is usually about 5% to 10% of observations in the total dataset [1–4], which disturbs their homogeneity. The appearance of abnormal data in the samples is the reason for so-called “heavy tails”, multimodality, pronounced asymmetry, kurtosis, etc. This, in turn, does not allow such data samples to be represented by rigorous parametric models that are described by the well-known probability distributions (e. g. Normal, Poisson, Student distributions, etc.) and characterized by two main parameters: the location parameter, which is the population or sample mean, median, mode; the scale parameter, which can be represented by variance, standard deviation, peak-to-peak, etc.

The use of generally accepted assessment procedures in such conditions, which are based on an explicit or implicit assumption of normality, entails the bias increasing and reducing the effectiveness of the obtained estimates.

In the context of the analysis of expert information, the use of survey data processing methods, which are based on the procedure of their averaging, will be justified only if there is a sufficiently high consistency (proximity) of expert assessments.

The object of study is the process of detecting and excluding anomalous objects from the heterogeneous data sets.

The subject of study is procedures, methods and technique for finding an unusual observations (outliers) in analyzed data sets.

The purpose of the work is to develop a procedure for anomaly detection in heterogeneous data sets, and the rationale for using a number of trimmed-mean robust estimators as a statistical measure of the location parameter of distorted parametric distribution models.

1 PROBLEM STATEMENT

Let, $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ be a set of values measured by some parameter, where n is a sample X size.

The task is to identify the $X' \subseteq X$ region, that contains homogeneous data and the $X'' \subset X$, $X' \cup X'' = X$ region, that is anomalous in relation to the X' region values (outliers).

By a homogeneous component $X' \subseteq X$ we mean an area such that all $x_j \in X'$, $j = \overline{1, |X'|}$ are independent of each other and have the same probability distribution density (same values of characteristics (parameters) under the same distribution).

If the proportion of anomalous data ($\varepsilon = |X''|/|X|$) is more then 0.5, the further analysis is impractical; if the level of “clogging” is 0.5, only a sample median can be recommended as a robust estimate for finding the average of such a sample.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

To process data sets containing heterogeneous observations, the following approaches are used [1, 2, 4, 5, 6]: the identification and exclusion of outliers; the application of robust methods for statistical analysis of data with outliers. To solve the first problem, there is currently a whole class of parametric and nonparametric methods for anomalous observations identification [5–9]. Parametric methods are based on complete a priori information about observations, their application presupposes a priori knowledge of the theoretical distribution of the investigated values or its determination from empirical data. Nonparametric methods do not use detailed a priori information about observations and can be used when the distribution of the indicator under study is unknown and there is no need for its analytical description. An important condition for using nonparametric methods is that the distribution functions of analyzed measurements must be continuous. The effectiveness of the application of these procedures largely depends on the size of the sample under study and the power of the selected criteria.

One aim of robust statistics is to develop evaluation procedures that are resistant to the appearance of outliers in data sets, and to obtain unbiased (or slightly biased) and effective estimates. Currently, there are next classes of robust estimates [1–4, 10]: robust estimators based on Maximum-likelihood argument (M -estimators); robust estimators based on rank statistics (R -estimators); robust estimators based on a linear combination of order statistics (L -estimators). Robust L -estimators are most widespread due to the simplicity of their computational implementation [10–13]. These estimates include truncated, censored, Winsorized means, sample median, etc. The main problem of the considered estimators is the choice of the trimming proportion α , which can be sufficiently solved by using adaptive robust procedures for statistical data estimation [13–16].

3 MATERIALS AND METHODS

Most of the existing criteria for testing outlying observations are based on the assumption that the distribution of measurements corresponds to the normal distribution [5–9]. To search for and filter out sharply distinguished observations in small samples, the most widespread and theoretical justification was obtained by Grubbs-type statistics such us Smirnov (Grubbs) test, Tietjen-Moore test, Dixon test [6, 8, 9]. These criteria provide checking either one outlier (smallest or largest), or two (two smallest or two largest in the sample). At the same time, there is a problem of searching for outliers if their share in the total set of measurement data is unknown.

In this regard, the problem of finding a homogeneous component of the set of measurement data is urgent. It is assumed that the measurement results have approximately normal distribution. Modern research has shown that the procedure for checking the analyzed data samples for compliance with the Gaussian distribution is a rather difficult task, especially for analyzing samples with limited data volume ($n \leq 50$). Currently, there is a fairly extensive

class of goodness-of-fit tests [17–19], applicable for small data samples, for example, the nonparametric Shapiro-Wilk test [18], the Sarkadi test [19]. At the same time, it was proved that in small samples case it is not always possible to distinguish the normal distribution from other types of distributions.

Under these conditions, the paper proposes to use a complex of adaptive robust estimates to identify a homogeneous component of the analyzed data set. However, in this case, the problem arises of choosing robust estimates that can recommend different levels of truncation of the ordered sample built on the basis of the analyzed sample of measurement data. The trimming proportion has a direct impact on the size of the area containing homogeneous data, i.e. an area that does not contain outliers. To clarify (expand, or narrow) the area of homogeneous data, the Grubbs-type test was used.

Let us consider the main stages of the proposed procedure for searching and eliminating outliers in the studied data set.

Stage 1. Formation of truncation levels of the ordered sample X^* .

1.1. Construction on the basis of a set of measurement data X the ordered sample values X^* : $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(i)} \leq \dots \leq x_{(n)}$. Denote by $x_{(i)}$ the order statistics from the data set X^* .

1.2. Calculation the robust measure of tail length [13–15]:

$$Q = (U_{0.05} - L_{0.05}) / (U_{0.5} - L_{0.5}), \quad (1)$$

$$Q_1 = (U_{0.2} - L_{0.2}) / (U_{0.5} - L_{0.5}). \quad (2)$$

1.3. Estimation the tail length of distribution, for example [14, 15]:

$$\begin{aligned} Q < 2.0 & \quad \text{light tailed;} \\ 2.0 \leq Q \leq 2.6 & \quad \text{medium tailed;} \\ 2.6 \leq Q \leq 3.2 & \quad \text{heavy tailed;} \\ Q > 3.2 & \quad \text{very heavy tailed.} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_1 < 1.81 & \quad \text{light tailed;} \\ 1.81 \leq Q_1 \leq 1.87 & \quad \text{medium tailed;} \\ Q_1 > 1.87 & \quad \text{heavy tailed.} \end{aligned} \quad (4)$$

1.4. Test X^* for the symmetry of the distribution, based on measure of the tail length, e.g. according to robust measure HeQ_1 [14, 20]:

$$\begin{aligned} HeQ_1 < 0.7 & \quad \text{left - skewed model;} \\ 0.7 \leq HeQ_1 \leq 1.4 & \quad \text{symmetric model;} \\ HeQ_1 > 1.4 & \quad \text{right - skewed model.} \end{aligned} \quad (5)$$

where HeQ_1 can be defined by next formula:

$$HeQ_1 = U_{(0.05)} - M(0.5) / M(0.5) - L_{(0.05)} \quad (6)$$

1.5. Selection of a group of robust estimators based on order statistics $Est (Es_{sym}, Es_{asym})$:

$$Est = \begin{cases} Es_{sym}, & (HeQ_1 < 0.7) \vee (HeQ_1 > 1.4); \\ Es_{asym}, & 0.7 \leq HeQ_1 \leq 1.4. \end{cases} \quad (7)$$

1.6. Calculation the value of robust estimators within the selected group Est .

1.7. Selection of estimator $T_j(\alpha) \in Est$, which are satisfied the condition $\min_j(e_{T_j}(\alpha))$ or $\min_j(e_{T_j}(\alpha_L, \alpha_U))$, $j = \overline{1, k}$.

Setting the truncation levels α (a symmetric case), or α_L and α_U (an asymmetric case; $\alpha = \alpha_L + \alpha_U$).

1.8. Formation of possible truncation levels, Fig.1: – a symmetric case

$$Es_{sym}: Al = \{\alpha_t \mid t = \overline{1, z}\}, \alpha_t > \alpha, \forall T(\alpha) \in Est;$$

– an asymmetric case

$$\begin{aligned} Es_{asym}: Al_L = \{\alpha_L^t \mid t = \overline{1, z_1}\}, \alpha_L^t > \alpha_L, \\ \forall T(\alpha_L, \alpha_U) \in Est; Al_U = \{\alpha_U^s \mid s = \overline{1, z_2}\}, \alpha_U^s > \alpha_U. \end{aligned}$$

The obtained values are sorted in ascending order.

Stage 2. Checking the boundary elements $x_{(g)}$, $x_{(n-g+1)}$, $g=[\alpha n]$, (symmetric case) or $x_{(g_1)}$, $x_{(n-g_2+1)}$, $g_1=[\alpha_L n]$, $g_2=[\alpha_U n]$ (asymmetric case) of the X^* on anomaly.

2.1 Formulation of the null and alternative hypothesis:

2.1.1 the E_{sym} group has been selected.

H_0 : the boundary observation ($x_{(g)}$ or $x_{(n-g+1)}$) belongs to the same general population as the rest ($q = n - 2g - 1$) of the central values of the ordered sample.

H_1 : the boundary observation ($x_{(g)}$ or $x_{(n-g+1)}$) is outlier.

2.1.2 the E_{asym} group has been selected.

H_0 : the boundary observation ($x_{(g_1)}$ or $x_{(n-g_2+1)}$) belongs to the same general population as the rest ($q = n - g_1 - g_2 - 1$) of the central values of the ordered sample.

H_1 : the boundary observation ($x_{(g_1)}$ or $x_{(n-g_2+1)}$) is outlier.

IF ($u_{(g_1)} \leq u_\alpha$), or ($u_{(n-g_2+1)} \leq u_\alpha$), THEN H_0 is accepted.

The elements $x_{(g_1)}$ and $x_{(n-g_2+1)}$ are checked alternately.

Stage 3. Outliers exclusion, Fig. 2–3.

3.1 IF H_0 is accepted:

3.1.1 for $x_{(n-g+1)}$ (or $x_{(n-g_2+1)}$ respectively), THEN the next senior member of the ordered sample is tested until the element $x_{(s)}$ is found, for which H_0 will be rejected.

Then the group of senior members of the ordered sample $x_{(s)} \leq \dots \leq x_{(n)}$ is considered as outliers.

3.1.2 for $x_{(g)}$ (or $x_{(g_1)}$ respectively), THEN the previous junior member of the ordered sample is tested until the element $x_{(s)}$ is found, for which H_0 will be rejected.

Then the group of junior members of the ordered sample $x_{(1)} \leq \dots \leq x_{(s)}$ is considered as outliers

3.2. IF H_1 is accepted:

3.2.1 for $x_{(n-g+1)}$ (or $x_{(n-g_2+1)}$ respectively), THEN the truncation levels $\alpha_t \in Al$ (or $\alpha_U^s \in Al_U$ respectively) are consistently selected.

Repeat the procedure of items 2.1–3.2.

3.2.2 for $x_{(g)}$ (or $x_{(g_1)}$ respectively), THEN the truncation levels $\alpha_t \in Al$ (or $\alpha_L^t \in Al_L$ respectively) are consistently selected.

Repeat the procedure of items 2.1–3.2.

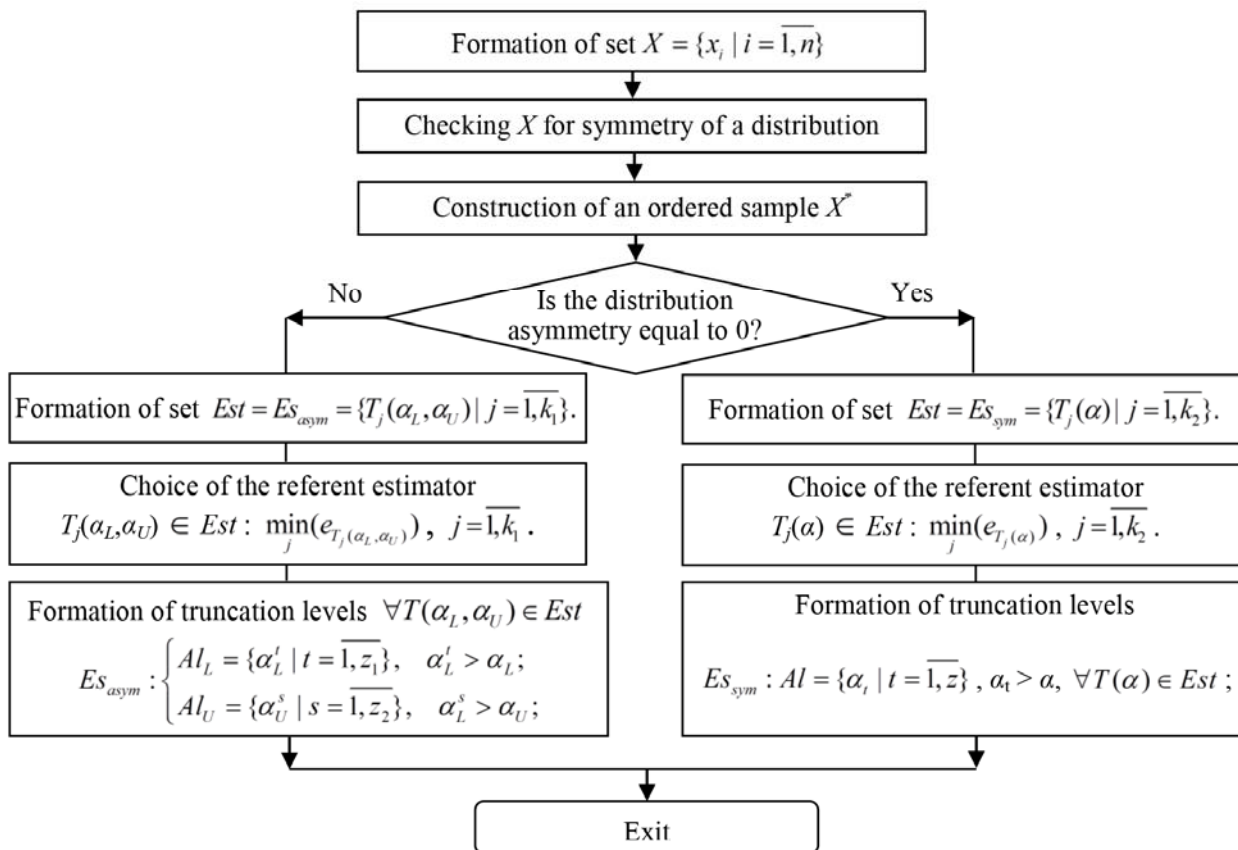


Figure 1 – Algorithm for truncation levels formation

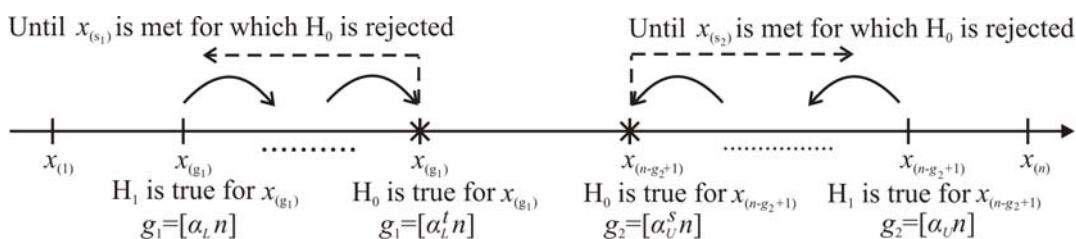


Figure 2 – The procedure for selection the initial truncation levels in asymmetric case

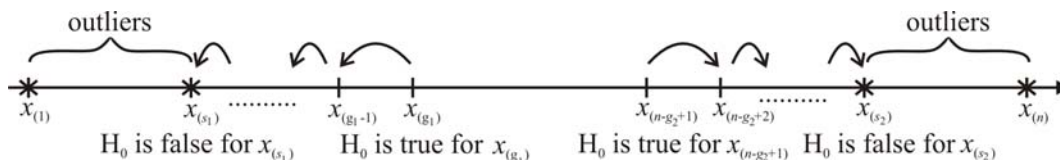


Figure 3 – The procedure for outliers' determination in asymmetric case

4 EXPERIMENTS

Let us consider an example of the implementation of the proposed method. To model the set of measurement data, a mathematical model of independent observations with a Gaussian distribution $X = \{x_i | i = \overline{1, n}\}$ (volume $n = 500$) has been constructed.

The constructed model is a two-component symmetric mixture of normal distributions of the form:

$$F(x) = (1 - \varepsilon)G(x; \bar{x}; \sigma_0^2) + \varepsilon G(x; \bar{x}; \sigma_1^2), \quad (8)$$

where $\sigma_0^2 < \sigma_1^2$; $0 \leq \varepsilon \leq 0.5$.

Using the Tukey contamination model (8), a mixture was generated with the following parameters:

- the main Gaussian distribution $G(x, \bar{x}, \sigma_0^2)$ with parameters $\bar{x} = 0, \sigma_0 = 0.7$;
- the contaminated Gaussian distribution $G(x, \bar{x}, \sigma_1^2)$ with parameters $\bar{x} = 0, \sigma_1 = 1.2$;
- the proportion of outliers $\varepsilon = 25\%$.

The test for symmetry of distribution was performed on the basis of the HeQ_1 robust estimator (6). Based on the results of such verification, a group of symmetric truncation estimators $Est = Es_{sym}$ was selected [10, 13–16].

5 RESULTS

The results of the analysis of the Est -group estimators are presented in the Table 1.

Table 1 – The analysis of Est -group estimators

№, j	Estimator	$T_j(\alpha)$	$\alpha, \%$	$e_{T_j}(\alpha)$	Region without outliers
1	NH_1	-0.0109	12.5	0.0353	$[X_{63}^*; X_{438}^*]$
2	NH_2	-0.0126	18.75	0.03537	$[X_{94}^*; X_{407}^*]$
3	HGP	-0.0078	25	0.0380	$[X_{126}^*; X_{375}^*]$
4	HG_1	0.0018	0	0.0369	$[X_{1}^*; X_{500}^*]$
5	HG_2	-0.0078	25	0.0380	$[X_{126}^*; X_{375}^*]$
6	PAR	-0.0078	25	0.0380	$[X_{126}^*; X_{375}^*]$
7	PR_1	-0.0116	20	0.0355	$[X_{101}^*; X_{400}^*]$
8	PR_2	0.0018	0	0.0369	$[X_{1}^*; X_{500}^*]$
9	A_0	-0.0081	15	0.03538	$[X_{76}^*; X_{425}^*]$
10	A_1	-0.0081	15	0.03538	$[X_{76}^*; X_{425}^*]$
11	A_2	-0.0122	15	0.03538	$[X_{76}^*; X_{425}^*]$
12	A_3	-0.0116	20	0.0355	$[X_{101}^*; X_{400}^*]$

The results of Table 1 show that $\min_j(e_{T_j}(\alpha))$ corresponds to the Hogg estimator NH_1 , ($\alpha = 12.5\%$), respectively the next subset of truncation levels was formed $At = \{0.15; 0.1875; 0.2; 0.25\}$, $\alpha_t > \alpha$, $\forall T(\alpha) \in Est$.

Based on the results of the verification of the boundary values $x_{(g)}, x_{(n-g+1)}$, at $\alpha = 12.5\%$ (NH_1 estimator) according to Smirnov test at 0.05 significance level H_0 was accepted, the limit observations belong to the same general population, as well as other central values of the ordered sample.

Thus, two regions $[X_{63}^*; X_{438}^*]$ and $[X_{439}^*; X_{500}^*]$ were formed for testing the limit values for the anomaly by Smirnov criterion in accordance with the scheme shown in Fig. 3.

According to the obtained results, two regions of outliers were obtained: $[X_{63}^*; X_{438}^*]$ and $[X_{439}^*; X_{500}^*]$.

6 DISCUSSION

The procedure for outliers searching in analyzed data set paper has been proposed. To highlight a homogeneous component of the set of measurement data, it was proposed to use robust estimates based on a linear combination of order statistics, which are used the procedure of both symmetric and asymmetric truncation. In the symmetric case, $[an]$ smallest and $[an]$ largest observations are considered as outliers, which violate homogeneity of analyzed data set. In the asymmetric case, the truncation ratio α is additionally divided into the proportions α_L and α_U , which corresponds to the truncation levels of the $[an]$ smallest and $[an]$ largest observations. The main problem of such type estimators is the choice of the value of the truncation coefficient α , which can be sufficiently solved by using adaptive robust procedures. With the adaptive approach, a specific type of auxiliary measures of tail-length, skewness and kurtosis. To choice the initial (reference) level of truncation of ordered sample, an adaptive estimate was chosen that minimizes the value of the standard error of the truncated mean.

CONCLUSIONS

The problem of outliers detection in heterogeneous data sets has been studied.

The scientific novelty of obtained results is that the methods of detection and exclusion of observations distorted by measurement errors (anomalous observations) due to hidden defects of the equipment, operating conditions of the equipment, and other conditions, are received the further development. The mathematical apparatus of nonparametric statistics was used to process the results of observations and search for outliers. The proposed approach is based on the procedure of truncation of ordered samples obtained on the basis of the initial sample of measurement data. Observations that fall into the region of $[\alpha_L n]$ smallest and $[\alpha_U n]$ largest order statistics are considered outliers. To form possible levels of truncation of the ordered sample, data processing algorithms using adaptive robust statistical estimation procedures were used, which allowed to formalize the procedure for selecting the level of truncation.

The practical significance of the obtained results lies in the fact that the proposed approach allows, along with the traditional tests for outliers detection, to single out a set of abnormal measurement results, if their share in the total set of measurement data is unknown. This, in turn, expands the capabilities of existing algorithms for searching the outliers, which is ultimately aimed at increasing the reliability of statistical processing the results of observations (primary measurements).

Prospects for further research are aimed at developing a procedure for a smoother selection of the truncation coefficients in asymmetric case.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state research project of Petro Mohyla Black Sea National University “Development of modern information and communication technologies for the management of intellectual resources to decision-making support of operational management” (research project no. 0121U107831, financed by the Government of Ukraine).

REFERENCES

1. Hampel F. R., Ronchetti E. M., Rousseeuw P. J., Stahel W. A. Robust statistics: the approach based on influence functions. New York, John Wiley & Sons, 1986, 526 p. DOI: 10.1002/9781118186435.
2. Hoaglin D. C., Mosteller C. F., Tukey J. W. Understanding robust and exploratory data analysis. New York, Wiley-Interscience, 2000, 447 p.
3. Staudte R. G., Sheather S. J. Robust estimation and testing. New York, Wiley, 1990, 351 p.
4. Huber P., Ronchetti E. M. Robust statistics. New York, Wiley, 2009, 363 p. DOI: 10.1002/9780470434697.
5. Cousineau D., Chartier S. Outliers detection and treatment: a review, *International Journal of Psychological Research*, 2010, Vol. 3(1), pp. 58–67. DOI: 10.21500/20112084.844.
6. Hawkins D. M. Identification of outliers. London, Chapman and Hall, 1980, 188 p. DOI: 10.1002/bimj.4710290215
7. Aggarwal C. Outlier analysis. New York, Springer, 2016, 488 p. DOI 10.1007/978-3-319-47578-3
8. Manoj K., Senthamarai K. Comparison of methods for detecting outliers, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2013, Vol. 4, pp. 709–714.
9. Saleem S., Aslam M., Shaikat M. R. A review and empirical comparison of univariate outlier detection methods, *Pakistan Journal of Statistics*, 2021, Vol. 37(4), pp. 447–462.
10. Andrews D. F., Bickel P. J., Hampel F. R., P. J. Huber, W. H. Rogers, J. W. Tukey Robust estimates of location: survey and advances. Princeton, NJ, Princeton University Press, 1972, 372 p.
11. Balakrishnan N. Parameters, order statistics, outliers and robustness, *Revista Matematica Complutense*, 2007, Vol. 20(1), pp. 7–107. DOI: 10.5209/rev_rema.2007.v20.n1.16528
12. Ramsey P. H., Ramsey P. P. Optimal trimming and outlier elimination, *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2007, Vol. 6, pp. 355–360. DOI: 10.22237/jmasm/1193889660
13. Reed III J. F., Stark D. B. Robustness estimators of locations: a classification of linear and adaptive estimators, *Journal of Applied Statistics*, 1994, Vol. 21(3), pp. 95–124. DOI: 10.1080/757583650
14. Reed III J. F., Stark D. B. Contributions to adaptive estimators, *Journal of Applied Statistics*, 1998, Vol. 25(5), pp. 651–669. DOI: 10/1080/02664769822882
15. Hogg R. V., Lenth R. V. A review of some adaptive statistical techniques, *Communications in Statistics – Theory and Methods*, 1984, Vol. 13, pp. 1551–1579. DOI: 10.1080/03610928408828779
16. Prescott P. Selection of trimming proportions for robust adaptive trimmed mean, *Journal of the American Statistical Association*, 1978, No. 73(361), pp. 133–140. DOI: 10.2307/2286534
17. Zylstra R. R. Normality tests for small sample sizes, *Quality Engineering*, 1994, Vol. 7(1), pp. 45–58. DOI: 10.1080/08982119408918766
18. Shapiro S. S., Wilk M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*, 1965, Vol. 52(3/4), pp. 591–611. DOI: 10.2307/2333709
19. Sarkadi K. Testing for normality, *Banach Center Publications*, 1980, Vol. 6, pp. 281–287. DOI: 10.4064/-6-1-281-287
20. Hergaard D. Distributions of asymmetric trimmed means, *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, 1979, Vol. 8(4), pp. 359–367. DOI: 10.1080/03610917908812125

Received 13.06.2022.
Accepted 27.08.2022.

УДК 004.02:519.234.7

ПРОЦЕДУРА ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ У НАБОРАХ НЕОДНОРІДНИХ ДАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ РОБАСТНИХ УСІЧЕНИХ ОЦІНОК

Швед А. В. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Давиденко Є. О. – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Загальноприйняті припущення в параметричній статистиці, такі як нормальність, лінійність, незалежність, далеко не завжди виконуються у реальній практиці. Основною причиною тому є поява спостережень у досліджуваних вибірках даних, що відрізняються від основної маси даних, наслідок чого вибірка стає неоднорідною. Застосування в таких умовах загальноприйнятих процедур оцінювання, наприклад, вибіркового середнього, тягне за собою збільшення зсуву та зниження ефективності одержуваних оцінок. Це в свою чергу висуває задачу пошуку можливих шляхів вирішення проблеми обробки масивів даних, що містять аномальні спостереження, особливо в умовах обробки вибірок малого обсягу. Об'єкт дослідження – процес виявлення та виключення аномальних спостережень у вибірках неоднорідних даних. Мета роботи – розробка процедури пошуку аномальних спостережень у вибірках неоднорідних даних.

норідних даних, та обґрунтування використання низки усічених оцінок типу «середнє» для оцінювання параметру положення спотворених параметричних моделей розподілів.

Метод. Розглянуті питання аналізу (обробки) неоднорідних даних, що містять аномальні, підозрілі спостереження. Проаналізовано можливості використання робастних процедур оцінювання, стійких до наявності викидів у вибірках неоднорідних даних. Запропоновано процедуру виявлення та виключення аномальних спостережень, причиною яких можуть бути помилки вимірювань, приховані дефекти апаратури, вироблення ресурсів, умови проведення експерименту тощо. В основу запропонованого підходу покладено процедуру симетричного та несиметричного усічення варіаційного ряду, отриманого на основі вихідної вибірки даних, на основі методів робастної статистики. Для обґрунтованого вибору величини коефіцієнта усічення α , запропоновано використовувати адаптивні робастні процедури статистичного оцінювання. Спостереження, що потрапили до зони молодших та зони старших порядкових статистик, визнані аномальними.

Результати. Запропонований підхід дозволяє на відміну від традиційних критеріїв пошуку аномальних значень, таких як критерій Смірнова(Граббса), критерій Діксона та ін., розбивати аналізовану сукупність даних на однорідну складову та виявляти сукупність аномальних спостережень, при припущенні, що їх частка у загальній сукупності аналізованих даних невідома.

Висновки. У статті запропоновано використання методів робастної статистики для формування передбачуваних зон, що містять однорідні та аномальні спостереження у варіаційному ряді, побудованому за вихідною вибіркою аналізованих даних. Запропоновано використовувати комплекс адаптивних робастних процедур для встановлення рівнів усічення, що утворюють зони аномальних спостережень в області старших та молодших порядкових статистик. Остаточний рівень усічення варіаційного ряду уточнюється на основі існуючих критеріїв, що дозволяють перевіряти граничні спостереження (мінімальне та максимальне) на аномальність.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: викиди, робастні оцінки, усічене середнє, симетричне і несиметричне усічення.

УДК 004.802:519.234.7

ПРОЦЕДУРА ВЫЯВЛЕНИЯ АНОМАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ В НАБОРАХ НЕОДНОРОДНЫХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РОБАСТНЫХ УСЕЧЕННЫХ ОЦЕНОК

Швед А. В. – д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерии программного обеспечения Черноморского национального университета имени Петра Могилы, Николаев, Украина.

Давыденко Е. А. – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой инженерии программного обеспечения Черноморского национального университета имени Петра Могилы, Николаев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Общепринятые предположения в параметрической статистике, такие как нормальность, линейность, независимость, далеко не всегда выполняются в реальной практике. Основной причиной этого является появление наблюдений в исследуемых выборках данных, отличающихся от основной массы данных, вследствие чего выборка становится неоднородной. Применение в этих условиях общепринятых процедур оценивания, например, выборочного среднего, влечет за собой увеличение смещенности и снижение эффективности получаемых оценок. Это в свою очередь выдвигает задачу поиска возможных путей решений проблемы обработки массивов данных (выборки), содержащих аномальные наблюдения, особенно в условиях обработки выборок малого объема. Объект исследования – процесс обнаружения и исключения аномальных объектов выборки неоднородных данных. Цель работы – разработка процедуры поиска аномальных наблюдений в выборках неоднородных данных, и обоснование использования ряда усеченных оценок типа «среднее» для оценивания параметра положения искаженных параметрических моделей распределений.

Метод. Рассмотрены вопросы анализа (обработки) неоднородных данных, содержащие аномальные, резко выделяющиеся, подозрительные наблюдения. Проанализированы возможности использования робастных процедур оценивания, устойчивых к наличию в выборках данных «засоряющих» значений, для обработки неоднородных данных. Предложена процедура выявления и исключения аномальных наблюдений, причиной которых могут быть ошибки измерений, скрытые дефекты аппаратуры, выработка ресурсов, условия проведения эксперимента и т.д. В основу предложенного подхода положена процедура симметричного и несимметричного усечения вариационного ряда, полученного на основе исходной выборки данных, на основе методов робастной статистики. Для обоснованного выбора величины коэффициента усечения α , предложено использовать адаптивные робастные процедуры статистического оценивания. Наблюдения, которые находятся в зоне младших и зоне старших порядковых статистик, признаны аномальными.

Результаты. Предложенный подход позволяет в отличие от традиционных критериев поиска аномальных значений, таких как критерий Смирнова(Граббса), критерий Диксона и др., разбивать анализируемую совокупность данных на однородную составляющую и выявлять совокупность аномальных наблюдений, при предположении, что их доля в общей совокупности анализируемых данных неизвестна.

Выводы. В статье предложено использование методов робастной статистики для формирования предполагаемых зон, содержащих однородные и аномальные наблюдения в вариационном ряду, построенном по исходной выборке анализируемых данных. Предложено использовать комплекс адаптивных робастных процедур, для установления

предполагаемых уровней усечения, образующих зоны аномальных наблюдений в области старших и младших порядковых статистик вариационного ряда. Окончательный уровень усечения вариационного ряда уточняется на основе существующих критериев, позволяющих проверять граничные наблюдения (минимальное и максимальное) на аномальность.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выбросы, робастные оценки, усеченное среднее, симметричное и не симметричное усечение.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Hampel F. R. Robust statistics: the approach based on influence functions / F. R. Hampel, E. M. Ronchetti, P. J. Rousseeuw, W. A. Stahel. – New York: John Wiley & Sons, 1986. – 526 p. DOI: 10.1002/9781118186435.
2. Hoaglin D. C. Understanding robust and exploratory data analysis / D. C. Hoaglin, C. F. Mosteller, J. W. Tukey. – New York: Wiley-Interscience, 2000. – 447 p.
3. Staudte R. G. Robust estimation and testing / R. G. Staudte, S. J. Sheather. – New York : Wiley, 1990. – 351 p.
4. Huber P. Robust statistics / P. Huber, E. M. Ronchetti. – New York: Wiley, 2009. – 363 p. DOI: 10.1002/9780470434697.
5. Cousineau D. Outliers detection and treatment: a review / D. Cousineau, S. Chartier // International Journal of Psychological Research. – 2010. – Vol. 3(1). – P. 58–67. DOI: 10.21500/20112084.844.
6. Hawkins D. M. Identification of outliers / D. M. Hawkins. – London: Chapman and Hall, 1980. – 188 p. DOI: 10.1002/bimj.4710290215
7. Aggarwal C. Outlier analysis / C. Aggarwal. – New York: Springer, 2016. – 488 p. DOI 10.1007/978-3-319-47578-3
8. Manoj K. Comparison of methods for detecting outliers / K. Manoj, K. Senthamarai // International Journal of Scientific & Engineering Research. – 2013. – Vol. 4. – P. 709–714.
9. Saleem S. A review and empirical comparison of univariate outlier detection methods / S. Saleem, M. Aslam, M. R. Shaukat // Pakistan Journal of Statistics. – 2021. – Vol. 37(4). – P. 447–462.
10. Andrews D. F. Robust estimates of location: survey and advances / D. F. Andrews, P. J. Bickel, F. R. Hampel, P. J. Huber, W. H. Rogers, J. W. Tukey. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1972. – 372 p.
11. Balakrishnan N. Parameters, order statistics, outliers and robustness / N. Balakrishnan // Revista Matematica Com-
plutense. – 2007. – Vol. 20(1). – P. 7–107. DOI: 10.5209/rev_rema.2007.v20.n1.16528
12. Ramsey P. H. Optimal trimming and outlier elimination / P. H. Ramsey, P. P. Ramsey // Journal of Modern Applied Statistical Methods. – 2007. – Vol. 6. – P. 355–360. DOI: 10.22237/jmasm/1193889660
13. Reed III J. F. Robustness estimators of locations: a classification of linear and adaptive estimators / J. F. Reed III, D. B. Stark // Journal of Applied Statistics. – 1994. – Vol. 21(3). – P. 95–124. DOI: 10.1080/757583650
14. Reed III J. F. Contributions to adaptive estimators / J. F. Reed III, D. B. Stark // Journal of Applied Statistics. – 1998. – Vol. 25(5). – P. 651–669. DOI: 10/1080/02664769822882
15. Hogg R. V. A review of some adaptive statistical techniques / R. V. Hogg, R. V. Lenth // Communications in Statistics – Theory and Methods. – 1984. – Vol. 13. – P. 1551–1579. DOI: 10.1080/03610928408828779
16. Prescott P. Selection of trimming proportions for robust adaptive trimmed mean / P. Prescott // Journal of the American Statistical Association. – 1978. – No. 73(361). – P. 133–140. DOI: 10.2307/2286534
17. Zylstra R. R. Normality tests for small sample sizes / R. R. Zylstra // Quality Engineering. – 1994. – Vol. 7(1). – P. 45–58. DOI: 10.1080/08982119408918766
18. Shapiro S. S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S. S. Shapiro, M. B. Wilk // Biometrika. – 1965. – Vol. 52(3/4). – P. 591–611. DOI: 10.2307/2333709
19. Sarkadi K. Testing for normality / K. Sarkadi // Banach Center Publications. – 1980. – Vol. 6. – P. 281–287. DOI: 10.4064/-6-1-281-287
20. Hersgaard D. Distributions of asymmetric trimmed means / D. Hersgaard // Communications in Statistics: Simulation and Computation. – 1979. – Vol. 8(4). – P. 359–367. DOI: 10.1080/03610917908812125

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 004.8:004.032.26

НЕЧІТКА ДОВІРЧА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ДАНИХ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ЩІЛЬНОСТІ РОЗПОДІЛУ ДАНИХ ТА ЇХ ПІКІВ

Бодяньський С. В. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри штучного інтелекту, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Плісс І. П. – канд. техн. наук, провідний науковий співробітник ПНДІ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Шафроненко А. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

Калиниченко О. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Задача кластеризації – класифікації без вчителя масивів даних займає важливе місце в інтелектуальному аналізі даних. Для вирішення цієї задачі на цей час запропоновано безліч підходів, що відрізняються між собою як апріорними припущеннями щодо характеру даних у масивах, що досліджуються та аналізуються, так і математичним апаратом, що полягає в основі тих або інших методів, однак вирішення задач кластеризації ускладнюють велика розмірність векторів спостережень, що аналізуються, їх збуреність та забрудненість різного типу завадами та пропусками, можливою складною формою кластерів, тощо.

Мета. Мета роботи полягає у запровадженні процедури нечіткої кластеризації, що об'єднує в собі переваги методів, застосованих на аналізі щільностей розподілу даних та їх піків, характеризуються високою швидкістю та може ефективно працювати за умов перетинних класів.

Метод. Введено метод нечіткої кластеризації масивів даних, що базується на ідеях аналізу щільностей розподілу цих даних, їх піків та довірчого нечіткого підходу. Перевагою запропонованого підходу є скорочення часу вирішення оптимізаційних задач, пов'язаних з відшукуванням атракторів функцій щільностей, оскільки кількість звернень до блоку оптимізації визначається не обсягом аналізованого масиву, а кількістю піків щільностей цього ж масиву.

Результати. Метод є досить простим у чисельній реалізації і не критичним до вибору оптимізаційної процедури. Результати експериментів підтверджують ефективність запропонованого підходу в задачах кластеризації за умов перетинних кластерів та дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці для вирішення проблем автоматичної кластеризації великих даних.

Висновки. Введено метод нечіткої кластеризації масивів даних, що базується на ідеях аналізу щільностей розподілу цих даних, їх піків та довірчого нечіткого підходу. Перевагою запропонованого підходу є скорочення часу вирішення оптимізаційних задач, пов'язаних з відшукуванням атракторів функцій щільностей, оскільки кількість звернень до блоку оптимізації визначається не обсягом аналізованого масиву, а кількістю піків щільностей цього ж масиву. Метод є досить простим у чисельній реалізації і не критичним до вибору оптимізаційної процедури. Результати експериментів підтверджують ефективність запропонованого підходу в задачах кластеризації за умов перетинних кластерів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нечітка кластеризація, правдоподібна кластеризація, піки щільності розподілу даних.

АБРЕВІАТУРА

DI індекс Дана;
DBI індекс Девіса-Болдіна;
CA кластерна точність;
GA генетичний алгоритм;
SA імітований відпал.

НОМЕНКЛАТУРА

X – матриця набору даних;
 k – номер вектору-спостереження;
 i – номер атрибуту вектора-спостереження;
 j – номер класу;

$x(k)$ – вектор-спостереження;
 x_j^* – атрактор;
 l, q – номери кластерів;
 m – кількість неперетинних класів;
 μ_j – рівень нечіткої належності j -го кластеру;
 D – матриця відстаней між спостереженнями;
 d – відстань між спостереженнями;
 ρ – вектор локальної щільності;
 c – центроїд кластера;
 δ_k^* – точка з максимальною щільністю;
 Cr – рівень правдоподібності;
 $\delta(k)$ – відстань від спостереження $x(k)$ до точки з більш високою щільністю;
 σ – параметр ширини – відстань зрізу в прийнятій метриці функції впливу;
 $f_G^{\tilde{x}}(x)$ – гаусівська функція впливу;
 $f_E^{\tilde{x}}(x)$ – функція Єпанечнікова;
 $f_C^{\tilde{x}}(x)$ – функція Коши;
 x_j^P – піки-центроїди кластерів.

ВСТУП

Задача кластеризації – класифікації без вчителя масивів даних займає важливе місце у інтелектуальному аналізі даних (Data Mining, Data Stream Mining, Big Data Mining), а для її вирішення на цей час запропоновано безліч підходів, що відрізняються між собою як апіорними припущеннями що до характеру даних у масивах, що досліджуються та аналізуються, так і математичним апаратом, що полягає в основі тих або інших методів [1–4]. Дещо особливе місце тут займають методи нечіткої кластеризації [5, 6], що призначені для роботи за умов, коли кластери, що формуються можуть довільним чином перетинатися у просторі ознак. Зрозуміло також, що вирішення задач кластеризації ускладнюють велика розмірність векторів спостережень, що аналізуються, їх збуреність та забрудненість різного типу завадами та пропусками, можливою складною формою кластерів, тощо.

Об’єкт дослідження швидка нечітка кластеризація даних на основі піків щільності розподілу даних.

Предмет дослідження процедура аналізу піків щільності розподілу даних.

Мета роботи полягає у запровадженні процедури нечіткої кластеризації, що об’єднує в собі переваги методів, заснованих на аналізі щільностей розподілу даних та їх піків, характеризуються високою швидкістю та можна ефективно працювати за умов перетинних класів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Вихідною інформацією для вирішення задачі кластеризації є масив даних

$$X = \{x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)\}, x(k) = \{x_i(k)\} \in R^n,$$

при цьому компоненти цих даних попередньо передоброблені так, щоб вони належали деякому обмеженому інтервалу, наприклад $-1 \leq x_i(k) \leq 1 \forall i, k$. На основі цих даних формується $(n \times N)$ матриця «об’єкт-властивість», елементи якої опрацьовуються прийнятим алгоритмом.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Для вирішення цієї задачі одними з найбільш ефективних є алгоритми, що базуються на аналізі щільностей розподілу даних у вихідних масивах, серед яких можна відзначити DENCLUE [7] та його модифікації [8–10], призначені для вирішення задач кластеризації великих масивів медіаданих, спотворених збуреннями різної природи, та класів складної форми. В той же час DENCLUE характеризується досить низькою швидкістю, оскільки його використання пов’язане з необхідністю багатократного вирішення задачі оптимізації за допомогою градієнтних процедур. Більш швидкими є алгоритми, засновані на аналізі піків щільностей [11], однак тут в якості центроїдів-прототипів кластерів виступають спостереження вихідного масиву даних. Якщо кластери мають складну неопуклу форму, то їх центроїди можуть не співпадати із спостереженнями і, більш того, розташовуватися на значній відстані від них. Крім того, як DENCLUE, так і піковий алгоритм є чіткими процедурами, тобто призначені для роботи за умов коли кластери не перетинаються, а кожна точка – векторне спостереження може належати лише одному класу. Тому є доцільним ввести у розгляд процедуру нечіткої кластеризації, що об’єднує в собі переваги методів, заснованих на аналізі щільностей розподілу даних та їх піків, характеризуються високою швидкістю та можна ефективно працювати за умов перетинних класів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Базовими поняттями, що використовуються у подальшому, є функція впливу, функція щільності даних у вибірці, атрактори щільності, що відповідають екстремумам – максимумам функції щільності, що досягаються у точках вибірки в околі атракторів щільності.

Для будь якої точки \tilde{x} з масиву X її базова функція впливу $f_B^{\tilde{x}}(x) = f(x, \tilde{x})$ є деякою ядерною дзвонуватою функцією функцією, серед яких автори методу [7–9] відзначають, так звану, прямокутну хвилеву функцію впливу

$$f_S^{\tilde{x}}(x) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } d(x, \tilde{x}) > \sigma, \\ 1 & \text{інакше} \end{cases}$$

(тут d – відстань у прийнятій метриці, зазвичай евклідовій, σ – параметр ширини – відстань зрізу в прийнятій метриці функції впливу) та гаусівську функцію впливу

$$f_{\tilde{G}}^{\tilde{x}}(x) = \exp\left(-\frac{d^2(x, \tilde{x})}{2\sigma^2}\right) = \exp\left(-\frac{\|x - \tilde{x}\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

що є найбільш популярною, завдяки зручності обчислення її градієнта.

Нескладно бачити, що в якості функцій впливу можуть також бути використана функція Коші, що часто виникає у задачах нечіткої кластеризації [12]

$$f_C^{\tilde{x}}(x) = \left(1 + \frac{d^2(x, \tilde{x})}{\sigma^2}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{\|x - \tilde{x}\|^2}{\sigma^2}\right)^{-1},$$

та функція Єпанечнікова [13]

$$f_E^{\tilde{x}}(x) = \left[1 - \frac{d^2(x, \tilde{x})}{2\sigma^2}\right]_+ = \left[1 - \frac{\|x - \tilde{x}\|^2}{2\sigma^2}\right]_+$$

(тут $[\bullet]_+ = \max\{0, \bullet\}$), цей градієнт має просту форму

$$\nabla_x f_E^{\tilde{x}}(x) = \left[\frac{\tilde{x} - x}{\sigma^2}\right]_+,$$

де операція проектування не достатній ортант $[\bullet]_+$ реалізується покомпонентно.

Функція щільності розподілу даних у масиві X , що містить N спостережень, формується на основі N функцій впливу у вигляді

$$f^x(x) = \sum_{k=1}^N f(x, x(k)) \quad (1)$$

і є близькою за суттю до Парзенівських вікон [14] та оцінок Надарая-Ватсона [15, 16].

Власне процедура кластеризації полягає у відшуванні максимумів функції $f^x(x)$, що задовільняють умові

$$f^x(x, x^*) > \xi, \quad (2)$$

де ξ – деякий поріг, що визначає, який із відшуканих атракторів є значущим, тобто «фільтрує» окремі аномальні викиди у вибірці X та виключає із розгляду «міні-кластери», що містять занадто мало спостережень. Зрозуміло, що чим більше значення ξ , тим менша кількість значущих кластерів буде сформована.

Для відшування атракторів – екстремумів-максимумів функції щільності розподілу даних $f^x(x)$ зазвичай використовується градієнтна процедура оптимізації [17], що може бути записана у вигляді

$$x(k) = x_0;$$

$$x^l = x^{l-1} + \eta^l \frac{\nabla f^x(x, x^{l-1})}{\|\nabla f^x(x, x^{l-1})\|},$$

$$l = 0, 1, 2, \dots; \forall k = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

де η^l – параметр кроку пошуку, що визначає швидкість збіжності алгоритму. Різні модифікації DENCLUE пов'язані саме з намаганнями пришвидшити процес оптимізації прийнятною функцією щільності [8, 10]. Тут же слід відзначити, що використання гаусіанів в якості функцій впливу пов'язане з простою формою їх градієнтів, оскільки

$$\begin{aligned} f_G^x(x, x^l) &= \sum_{k=1}^N (x^l - x) f_G^{x^k}(x) = \\ &= \sum_{k=1}^N (x^l - x) \exp\left(-\frac{\|x - x^k\|^2}{2\sigma^2}\right). \end{aligned}$$

Помітимо також, що функції Єпанечнікова мають ще більш просту форму градієнта

$$\nabla f_E^x(x, x^l) = \sum_{k=1}^N \left[\frac{x^l - x}{2\sigma^2}\right]_+.$$

Процес оптимізації починається з кожної точки $x(k)$ масива даних X і закінчується відшукуванням всіх екстремумів – максимумів функції щільності (1), що задовольняють нерівності (2).

Зрозуміло, що чим більше обсяг вибірки X , тим більше разів N повинна запускатися процедура оптимізації – пошуку атракторів. Пришвидшити процес кластеризації можна, скоротивши кількість запусків цієї процедури.

Тому пропонується починати процес пошуку атракторів не з кожної точки масиву даних X , а з, так званих, піків щільності [11] цього масиву. Для знаходження цих піків у розгляд вводиться два параметри: $\rho(k)$ – локальна щільність та $\delta(k)$ – відстань від спостереження $x(k)$ до точки з більш високою щільністю. Крім того, аналогічно DENCLUE використовується відстань зрізу σ , що зазвичай задається та варіюється користувачем для отримання потрібної точності вирішення задачі.

Процес пошуку піків щільності починається з того, що на основі вихідної $(n \times N)$ – матриці «об'єкт-властивість» формується $(N \times N)$ матриця відстаней між спостереженнями

$$\begin{aligned} D &= \{d(x(k), x(q))\}, \\ d(x(k), x(q)) &= \|x(k) - x(q)\| \forall k, q. \end{aligned}$$

На основі цієї матриці формується $(N \times 1)$ -вектор локальних щільностей $\rho = \{\rho(k)\} \in R^N$:

$$\rho(k) = \sum_{q=1}^N \chi(d(x(k), x(q)) - \sigma),$$

де

$$\chi(d) = \begin{cases} 1, & \text{if } d < 0, \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

Тут відстань зрізу σ є найбільш впливовим параметром, що визначає якість кластеризації та обирається з суто емпіричних міркувань. Тут слід відмітити, що автори пікового алгоритму [11] радять обирати цю відстань так, щоб вона «накривала» $0,01N - 0,02N$ спостережень з масиву, що аналізується.

Після цього розраховується вектор мінімальних відстаней

$$\delta(k) = \min_{\forall q, \rho(q) > \rho(k)} \{d(x(k), x(q))\},$$

а для спостереження з мінімальною щільністю $\delta^*(k)$ покладається

$$\delta^*(k) = \max \{d(x(k), x(q))\}.$$

На базі цієї інформації формуються піки-центроїди кластерів $x_j^P, j = 1, 2, \dots, m$, при цьому в якості цих піків-центроїдів обираються спостереження з найбільш високою щільністю, тобто центроїди згідно з цим підходом є деякі із спостережень вихідної вибірки. В той же час в ситуаціях, коли кластери мають досить складну форму, центроїд може не співпадати з жодною із точок $x(k)$. Тому пропонується після знаходження всіх піків $x_j^P, j = 1, 2, \dots, m$ запускати процедуру оптимізації (3) не з точок $x(k), k = 1, 2, \dots, N$, а тільки з піків $x_j^P, j = 1, 2, \dots, m$, кількість яких є значно меншою ніж обсяг вибірки X , тобто

$$m \ll N.$$

Процедури DENCLUE та пікові кластеризації є алгоритмами чіткої кластеризації, тобто апріорно припускається, що кластери, які формуються за їх допомогою, не перетинаються у просторі ознак. Якщо ж ці класи «накривають» один одного, що досить часто зустрічається у реальних задачах, то мусять бути застосовані алгоритми нечіткої (фаззі) кластеризації [5, 6], що базуються на двох основних підходах: імовірнісному та можливісному. Кожен з цих підходів має свої переваги та недоліки, яких позбавлений, так званий, довірчий підхід до нечіткої кластеризації [18, 19].

© Бодяньський Є. В., Плїсс І. П., Шафроненко А. Ю., Калиниченко О. В., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-6

Згідно з цим підходом для кожного з атракторів (або піків) $x_j^*, j = 1, 2, \dots, m$ та спостережень $x(k), k = 1, 2, \dots, N$ розраховуються рівні нечіткої належності або у загальній формі [5]

$$\mu_j(k) = \frac{d^{-2}(x_j^*, x(k))}{\sum_{r=1}^m d^{-2}(x_r^*, x(k))} = \frac{\|x_j^* - x(k)\|^{-2}}{\sum_{r=1}^m \|x_r^* - x(k)\|^{-2}}, \quad (4)$$

або після деяких перетворень [20, 21]

$$\mu_j(k) = \left(1 + \frac{d^{-2}(x_j^*, x(k))}{\sigma_j^2} \right), \quad (5)$$

де

$$\sigma_j^2 = \left(\sum_{\substack{r=1 \\ r \neq j}}^m d^{-2}(x_r^*, x(k)) \right)^{-1},$$

тобто знов-таки виникає функція щільності розподілу Коші, що може бути використана в якості функції впливу у DENCLUE.

Оцінки (4), (5) пов'язані з так званою, ймовірнісною нечікою кластеризацією. На основі оцінок можуть бути розраховані рівні довіри отриманих результатів за допомогою співвідношень [18, 19]:

$$\begin{cases} Cr_j(k) = \frac{1}{2}(\mu_j^*(k) + 1 - \sup \mu_r^*(k)), \\ \mu_j^*(k) = \frac{\mu_j(k)}{\sup \mu_r(k)}. \end{cases}$$

Таким чином, введена процедура нечіткої кластеризації, що базується на аналізі щільностей розподілу даних та їх піків, дозволяє скоротити час вирішення задачі за рахунок зменшення кількості звернень до блоку оптимізації, що відшукує екстремуми-атрактори прийнятої функції щільності.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Дослідження методу нечіткої довірчої кластеризації даних на основі аналізу щільності розподілу даних та їх піків (NCrCP) проводились на двох навчальних вибірках UCI репозиторію Page Blocks та Spambase. В Таблиці 1 продемонстровані основні характеристики наборів даних.

Таблиця 1 – Зразки даних

Назва вибірки	Кількість спостережень	Кількість атрибутів	Кількість кластерів
Page Blocks	5472	10	5
Spambase	4601	57	2

Page Blocks – набір даних, який містить інформацію про класифіковані блоки макету сторінки в документі, який було виявлено процесом сегментації.

Spambase – ілюструє класифіковану електронну пошту як спам та не спам.

На рисунках 1 та 2 продемонстровані набори вибірок даних, що аналізуються.

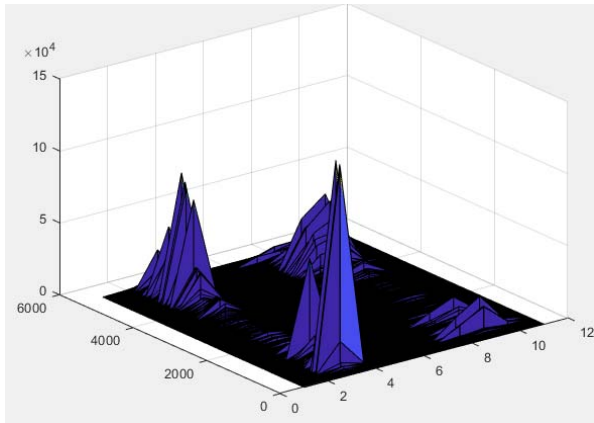


Рисунок 1 – Навчальна вибірка Page Blocks

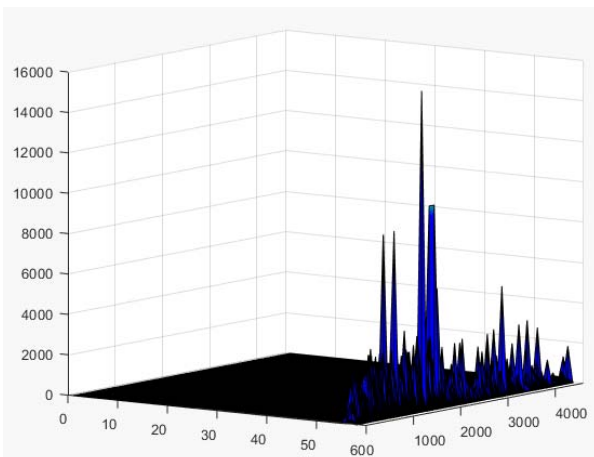


Рисунок 2 – Навчальна вибірка Spambase

Робота запропонованого методу перевірялась за допомогою декількох класичних показників якості кластеризації, а саме індекс Дана (DI), індекс Девіса-Болдіна (DBI) та кластерна точність (CA).

Індекс Дана (DI) – цей індекс оцінює ступінь поділу між спостереженнями одного кластера, тобто внутрішню схожість спостережень в кластері. Чим вище значення, тим краща кластеризація.

Індекс Девіса-Болдіна (DBI) – цей індекс, як DI, також оцінює ступінь поділу між кластерами (межкластерна несхожість), найменше значення вказує на кращу кластеризацію.

Кластерна точність (CA) – вимірює відсоток правильно класифікованих об'єктів у кластері на основі попередньо визначених міток класів. Цей індекс не працює з немаркованою базою даних, високе значення вказує на найкращу якість кластеризації.

Порівняльний аналіз проводився з більш відомими методами кластеризації даних, такими як DENCLUE-SA (імітований відпал), DENCLUE та DENCLUE-GA (генетичний алгоритм).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати кластеризації тестових даних різними методами кластеризації представлено на рисунках 3 і 4, які демонструють якісні характеристики кластеризації.

Як видно із гістограм, можна зробити висновки, що запропонований метод нечіткої довірчої кластеризації даних на основі аналізу щільності розподілу даних та їх піків (NCrCP) кластеризує дані якісніше за більшістю якісних характеристик кластеризації.

Зокрема, якість методу кластеризації повинна відповідати вимогам не тільки якості кластеризації, а й швидкості і простоти з точки зору математичних розрахунків. Тому був проведений аналіз швидкості розрахунків кластеризації методу нечіткої довірчої кластеризації даних на основі аналізу щільності розподілу даних та їх піків та вище згаданих методів кластеризації. В табл. 2 наведений порівняльний результат швидкості роботи методів кластеризації.

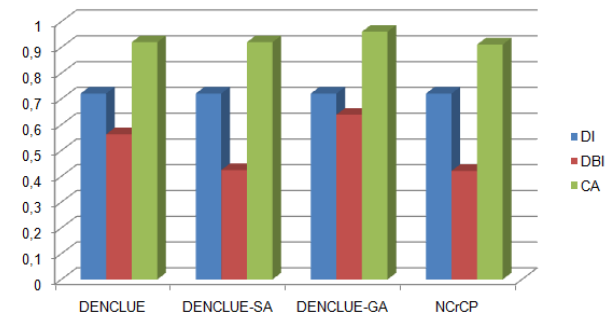


Рисунок 3 – Показники якості кластеризації Page Blocks

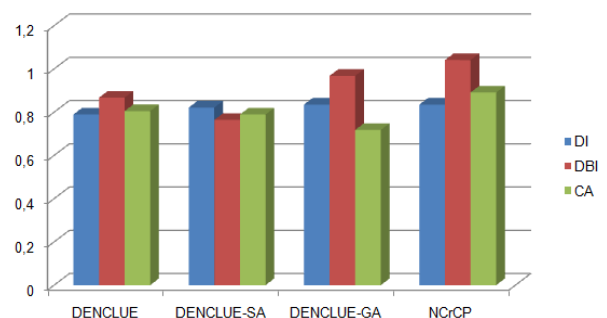


Рисунок 4 – Показники якості кластеризації Spambase

Таблиця 2 – Порівняння роботи алгоритмів за часом (с.)

Data	DENCLUE	DENCLUE-SA	DENCLUE-GA	NCrCP
Page Blocks	71	107	158	7
Spambase	1285.9	1347	574	29

6 ОБГОВОРЕННЯ

За результатами експериментальних досліджень та аналізу отриманих результатів, можна зробити висновок, що запропонований метод нечіткої довірчої кластеризації даних на основі аналізу щільності розподілу даних та їх піків (NCrCP) кластеризує дані якісніше за більшістю якісних характеристик кластеризації, демонструє гарні результати роботи порівняно із класичними методами кластеризації: DENCLUE-SA, DENCLUE та DENCLUE-GA.

Можна також зауважити, що метод не поступається кластерною точністю та швидкістю, що само за себе говорить про якість отриманих результатів кластеризації.

ВИСНОВКИ

Введено метод нечіткої кластеризації масивів даних, що базується на ідеях аналізу щільностей розподілу цих даних, їх піків та довірчого нечіткого підходу.

Перевагою запропонованого підходу є скорочення часу вирішення оптимізаційних задач, пов'язаних з відшукуванням атракторів функцій щільностей, оскільки кількість звернень до блоку оптимізації визначається не обсягом аналізованого масива, а кількістю піків щільностей цього ж масиву. Метод є досить простим у чисельній реалізації і не критичним до вибору оптимізаційної процедури. Результати експериментів підтверджують ефективність пропонованого підходу в задачах кластеризації за умов перетинних кластерів.

Наукова новизна: вперше запропонований метод нечіткої кластеризації даних, що базується на ідеях аналізу щільностей розподілу цих даних, їх піків та довірчого нечіткого підходу.

Практичне значення: результати експерименту дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці для вирішення проблем автоматичної кластеризації великих даних.

Перспективи подальших досліджень методи нечіткої кластеризації даних для широкого класу практичних проблем.

ПОДЯКА

Робота виконана в рамках науково-дослідного проекту державного бюджету Харківського національного університету радіоелектроніки «Розробка методів та алгоритмів комбінованого навчання глибоких нейро-нео-фаззі систем за умов короткої навчальної вибірки» (номер державної реєстрації 0122U001701).

ЛІТЕРАТУРА/ЛИТЕРАТУРА

1. Gan G. Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications / G. Gan, Ch. Ma, J. Wu. – Philadelphia, Pennsylvania : SIAM, 2007. – 455 p.
2. Abonyi J., Feil D. Cluster Analysis for Data Mining and System Identification / J. Abonyi, D. Feil. – Basel : Birkhauser, 2007. – 303 p.
3. Xu R. Clustering / R. Xu, D. C. Wunsch. – Hoboken N.J. : John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 398 p.
4. Aggarwal C. C. Data Mining / C. C. Aggarwal. – Switzerland : Springer, 2015. – 727 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14142-8>.
5. Fuzzy Clustering Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition / [Höppner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T.] – Chichester : John Wiley & Sons, 1999. – 300 p.
6. Bezdek J. C. et al. Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing [Bezdek J. C. et al.]. – Springer Science & Business Media, 1999. – Vol. 4.
7. Hinneburg A. An efficient approach to clustering in large multimedia databases with noise / A. Hinneburg, D. Klein // Proc. 4th Int. Conf. in Knowledge Discovering and Data Mining – KDD98, N.Y.: AAAI Press, Aug. 27, 1998. – Hinneburg, 1998. – P. 58–65.
8. Hinneburg, A., DENCLUE 2.0: Fast Clustering Based on Kernel Density Estimation / A. Hinneburg, HH. Gabriel In: R. Berthold, M., Shawe-Taylor, J., Lavrač, N. (eds) // Advances in Intelligent Data Analysis VII. IDA. – 2007. – Lecture Notes in Computer Science. – Vol. 4723. – Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74825-0_7
9. Hinneburg A. A general approach to clustering in large databases with noise / A. Hinneburg, D. A. Keim // Knowledge and Identification Systems. – 2003. – 5 (4). – P. 387–415. <https://doi.org/10.1007/s10115-003-0086-9>
10. DENCLUE-IM: A new approach for big data clustering / [H. Rehhioni, A. Idrissi, M. Abourezq, F. Zegrari] // Procedia Computer Science. – 2016. – 83. – P. 560–567.
11. Rodriguez A. Clustering by fast search and find of density peaks / A. Rodriguez, A. Laio // Science. – 2014. – № 34. – P. 1492–1496. <https://doi.org/10.1126/science.124207>
12. Online Credibilistic Fuzzy Clustering Method Based on Cauchy Density Distribution Function / [A. Shafronenko, Ye. Bodyanskiy, I. Pliss, I. Klymova] // 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT): proceedings. – Deggendorf, Germany: IEEE, 2021. – P. 704–707. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548572
13. Epanechnikov V. A. Nonparametric estimation of multivariate probability density / V. A. Epanechnikov // Probability theory and its Application – 1968 – 14, № 2 – P. 156–161.
14. Parzen E. On estimation of a probably density function and mode / E. Parzen // The Annals of Math Statistics. – 1962. – 33, № 3. – P. 1065–1076. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
15. Nadaraya E. A. On nonparametric estimates of density function and regression curves / E. A. Nadaraya // Theory of Probabilistic Application. – 1965. – № 10 – P. 186–190.
16. Watson G. S. Smooth regression analysis / G. S. Watson // The Indian Journal of Statistics. Sankhya. – 1964. – Ser. A. – 26, № 4. – P. 359–372.
17. Fukunaga K. The estimation of the gradient of a density function with application in pattern recognition / K. Fukunaga, L. D. Hostler // IEEE Trans. on Inf. Theory, Jan.,

- 1975 – IEEE. – 1975. – № 21 – P. 32–40. <https://doi.org/10.1109/TIT.1975.10.55330>.
18. Credibilistic clustering: the model and algorithms. / [J. Zhou, Q. Wang, C.-C. Hung, X. Yi] // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. – 2015. – Vol. 23, №4. – P. 545–564. <https://doi.org/10.1142/S0218488515500245>
19. Zhou J. Credibilistic clustering algorithms via alternating cluster estimation / J. Zhou, Q. Wang, C. C. Hung // Journal of Intelligent Manufacturing. – 2017. – Vol. 28. – P. 727–738. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-014-1004-6>.
20. Online credibilistic fuzzy clustering of data using membership functions of special type [Electronic resource] / [Shafronenko A., Bodyanskiy Ye., Klymova I., Holovin O.] // Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), April 27–1 May 2020. – Zaporizhzhia, 2020. – Access mode: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper56.pdf>.
Стаття надійшла до редакції 15.05.2022.
Після доробки 23.08.2022.

УДК 004.8:004.032.26

НЕЧЕТКАЯ ДОВЕРИТЕЛЬНАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ДАННЫХ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ И ИХ ПИКОВ

Бодянский Е. В. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Плисс И. П. – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ПНДЛ АСУ Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Шафроненко А. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Калиниченко О. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программной инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Задача кластеризации – классификации без учителя массивов данных занимает достаточно важное место в интеллектуальном анализе данных. Для решения этой задачи на данный момент предложено множество подходов, отличающихся друг от друга априорными предположениями в исследуемых и анализируемых массивах, а так же математическим аппаратом, заключающимся в основе тех или иных методов, однако решение задач кластеризации усложняет большая размерность векторов анализируемых наблюдений, их искаженность разного типа.

Цель. Цель работы заключается во внедрении процедуры нечеткой кластеризации, объединяющей преимущества методов, основанных на анализе плотностей распределения данных и их пиков, которые характеризуются высоким быстродействием и может эффективно работать в условиях классов, которые пересекаются.

Метод. Введен метод нечеткой кластеризации массивов данных, основанный на идеях анализа плотностей распределения этих данных, их пиков и доверительного нечеткого подхода. Преимуществом предлагаемого подхода является сокращение времени решения оптимизационных задач, связанных с отысканием аттракторов функций плотностей, поскольку количество обращений в блок оптимизации определяется не объемом анализируемого массива, а количеством пиков плотностей этого же массива.

Результаты. Метод достаточно прост в численной реализации и не критичен к выбору оптимизационной процедуры. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предлагаемого подхода в задачах кластеризации при условии пересечения кластеров и позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике для решения проблем автоматической кластеризации больших объемов данных.

Выводы. Введен метод нечеткой кластеризации массивов данных, основанный на идеях анализа плотностей распределения этих данных, их пиков и доверительного нечеткого подхода. Преимуществом предлагаемого подхода является сокращение времени решения оптимизационных задач, связанных с отысканием аттракторов функций плотностей, поскольку количество обращений в блок оптимизации определяется не объемом анализируемого массива, а количеством пиков плотностей этого же массива. Метод достаточно прост в численной реализации и не критичен к выбору оптимизационной процедуры. Результаты экспериментов подтверждают эффективность предлагаемого подхода в задачах кластеризации в условиях пересекающихся кластеров.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нечеткая кластеризация, правдоподобная кластеризация, пики плотности распределения данных.

UDC 004.8:004.032.26

CREDIBILISTIC FUZZY CLUSTERING BASED ON ANALYSIS OF DATA DISTRIBUTION DENSITY AND THEIR PEAKS

Bodyanskiy Ye. V. – Dr. Sc., Professor at the Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Pliss I. P. – PhD, Leading Researcher at Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Shafronenko A. Yu. – PhD, Associate Professor Professor at the Department of Informatics, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Kalynychenko O. V. – PhD, Associate Professor Professor at the Department of Software Engineering, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The task of clustering – classification without a teacher of data arrays occupies a rather important place in Data Mining. To solve this problem, many approaches have been proposed at the moment, differing from each other in a priori assumptions in the studied and analyzed arrays, in the mathematical apparatus that is the basis of certain methods. The solution of clustering problems is complicated by the large dimension of the vectors of the analyzed observations, their distortion of various types.

Objective. The purpose of the work is to introduce a fuzzy clustering procedure that combines the advantages of methods based on the analysis of data distribution densities and their peaks, which are characterized by high speed and can work effectively in conditions of classes that overlapping.

Method. The method of fuzzy clustering of data arrays, based on the ideas of analyzing the distribution densities of these data, their peaks, and a confidence fuzzy approach has been introduced. The advantage of the proposed approach is to reduce the time for solving optimization problems related to finding attractors of density functions, since the number of calls to the optimization block is determined not by the volume of the analyzed array, but by the number of density peaks of the same array.

Results. The method is quite simple in numerical implementation and is not critical to the choice of the optimization procedure. The experimental results confirm the effectiveness of the proposed approach in clustering problems under the condition of cluster intersection and allow us to recommend the proposed method for practical use in solving problems of automatic clustering of large data volumes.

Conclusions. The method is quite simple in numerical implementation and is not critical to the choice of the optimization procedure. The advantage of the proposed approach is to reduce the time for solving optimization problems related to finding attractors of density functions, since the number of calls to the optimization block is determined not by the volume of the analyzed array, but by the number of density peaks of the same array. The method is quite simple in numerical implementation and is not critical to the choice of the optimization procedure. The experimental results confirm the effectiveness of the proposed approach in clustering problems under conditions of overlapping clusters.

KEYWORDS: fuzzy clustering, credibilistic clustering, density peak of dataset.

REFERENCES

1. Gan G., Ma Ch., Wu J. *Data Clustering: Theory, Algorithms and Applications*. Philadelphia, Pennsylvania, SIAM, 2007, 455 p.
2. Abonyi J., Feil D. *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification*. Basel, Birkhäuser, 2007, 303 p.
3. Xu R., Wunsch D. C. *Clustering*. Hoboken N.J., John Wiley & Sons, Inc., 2009, 398 p.
4. Aggarwal C. C. *Data Mining*. Switzerland, Springer, 2015, 727 p. DOI <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14142-8>.
5. Höppner F., Klawonn F., Kruse R., Runkler T. *Fuzzy Clustering Analysis: Methods for Classification, Data Analysis and Image Recognition*. Chichester, John Wiley & Sons, 1999, 300 p.
6. Bezdek J. C. et al. *Fuzzy models and algorithms for pattern recognition and image processing*. Springer Science & Business Media, 1999, Vol. 4.
7. Hinneburg A., Klein D. An efficient approach to clustering in large multimedia databases with noise, *Proc. 4th Int. Conf. in Knowledge Discovering and Data Mining, KDD98, N.Y.: AAAI Press, Aug. 27, 1998*. Hinneburg, 1998, pp. 58–65.
8. Hinneburg A., Gabriel HH. In: R. Berthold, M., Shawe-Taylor, J., Lavrač, N. (eds) *DENCLUE 2.0: Fast Clustering Based on Kernel Density Estimation*. Advances in Intelligent Data Analysis VII. IDA 2007. Lecture Notes in Computer Science, Vol. 4723. Springer. Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74825-0_7
9. Hinneburg A., Keim D. A. A general approach to clustering in large databases with noise, *Knowledge and Identification Systems*, 2003, 5 (4), pp. 387–415. <https://doi.org/10.1007/s10115-003-0086-9>
10. Rehhioni H., Idrissi A., Abourezq M., Zegrari F. DENCLUE-IM: A new approach for big data clustering, *Procedia Computer Science*, 2016, 83, pp. 560–567.
11. Rodriguez A., Laio A. Clustering by fast search and find of density peaks, *Science*, 2014, No. 34, pp. 1492–1496. <https://doi.org/10.1126/science.124207>
12. Shafronenko A., Bodyanskiy Ye., Pliss I., Klymova I. Online Credibilistic Fuzzy Clustering Method Based on Cauchy Density Distribution Function, *2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT): proceedings*. Deggendorf, Germany, IEEE, 2021, pp. 704–707. DOI: 10.1109/ACIT52158.2021.9548572
13. Epanechnikov V. A. Nonparametric estimation of multivariate probability density, *Probability theory and its Applications*, 1968, 14, No. 2, pp. 156–161.
14. Parzen E. On estimation of a probably density function and mode, *The Annals of Math Statistics*, 1962, 33, No. 3, pp. 1065–1076. <http://dx.doi.org/10.1214/aoms/1177704472>
15. Nadaraya E. A. On nonparametric estimates of density function and regression curves, *Theory of Probabilistic Application*, 1965, No. 10, pp. 186–190.
16. Watson G. S. Smooth regression analysis, *The Indian Journal of Statistics*. Sankhya, 1964, Ser. A, 26, No. 4, pp. 359–372.
17. Fukunaga K., Hostler L. D. // The estimation of the gradient of a density function with application in pattern recognition, *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Jan., 1975, IEEE, 1975, No. 21 pp. 32–40. <https://doi.org/10.1109/TIT.1975.10.55330>.
18. Zhou J., Wang Q., Hung C.-C., Yi X. Credibilistic clustering: the model and algorithms, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2015, Vol. 23, No. 4, pp. 545–564. <https://doi.org/10.1142/S0218488515500245>
19. Zhou J., Wang Q., Hung C. C. Credibilistic clustering algorithms via alternating cluster estimation, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2017, Vol. 28, pp. 727–738. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10845-014-1004-6>.
20. Shafronenko A., Bodyanskiy Ye., Klymova I., Holovin O. Online credibilistic fuzzy clustering of data using membership functions of special type [Electronic resource, *Proceedings of The Third International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2020), April 27-1 May 2020*. Zaporizhzhia, 2020. Access mode: <http://ceur-ws.org/Vol-2608/paper56.pdf>.

OPTIMIZATION OF SWARM ROBOTICS ALGORITHMS

Vakaliuk T. A. – Dr. Sc., Professor, Professor at the Department of software engineering, Zhytomyr Polytechnic State University, Zhytomyr, Ukraine.

Kukharchuk R. P. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Mathematics Education and Computer Science, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Hlukhiv, Ukraine.

Zaika O. V. – PhD, Senior Lecturer of Physics and Mathematics Education and Computer Science, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Hlukhiv, Ukraine.

Riabko A. V. – PhD, Senior Lecturer of Physics and Mathematics Education and Computer Science, Oleksandr Dovzhenko Hlukhiv National Pedagogical University, Hlukhiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Among the variety of tasks solved by robotics, one can single out a number of those for the solution of which small dimensions of work are desirable and sometimes necessary. To solve such problems, micro-robots with small dimensions are needed, the mass of which allows them to move freely in tight passages, in difficult weather conditions, and remain unnoticed. At the same time, the small dimensions of the microrobot also impose some indirect restrictions; therefore, it is better to use groups of microrobots for the solution of these problems. The efficiency of using groups of microrobots depends on the chosen control strategy and stochastic search algorithms for optimizing the control of a group (swarm) of microrobots.

Objective. The purpose of this work is to consider a group of swarm algorithms (methods) belonging to the class of metaheuristics. The group of these algorithms includes, in particular, the ant colony algorithm, the possibilities of which were investigated to solve the traveling salesman problem, which often arises when developing an algorithm for the behavior of a group of microrobots.

Method. At the first stage of the study, the main groups of parameters were identified that determine the flow and characterize the state at any time of the ant colony algorithm: input, control, disturbance parameters, output parameters. After identifying the main groups of parameters, an algorithm was developed, the advantage of which lies in scalability, as well as guaranteed convergence, which makes it possible to obtain an optimal solution regardless of the dimension of the graph. At the second stage, an algorithm was developed, the code of which was implemented in the Matlab language. Computer experiments were carried out to determine the influence of input, control, output, and disturbance parameters on the convergence of the algorithm. Attention was paid to the main groups of indicators that determine the direction of the method and characterize the state of the swarm of microrobots at a given time. In the computational experiment, the number of ants placed in the nodes of the network, the amount of pheromone, the number of graph nodes were varied, the number of iterations to find the shortest path, and the execution time of the method were determined. The final test of modeling and performance of the method was carried out.

Results. Research has been carried out on the application of the ant algorithm for solving the traveling salesman problem for test graphs with a random arrangement of vertices; for a constant number of vertices and a change in the number of ants, for a constant number of vertices at different values of the coefficient Q ; to solve the traveling salesman problem for a constant number of vertices at different values of the pheromone evaporation coefficient p ; for a different number of graph vertices. The results showed that ant methods find good traveling salesman routes much faster than clear-cut combinatorial optimization methods. The dependence of the search time and the found optimal route on the values of control parameters are established using the example of test networks for a different number of graph vertices and iterations.

Conclusions. The studies were carried out to make it possible to give recommendations on the application of the ant colony algorithm to control a group (swarm) of microrobots.

KEYWORDS: swarm robotics, ant colony optimization algorithm, salesman problem.

ABBREVIATIONS

ACO is a ant colony optimization algorithm.

NOMENCLATURE

I_i is a input parameters;

H_k is a perturbation parameters;

O_z is a output parameters;

C_i is a control parameters;

α is a control parameter;

β is a control parameter;

Q is a control parameter;

p is a control parameter;

m is a number of ants;

n is a number of vertices;

t is a time.

INTRODUCTION

One of the current problems is the natural increase in the complexity of management systems, which, in turn, is determined not only by increasing production productivity, speed of processing operational information, but also the commissioning of increasingly complex distributed technical and technological systems (transport, information, energy, etc.). Effective operation of the latter depends on purposeful activities related to obtaining the best results under appropriate conditions. Ultimately, such activities are reduced to solving the problems of continuous global optimization.

Usually, scientific publications on robotics address issues related to the use of a single robot. Such a robot is equipped with a powerful onboard computer, a large supply of onboard energy, and, as a rule, a significant set

of working bodies. This configuration leads to an increase in the size and weight of the robot, which in turn significantly limits the possible scope of its application. At the same time, among the variety of tasks that are solved by robotics, we can identify a number of those for which small dimensions of the work are desirable and sometimes necessary. These include the task of reconnaissance of territories and waters in the face of organized enemy resistance, the task of finding victims in debris after natural or man-made disasters, the task of finding and disposing of explosive devices in anti-terrorist operations in dense urban areas, the study of surfaces of other planets and others.

To solve such problems requires micro-robots with small dimensions, the mass of which allows you to move freely in narrow passages, difficult weather conditions, to remain unnoticed. Such works are characterized by lower costs for transportation of the technical complexity of equipment to the place of work. However, the small size of microrobots imposes some restrictions: 1) complicated movement in unprepared space, because relatively small protrusions and depressions on the surface can impede the movement of microrobots; 2) it becomes more difficult to perform tasks on the movement of large bodies (for example, victims in the earthquake zone, or rock samples) by a single microrobot.

The small size of the microrobot also imposes some indirect restrictions: 1) a small stock of onboard energy; 2) small size and power consumption of means of communication lead to limitation of the maximum radius of radio communication; 3) significantly a limited number of available working tools.

These restrictions apply to a single microrobot. Therefore, the obvious solution to these problems may be the use of a group of microrobots that can combine efforts to solve complex problems. Microrobots can help each other to overcome obstacles [13], to transport large bodies together [21]. Information exchange in a group of robots allows expanding the information available to each work about the environment. In this case, some tasks can be distributed between microrobots and run in parallel. For example, while some group work collects environmental data, others collect soil samples.

The need to use a large number of different work tools requires the use of a heterogeneous group, ie a group consisting of robots of different designs (for example, the Swarmanoid project [6]). At first glance, it seems that the advantages of using a group of microrobots compared to using a single robot, which is equipped with a sufficient number of functional elements, are not obvious. But do not forget that when used in groups, microrobots retain all the above advantages of small robots: primarily the ability to move in confined spaces, lightweight, and size. Group use of microrobots reduces the risk of task failure because damage to one or more group microrobots in the general case (especially in swarm and collective management strategies, discussed later in the article) does not disrupt the task, although it reduces the effectiveness of the group. At the same time, damage to individual units of a

single robot can lead to disruption of work, and attempts to duplicate the most important functional units of the robot lead to increased weight, size, cost of work, but does not increase efficiency (even reduces due to large size and weight).

The effectiveness of the use of groups of microrobots depends on the chosen control strategy. Scholars usually distinguish between centralized and decentralized management strategies [3]. In centralized management strategies, there is some central control device, which has access to information about the state of all robots in the group and the environment. The control device assesses the current situation and decides on the actions of the group's robots [24]. The central control device can be located outside the group (for example, on the operator's control panel), or onboard one of the robots of the group. In the latter case, talk about centralized control with a master device. Centralized management strategies show good results with a small number of robots in a group. As the group size increases, the load on the communication channel and the computing means of the control device increase. One way out is to apply hierarchical control strategies in which a group of robots is divided into subgroups, each with its leader (usually a group of robots), and subgroup leaders are controlled by a central control device onboard one of the robots or outside the group. Hierarchical management strategies complicate the nature of communications between the work of the group, resulting in serious requirements for onboard communication equipment. Obstacles in the communication channel have an extremely negative impact on the work of the group in centralized management strategies. In addition, the failure of a robot that performs the functions of managing a group or subgroup leads to serious problems – the connection with all the work under its control is lost.

Decentralized management strategies for groups of robots include collective, team, and swarm management strategies. In a collective management strategy, each robot in the group receives information from all other robots in the group and transmits the information they collect about the environment and their condition to the communication channel so that this information is available to all other robots in the group. Thus, the information exchange in the group of robots in collective management is carried out on the principle of "everyone with everyone". Due to this, each robot can independently assess the current situation and decide on the need for further action. Collective management strategies allow the team to maintain performance in the event of failure of one or more robots of the group. The load on the communication channel increases in direct proportion to the increase in the number of groups of robots. The load on the onboard computing devices of robots is also increasing because they need to process the received contact information.

The upper limit of the allowable group size in collective management methods is on average higher than in centralized ones, but the scaling of these methods

leaves much to be desired. In cohesive control strategies, there is no dedicated communication channel for the exchange of information between robots, each robot collects information about the environment independently and also independently decides on their next steps to contribute to the group task. Lack of communication between group work in team management strategies allows you to successfully solve only those tasks that can be easily divided into independent unrelated subtasks. The main advantage of cluster control strategies is scalability: as the number of robots increases, the computational complexity of control tasks does not increase, which allows the use of cluster strategies to control very large groups of microrobots.

Thus, the objective of the article is to study the optimization possibilities of swarm robotics algorithms.

The object of research is the ant colony optimization algorithm.

The subject of the research is the use of the ant colony optimization algorithm for solving the traveling salesman problem.

1 PROBLEM STATEMENT

Let the list of input variables be specified: 1) m is a number of ants; 2) n is a number of vertices; 3) α , β , Q and p – control parameters. The task at the time was to determine the effect of input, control, perturbation parameters on the convergence and time performance of the ant colony algorithm (ACO) when solving the traveling salesman problem (TSP). List of output variables: 1) t is a time; 2) the number of iterations to find the optimal solution; 3) the length of the best way (tour). Limitations: number of iterations of the algorithm 300; the coordinates of the vertices were taken in the range from 0 to 100; the number of vertices varied from 20 to 200; number of ants from 5 to 400.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

At the end of the twentieth century, stochastic search engine optimization algorithms became the most popular in solving swarm control problems. This article focuses on the group of swarm algorithms (methods) that belong to the class of metaheuristics. The group of these algorithms includes: 1) the ant colony algorithm; 2) bee algorithm; 3) particle swarm algorithm; 4) stochastic diffusion algorithm; 5) cuckoo algorithm; 6) bacterial optimization algorithm; 7) gravity search algorithm; 8) algorithm of water drops [18].

In these algorithms, individuals that are part of the swarm (ants, bees, bacteria, etc.), in practice, are implemented in the form of software agents. The general scheme of swarm algorithms is based on the following stages: 1) in the field of search in a certain way creates some initial approximations to the desired solution – the initialization of the population of agents; 2) with the help of some set of migration operators (specific tactics for each of the swarm algorithms) agents move in the search area so that, in the end, approach the desired extremum of the objective function; 3) check the condition of the end

of iterations. If the last condition is met, the calculations are completed. In this case, the best of the found positions of the agents is taken as an approximate solution. If the condition is not met – Return to stage 2. Widespread practical application in the class of metaheuristics has acquired algorithms of the ant colony, which allow finding approximate solutions to search problems on graphs for polynomial time.

Swarm intelligence methods [5] are used to solve many practical problems of Swarmanoid [10], can be used to control large groups of robots, which led to the emergence of a separate direction Swarm Robotics [1]. Each robot in the group interacts only with some neighboring robots that fall within the range of visibility, which is limited by the range of its telecommunications devices (or artificially limited). Each robot independently decides on further actions based on simple local rules (simple rules, local rules). The work is available information about the environment, which he collected himself, as well as information about the environment and the state of some of the robots of the group, which was passed to him by neighboring works. The robot transmits the collected information about the environment, as well as about its state to the communication channel. This information becomes available to those robots in the field of view of which this robot falls (in the case of the same radii of the field of view – it's neighboring work). Thanks to this approach, works receive more information about the environment than with team management strategies, and the information available to them relates to the environment, ie the most relevant. This preserves the scaling – increasing the number of groups does not increase the load on onboard computers.

Methods of swarm intelligence open wide opportunities for the development of microrobots of mass use, allowing the successful use of large groups of microrobots. A reasonable question arises: why swarms of microrobots are still not found in practice, and the achievements of swarm robotics are limited to several experimental projects (Swarm-bot [16], Swarmanoid [6], I-SWARM [18]) and some theoretical works.

One of the obvious obstacles to the development of swarm robotics is the fact that the objects of control in it are numerous groups of microrobots, which implies the presence of inexpensive mass production of microrobots. Technologies of such products are based on the most modern technical achievements. Progress in the field of microelectronics, mechatronics, and nanotechnology gives reason to hope that soon mass production of microrobots will be not only possible but also economically feasible.

The second obstacle is the lack of general theory and approaches in the creation and development of swarm management methods in groups of robots. Currently, much of the research is devoted to the use of natural analogs of swarm intelligence methods to solve technical problems: ants [2], bees [11], flocks of birds and shoals of fish [14], immune systems [19], [8]) became prototypes for creating various methods of swarm intelligence.

Here, individuals who are part of the swarm (ants, bees, immune bodies), in practice, are implemented in the form of software agents. The general scheme of swarm algorithms is based on the following steps.

1) In the field of search in one way or another creates some initial approximations to the desired solution – the initialization of the population of agents.

2) With the help of some set of migration operators (specific tactics for each of the swarm algorithms), the agents move in the search area so that, in the end, they approach the desired extremum of the target function.

3) Check the condition of the end of iterations. If this condition is true, the calculations are completed. In this case, the best of the found positions of the agents is taken as an approximate solution. If the condition is incorrect – return to step 2.

Differences in the tasks and capabilities of natural and technical systems make it difficult to find and adapt natural algorithms to solve technical problems. Some studies are carried out to create artificial methods of swarm intelligence, which are designed solely to solve practical problems. Unfortunately, the lack of a unified approach complicates these studies. Each new task is solved every time almost “from scratch”.

Danielli A. Lima [12] propose an inverted ant cellular automata (IACA) model for swarm robots performing the surveillance task. A new distributed coordination strategy is described, which was designed with cellular automata-based modeling and using a repulsive pheromone-based search.

David Payton [15] describe how a robot swarm can become a distributed computing mesh embedded within the environment, while simultaneously acting as a physical embodiment of the user interface. With this simple peer-to-peer messaging scheme, many coordinated activities can be accomplished without centralized control.

An inverted ant cellular automata model called IACA-DI is proposed for the coordination of a swarm of robots performing the surveillance task [20]. The swarm communicates indirectly through the repulsive pheromone, which is available as neighborhood information. The pheromone is deposited at each time step by each robot over its neighborhood.

Schroeder [17] propose a control law for efficient area coverage and pop-up threat detection by a robot swarm inspired by the dynamical behavior of ant colonies foraging for food. They are performance metrics that evaluate area coverage in terms of characteristics such as rate, completeness, and frequency of coverage are developed.

The design of robot swarms inspired by self-organization in social insect groups is currently an active research area with a diverse portfolio of potential applications. Deshpande [3] propose a control law for efficient area coverage by a robot swarm in a 2D spatial domain, inspired by the unique dynamical characteristics of ant foraging.

Dimidov [4] analyze the efficiency of random walk patterns for a swarm of Kilobots searching a static target in two different environmental conditions entailing a bounded or open space. They study the search efficiency and the ability to spread information within the swarm through numerical simulations and real robot experiments.

Fricke [8] use a robot swarm to evaluate the effectiveness of a Lévy search strategy and map the relationship between search parameters and target configurations. They show that the fractal dimension of the Lévy search, which optimizes search efficiency, depends strongly on the distribution of targets but only weakly on the number of agents involved in the search.

Using computer simulations, Fujisawa [9] that the Lévy walk-like searching strategy can maximize the group foraging efficiency of the swarm robots using pheromone trails (mimicking ant group foraging), as well as maximize individual searching area.

Efremov [7] reviewed approaches to a swarm of simple robot behavior design for solving the more complex problem of foraging.

3 MATERIALS AND METHODS

In the given work the generalized algorithm of the organization of swarm interaction based on the dynamic behavior of a colony of ants is offered. The indicators of the effectiveness of the method of covering the territory based on virtual pheromones are considered (Fig. 1).

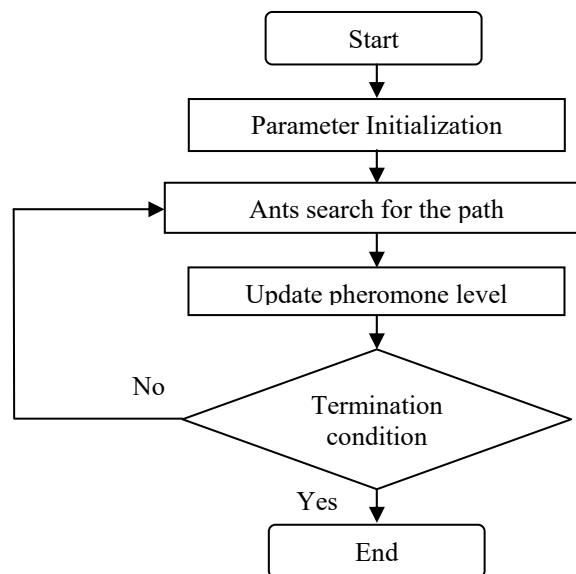


Figure 1 – Flow chart of ant colony optimization algorithm

The authors of this study propose to consider the process of the behavior of a swarm of agents in such a way as to obtain the selection of the main groups of parameters that determine its course and characterize the state at any time. This approach is used to solve optimization problems, for example, in the field of chemistry. According to this approach, it is possible to

select the following groups of parameters for the behavior of an ant colony.

1) Input parameters $I_i, i \in \overline{1, m}$. The values of this group of parameters can be measured, but they cannot be influenced. When solving the salesman's problem, this group should include quantitative characteristics of the search area (for example, dimension and weights of the adjacency matrix).

2) Control parameters $C_j, j \in \overline{1, r}$. These parameters should be considered as variables that can be directly influenced to control the process itself. Such adjustable parameters for solving the salesman's problem can be, for example, the initial values of the parameters α, β, Q, p , and m .

3) Perturbation parameters $H_k, k \in \overline{1, e}$. The values of these variables change over time randomly. As a rule, the values of the perturbation parameters are not available for measurement. For the salesman's task, these parameters can be the characteristic of the "desire" of the agent η_{ij} , the amount of pheromone τ_{ij} , etc.

4) Output parameters $O_z, z \in \overline{1, n}$. For these variables, the values are determined by the mode of the swarm behavior. These parameters describe the state of the process resulting from the total action of input, control parameters, and perturbation parameters. The initial parameters can be considered the number of iterations that are performed to find the solution, the proximity of the found solution to the optimal, etc.

4 EXPERIMENTS

After identifying the main groups of parameters that determine the course and characterize the state at any time of the ant colony algorithm (ant colony optimization algorithm), computational experiments were performed to influence the input, control, perturbation parameters, output parameters on the convergence of the algorithm.

The advantage of the algorithm is its scalability, as well as guaranteed convergence, which allows you to get the optimal solution regardless of the dimension of the graph. The only drawback is that the convergence rate of the algorithm is unknown.

In the experiments, the number of ants placed in the nodes of the network varied: 1–5, 10, 30, 50. During the random experiments, different network topologies were generated, and the number of iterations at which the optimal cycle was achieved was recorded.

Table 1 shows the dependence of the search time and the optimal route found on the example of randomly generated test graphs shown in Figure 2 with the number of iterations 300. The coordinates of the vertices of the graphs were generated using the function Randi ():

$$x = \text{randi}(100, 1, 20);$$

$$y = \text{randi}(100, 1, 20);$$

Table 1 shows the dependence of the search time and the optimal route found on the values of the control parameters on the example of the test networks shown in Fig. 2.

Table 2 shows the dependence of the search time and the optimal route found on the number of ants on the example of a graph with the number of vertices 20 with the number of iterations 300. The coordinates of the vertices of the graph were chosen arbitrarily:

$$x = [82 \ 91 \ 10 \ 19 \ 63 \ 15 \ 28 \ 55 \ 96 \ 87 \ 15 \ 98 \ 96 \ 49 \ 80 \ 14 \ 42 \ 92 \ 89 \ 43];$$

$$y = [6 \ 30 \ 85 \ 19 \ 68 \ 16 \ 75 \ 39 \ 66 \ 79 \ 71 \ 3 \ 27 \ 4 \ 9 \ 83 \ 68 \ 21 \ 95 \ 3];$$

According to the results obtained, the following conclusions can be drawn:

1) with a constant number of vertices n and a change in the number of ants m and iterations t , time costs change according to the estimate of time complexity $Q(m \cdot t \cdot n^2)$;

Table 1 – Application of the ant algorithm for solving the salesman problem for test graphs with a random arrangement of vertices

№ networks	Number of ants	p	α	β	Q	Number of vertices	Number of iterations to find the optimal solution	Result	Time, s
1	40	0.1	1	1	1	20	104	385.6315	22.847178
2	40	0.1	1	1	1	20	29	340.9843	22.458717
3	40	0.1	1	1	1	20	272	405.6638	22.755844
4	40	0.1	1	1	1	20	136	376.4947	22.737581
5	40	0.1	1	1	1	20	246	384.7575	22.546910
6	40	0.1	1	1	1	20	91	336.088	22.494738
7	40	0.1	1	1	1	20	230	342.5689	22.420198
8	40	0.1	1	1	1	20	239	368.5756	22.860189
9	40	0.1	1	1	1	20	162	325.4138	22.602328
10	40	0.1	1	1	1	20	75	347.0352	23.463464
11	40	0.1	1	1	1	20	230	366.0119	22.635822
12	40	0.1	1	1	1	20	37	385.2827	22.472831
13	40	0.1	1	1	1	20	24	291.521	22.500305
14	40	0.1	1	1	1	20	232	448.2383	22.488642
15	40	0.1	1	1	1	20	93	414.5459	22.417555

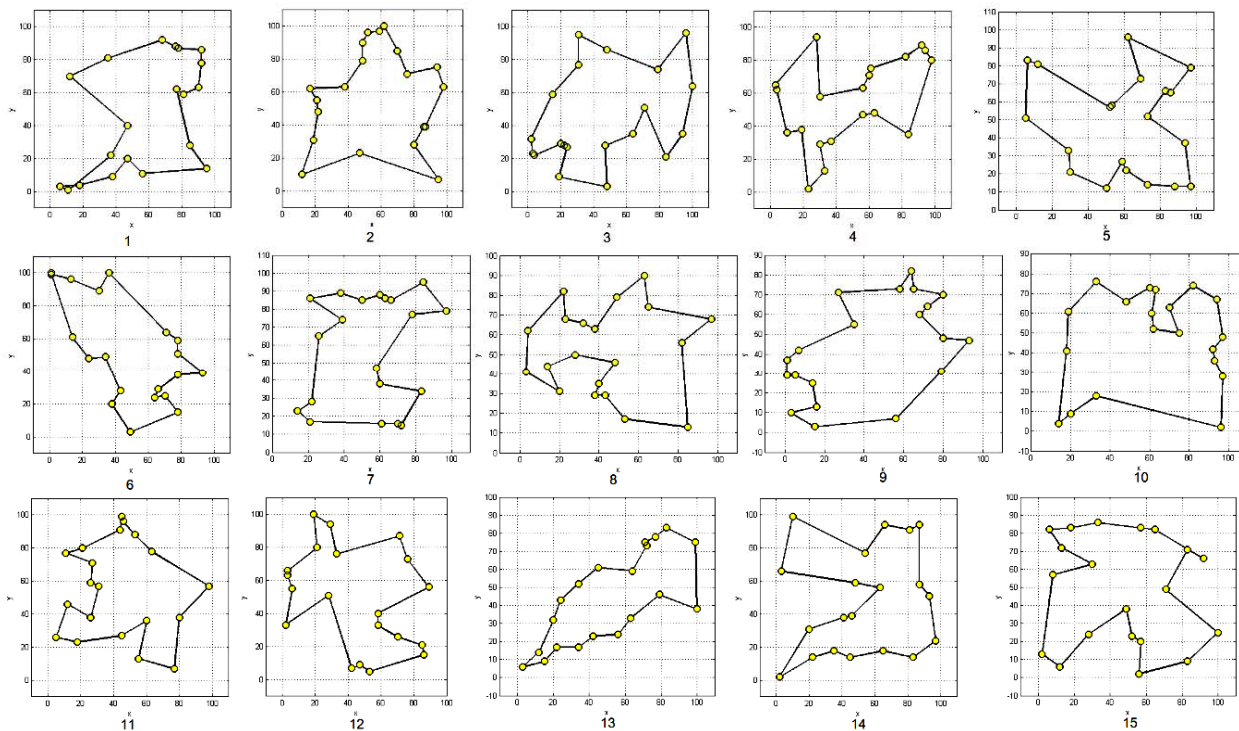


Figure 2 – Graphs to table 1

Table 2 – Application of the ant algorithm to solve the salesman problem for a constant number of vertices and change the number of ants

№ networks	Number of ants	p	α	β	Q	Number of vertices	Number of iterations to find the optimal solution	Result	Time, s
1	5	0.1	1	1	1	20	232	395.5417	15.992249
2	10	0.1	1	1	1	20	75	400.1229	14.405423
3	15	0.1	1	1	1	20	235	400.6502	16.202756
4	20	0.1	1	1	1	20	187	396.1515	16.977871
5	25	0.1	1	1	1	20	261	395.5417	19.182736
6	30	0.1	1	1	1	20	137	395.5417	23.441613
7	35	0.1	1	1	1	20	157	395.5417	25.109654
8	40	0.1	1	1	1	20	106	395.5417	26.945276
9	60	0.1	1	1	1	20	185	395.5417	33.179504
10	80	0.1	1	1	1	20	62	395.5417	43.445270
11	100	0.1	1	1	1	20	99	395.5417	47.043559
12	150	0.1	1	1	1	20	153	395.5417	62.791894
13	200	0.1	1	1	1	20	94	395.5417	80.507522
14	300	0.1	1	1	1	20	21	395.5417	113.99703
15	400	0.1	1	1	1	20	53	395.5417	143.40482

2) changing the parameter m affects the time cost, but does not guarantee a better result. This is due to the probabilistic approach to the choice of peaks by ants.

The values of the control parameter Q are selected in the same order as the length of the optimal route. Q depends on the length of the path to the destination: the shorter the path, the greater should be the value of Q : $1 \leq Q \leq 10000$.

A computational experiment showed (Table 3) that changing the control factor Q does not have a significant effect on finding the optimal solution.

Parameters α and β set the weight of the pheromone trace and visibility when choosing a route. They vary within $0 \leq \alpha \leq 5$; $1 \leq \beta \leq 5$. The computational experiment allowed us to identify the optimal combinations of parameters used in the ant colony algorithm (Table 4).

In case of unsuccessful selection of parameters, the following situations may occur:

1. Large values of the parameter α , at which ants enter a dead-end without finding solutions.
2. At small values of the α -parameter, ants can find the path from the starting point to the end, but this path is not optimal.

Table 3 – Application of the ant algorithm for solving the salesman problem for a constant number of vertices at different values of the coefficient Q

№ networks	Number of ants	p	α	β	Q	Number of vertices	Number of iterations to find the optimal solution	Result	Time, s
1	40	0.1	1	1	1	20	152	395.5417	25.516824
2	40	0.1	1	1	650	20	88	395.5417	22.386155
3	40	0.1	1	1	1300	20	139	395.5417	22.359020
4	40	0.1	1	1	2000	20	246	396.1515	22.053672
5	40	0.1	1	1	2600	20	195	395.5417	22.323921
6	40	0.1	1	1	3250	20	202	395.5417	22.714128
7	40	0.1	1	1	4000	20	34	395.5417	23.427087
8	40	0.1	1	1	4600	20	50	396.1515	22.297267
9	40	0.1	1	1	5250	20	207	395.5417	22.361742
10	40	0.1	1	1	6000	20	136	395.5417	22.536203
11	40	0.1	1	1	6650	20	106	395.5417	22.382881
12	40	0.1	1	1	7300	20	163	395.5417	22.254868
13	40	0.1	1	1	8000	20	84	395.5417	22.217386
14	40	0.1	1	1	9000	20	23	395.5417	22.793634
15	40	0.1	1	1	10000	20	296	395.5417	23.697207

3. In the third case, it is possible to find the optimal solution (Table 4).

Table 4 – The optimal set of α and β parameters

α parameter	β parameter
0.5	0.5
5.0	5.0
1.0	1.0

5 RESULTS

The results obtained in the process of the computational experiment can be explained as follows: the parameter α allows taking into account the experience of previous generations of ants, while β is focused only on the path length. Only with the right combination of parameter values is it possible to find the optimal route.

Initial experiments with the ant colony algorithm found that ants come to a decision quickly and spend little time exploring alternative pathways. To force ants to do more research and to prevent premature convergence, the pheromone on the links is allowed to “evaporate” in each iteration of the algorithm before they increase based on

the newly constructed pathways (2). The evaporation coefficient of pheromone p varies within $0.1 \leq p \leq 0.99$. The constant p determines the rate at which pheromones evaporate, causing ants to “forget” about previous decisions. In other words, p determines the degree of influence of the search history. For large values of p , the pheromone evaporates rapidly, while small values of p lead to a slowing of the evaporation rate (Table 5). The more pheromones evaporate, the more random the search becomes, which improves intelligence. For $p = 1$, the search is completely random.

In the calculation process, the execution time of the algorithm was recorded depending on the number of vertices of the graph (Table 6, Fig. 3). A number of iterations 500.

Analysis of the obtained time characteristics of the route calculation shows that as the number of vertices in the graph increases, the time required to find the route increases (Fig. 4).

Table 5 – Application of the ant algorithm for solving the salesman problem for a constant number of vertices at different values of the pheromone evaporation coefficient p

№ networks	Number of ants	p	α	β	Q	Number of vertices	Number of iterations to find the optimal solution	Result	Time, s
1	40	0.10	1	1	1	20	96	395.5417	22.665959
2	40	0.16	1	1	1	20	80	395.5417	22.389597
3	40	0.22	1	1	1	20	69	395.5417	22.574964
4	40	0.28	1	1	1	20	216	395.5417	22.288871
5	40	0.34	1	1	1	20	42	398.6139	22.282747
6	40	0.40	1	1	1	20	19	395.5417	22.303454
7	40	0.46	1	1	1	20	186	400.1162	22.171169
8	40	0.52	1	1	1	20	43	395.5417	22.197507
9	40	0.57	1	1	1	20	102	395.5417	22.340538
10	40	0.63	1	1	1	20	265	395.5417	22.165415
11	40	0.69	1	1	1	20	241	395.5417	22.264250
12	40	0.75	1	1	1	20	54	397.184	22.521302
13	40	0.81	1	1	1	20	147	398.474	22.347847
14	40	0.87	1	1	1	20	243	395.5417	22.887289
15	40	0.99	1	1	1	20	86	395.5417	22.227174

Table 6 – Application of the ant algorithm for solving the salesman problem for different numbers of graph vertices

№ networks	Number of ants	p	α	β	Q	Number of vertices	Number of iterations to find the optimal solution	Result	Time, s
1	40	0.1	1	1	1	20	158	361.2807	25.662532
2	40	0.1	1	1	1	33	173	443.1308	29.997125
3	40	0.1	1	1	1	46	257	602.3146	39.447256
4	40	0.1	1	1	1	59	299	647.2844	45.851241
5	40	0.1	1	1	1	71	76	798.1173	52.468550
6	40	0.1	1	1	1	84	289	830.3252	63.123333
7	40	0.1	1	1	1	97	264	910.8729	69.387167
8	40	0.1	1	1	1	110	290	982.5124	78.692760
9	40	0.1	1	1	1	123	299	1064.4672	89.291780
10	40	0.1	1	1	1	136	267	1105.5601	99.569191
11	40	0.1	1	1	1	149	296	1196.1199	116.750170
12	40	0.1	1	1	1	161	214	1255.0331	129.761123
13	40	0.1	1	1	1	174	276	1262.4144	139.675033
14	40	0.1	1	1	1	187	266	1344.9961	154.827335
15	40	0.1	1	1	1	200	298	1515.7214	168.314706

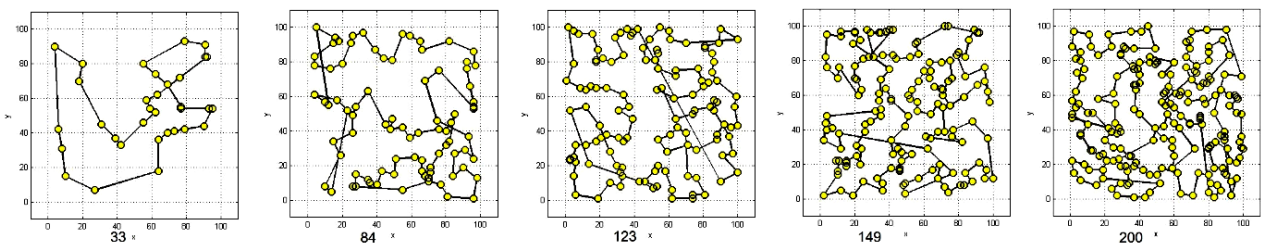


Figure 3 – Some graphs to table 6: with 33, 84, 123, 149, and 200 vertices

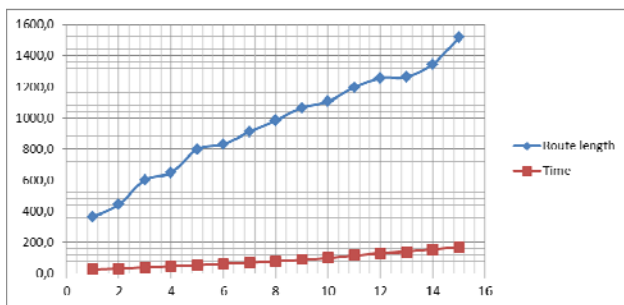


Figure 4 – Dependence of the time of the ant algorithm and the length of the found route on the number of vertices in the graph at 300 iterations

6 DISCUSSION

The study identified the main groups of parameters that determine the course and characterize the state at any time of the ant colony algorithm and performed computational experiments to influence the input, control, perturbation parameters, output parameters on the convergence of the algorithm.

Ant algorithms are an example of an adequate mathematical model of ant colony activity, which is suitable for creating computer methods for the probabilistic solution of some combinatorial problems.

The basic idea behind the ant colony algorithm is to use a positive feedback mechanism to help find the best approximate solution to complex optimization problems.

The efficiency of ant algorithms increases with an increasing dimension of the optimization problem. Ant algorithms provide solutions to other combinatorial problems no worse than general metaheuristic optimization technologies and some problem-oriented

methods. All this allows us to recommend the use of ant algorithms to solve complex combinatorial optimization problems and their application, in particular, to the optimization of group robotics algorithms.

The paper investigates the application of the ant algorithm for solving the salesman problem for test graphs with a random arrangement of vertices; for a constant number of vertices and a change in the number of ants, for a constant number of vertices at different values of the coefficient Q ; to solve the problem of the salesman for a constant number of vertices at different values of the evaporation coefficient of the pheromone p ; for different numbers of graph vertices. The analysis of the obtained time characteristics of the route calculation was also performed. The computational experiment allowed us to identify the optimal combinations of parameters used in the ant colony algorithm.

It is known that most likely it will not be possible to construct an exact polynomial algorithm for the traveling salesman problem. Apparently, these simply do not exist. Therefore, it is necessary either to go beyond the scope of polynomial algorithms, or to seek approximate solutions to the problem. But the ant colony optimization algorithm approach may not be simpler than the exact solution of the problem. This algorithm can be applied to a relatively small number of ants and graph vertices.

Ant Colony Optimization (ACO) refers to metaheuristics, that is, in general algorithms that can be applied to almost any discrete optimization problem. All metaheuristics are iterative procedures, and for many of them asymptotic convergence of the best found solution to the global optimum has been established.

The ACO idea is an attempt to imitate the behavior of ants that have almost no sight and are guided by the smell left by their predecessors. It should be noted that ACO is not the optimal method for solving this problem. In the future, it is necessary to continue to work on optimizing algorithms used in swarm robotics.

CONCLUSIONS

The article shows how to implement the components of the self-organization of ants in the algorithm for solving discrete optimization problems in the example of the salesman problem.

The scientific novelty of the research lies in the fact that the dependence of the search time and the found optimal route on the values of control parameters is established using the example of test networks for a different number of graph vertices and iterations.

The ant colony optimization algorithm was further developed.

The practical value is that the stated variant of the description of the process of behavior is supposed to be extended to the whole group of swarm algorithms.

Prospects for further research are that the received description of processes is planned to be used for further researches – statement and carrying out computational experiments for parametric optimization of swarm algorithms, which are used for management of a swarm of robots.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the management of Zhytomyr Polytechnic State University and the management of Hlukhiv National Pedagogical University named after Oleksandr Dovzhenko for assistance in scientific cooperation. There are no sources of funding.

REFERENCES

1. Beni, G. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics, *International Workshop on Swarm Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 1–9. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_1
2. Colomi A., Dorigo M., & Maniezzo, V. Distributed optimization by ant colonies, *Proceedings of the first European conference on artificial life*, 1991, Vol. 142, pp. 134–142. <https://faculty.washington.edu/paymana/swarm/colomi92-ecal.pdf>
3. Deshpande A., Kumar M., & Ramakrishnan S. Robot swarm for efficient area coverage inspired by ant foraging: the case of adaptive switching between brownian motion and lévy flight, *Dynamic Systems and Control Conference*, American Society of Mechanical Engineers, 2017, October, Vol. 58288, pp. 1–8. DOI: 10.1115/DSCC2017-5229
4. Dimidov C., Oriolo G., & Trianni V. Random walks in swarm robotics: an experiment with kilobots, *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, Cham, 2016, pp. 185–196. DOI: 10.1007/978-3-319-44427-7_16
5. Dorigo M., Floreano D., Gambardella L. M., Mondada F., Nolfi S., Baaboura T., ... & Vaussard F. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms, *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 2013, Vol. 20(4), pp. 60–71. DOI: 10.1109/MRA.2013.2252996
6. Efremov M. A., & Kholod I. I. Swarm Robotics Foraging Approaches, *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 2020, January, pp. 299–304. IEEE. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039340
7. Fricke G. M., Hecker J. P., Cannon J. L., & Moses M. E. Immune-inspired search strategies for robot swarms. *Robotica*, 2016, No. 34(8), pp. 1791–1810. DOI: 10.1017/S0263574716000382
8. Fujisawa R., & Dobata S. Lévy walk enhances efficiency of group foraging in pheromone-communicating swarm robots. In *Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration*, IEEE, 2013, pp. 808–813. DOI: 10.1109/SII.2013.6776760
9. Grosan C., Abraham A., & Chis M. Swarm intelligence in data mining, *Swarm Intelligence in Data Mining*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006, pp. 1–20. DOI: 10.1007/978-3-540-34956-3_1
10. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, *Technical Report TR06*, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005, Vol. 200, pp. 1–10. https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf
11. Lima D. A., Tinoco C. R., & Oliveira G. M. A cellular automata model with repulsive pheromone for swarm robotics in surveillance, *International Conference on Cellular Automata*. Springer, Cham, 2016, pp. 312–322. DOI: 10.1007/978-3-319-44365-2_31
12. O'Gra R., Grob R., Christensen & Dorigo M. Performance Benefits of Self-Assembly in a Swarm-Bot, *IEEE Computer Society Press*, 2007, pp. 2381–2387. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399424
13. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory, *IEEE Transactions on automatic control*, 2006, Vol. 51(3), pp. 401–420. DOI: 10.1109/TAC.2005.864190
14. Payton D., Estkowski R., & Howard M. Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones, *International Workshop on Swarm Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, July, pp. 45–57. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_5
15. Şahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application, *International workshop on swarm robotics*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 10–20. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_2
16. Schroeder A., Ramakrishnan S., Kumar M., & Trease B. Efficient spatial coverage by a robot swarm based on an ant foraging model and the Lévy distribution, *Swarm Intelligence*, 2017, Vol. 11(1), pp. 39–69. DOI: 10.1007/s11721-017-0132-y
17. Seyfried J., Szymanski M., Bender N., Estana R., Thiel M., & Wörn H. The I-SWARM project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation, *International Workshop on Swarm Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004, pp. 70–83. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_7
18. Shtovba, S. D. Ant algorithms: theory and applications, *Programming and Computer Software*, 2005, Vol. 31(4), pp. 167–178. DOI: 10.1007/s11086-005-0029-1
19. Timmis J., Andrews P., & Hart E. (). On artificial immune systems and swarm intelligence, *Swarm Intelligence*, 2010, Vol. 4(4), pp. 247–273. DOI: 10.1007/s11721-010-0045-5
20. Tinoco C. R., Lima D. A., & Oliveira G. M. (). An improved model for swarm robotics in surveillance based on cellular automata and repulsive pheromone with discrete diffusion, *International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems*, 2019, Vol. 34(1), pp. 53–77. DOI: 10.1080/17445760.2017.1334886
21. Valentini G., Brambilla D., Hamann H. & Dorigo M. Collective Perception of Environmental Features in a Robot Swarm, *International Conference on Swarm Intelligence*. Springer, 2016, pp. 65–76. DOI: 10.1007/978-3-319-44427-7_6
22. Wilson S., Pavlic T. P., Kumar G. P., Buffin A., Pratt S. C., & Berman S. Design of ant-inspired stochastic control policies for collective transport by robotic swarms, *Swarm Intelligence*, 2014, Vol. 8(4), pp. 303–327. DOI: 10.1007/s11721-014-0100-8

Received 10.01.2022.
Accepted 25.07.2022.

УДК 004.23

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ГРУПОВОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

Вакалюк Т. А. – доктор педагогічних наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення, Державний університет «Житомирська політехніка», Житомир, Україна.

Кухарчук Р. П. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри фізико-математичної освіти та інформатики, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, Глухів, Україна.

Заїка О. В. – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри фізико-математичної освіти та інформатики, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, Глухів, Україна.

Рябко А. В. – кандидат педагогічних наук, старший викладач кафедри фізико-математичної освіти та інформатики, Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка, Глухів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Серед різноманіття завдань, які вирішуються робототехнікою, можна виділити цілий ряд таких, для вирішення яких невеликі габарити робота бажані, а часом і необхідні. Для вирішення подібних завдань необхідні мікророботи з малими габаритами, маса яких дозволяє безперешкодно переміщатися у тісних проходах, складних погодних умовах, залишатися непоміченими. Водночас, малі габарити мікроробота накладають також і ряд непрямих обмежень, що зумовлює застосування для означених завдань групи мікророботів. Ефективність застосування груп мікророботів залежить від обраної стратегії управління і стохастичних пошукових алгоритмів оптимізації управління групою (роем) мікророботів.

Мета. Метою даної роботи є розгляд групи ройових алгоритмів (методів), які відносяться до класу метаевристик. До групи означених алгоритмів відноситься, зокрема, алгоритм мурашиної колонії, можливості якого досліджувалися для розв'язування задачі комівояжера, яка часто постає при розробці алгоритму поведінки групи мікророботів.

Метод. На першому етапі дослідження було виділено основні групи параметрів, які визначають перебіг і характеризують стан в будь-який момент часу алгоритму мурашиної колонії: вхідні, керуючі, параметри збурення, вихідні. Після виділення основних груп параметрів було розроблено алгоритм, перевага якого полягає в масштабованості, а також гарантованій збіжності, що дозволяє отримати оптимальний розв'язок незалежно від розмірності графа. На другому етапі розроблений алгоритм АСО (ant colony optimization algorithm) було реалізовано на мові Matlab. Були проведені комп'ютерні експерименти з метою визначення впливу вхідних, керуючих, вихідних і параметрів збурення на збіжність алгоритму. Було приділено увагу основним групам показників, які визначають напрямок способу і характеризують стан рою мікророботів у даний момент часу. В обчислювальному експерименті варіювалася кількість мурах, що розміщуються у вузлах мережі, місткість феромона, чисельність вузлів графа, визначалася чисельність ітерацій для розшуку найменшого шляху та час виконання методу. Проведено тест підсумків моделювання та продуктивності методу.

Результати. Проведено дослідження застосування мурашиного алгоритму для розв'язування задачі комівояжера для тестових графів з випадковим розташуванням вершин; для постійної кількості вершин і зміні кількості мурах, для постійної кількості вершин при різних значеннях коефіцієнта Q ; для розв'язування задачі комівояжера для постійної кількості вершин при різних значеннях коефіцієнта випаровування феромону p ; для різної кількості вершин графа. Результати показали, що мурашині способи знаходять хороші маршрути комівояжера значно швидше, ніж чіткі методи комбінаторної оптимізації. Встановлено залежності часу пошуку і знайденого оптимального маршруту від значень керуючих параметрів на прикладі тестових мереж для різної кількості вершин графа та ітерацій.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють дати рекомендації щодо застосування алгоритму мурашиної колонії АСО (ant colony optimization algorithm) для управління групою (роем) мікророботів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: рой роботів, алгоритм мурашиної колонії, задача комівояжера.

УДК 004.23

ОПТИМІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ГРУПОВОЇ РОБОТОТЕХНІКИ

Вакалюк Т. А. – доктор педагогических наук, профессор, профессор кафедры инженерии программного обеспечения, Государственный университет «Житомирская политехника», Житомир, Украина.

Кухарчук Р. П. – кандидат педагогических наук, доцент кафедры физико-математического образования и информатики, Глуховский национальный педагогический университет имени Александра Довженка, Глухов, Украина.

Заика О. В. – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры физико-математического образования и информатики, Глуховский национальный педагогический университет имени Александра Довженка, Глухов, Украина.

Рябко А. В. – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры физико-математического образования и информатики, Глуховский национальный педагогический университет имени Александра Довженка, Глухов, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Среди многообразия задач, решаемых робототехникой, можно выделить целый ряд таких, для решения которых небольшие габариты работа желательны, а подчас и необходимы. Для решения подобных задач необходимы микророботы с малыми габаритами, масса которых позволяет беспрепятственно перемещаться в тесных проходах, в сложных погодных условиях и оставаться незамеченными. В то же время малые габариты микроробота накладывают также и ряд косвенных ограничений, поэтому к применению для решения указанных задач лучше использовать группы микророботов. Эффективность применения групп микророботов зависит от выбранной стратегии управления и стохастических поисковых алгоритмов оптимизации управления группой (роем) микророботов.

Цель. Целью данной работы является рассмотрение группы роевых алгоритмов (методов), относящихся к классу метаэвристик. К группе этих алгоритмов относится, в частности, алгоритм муравьиной колонии, возможности которого исследовались для решения задачи коммивояжера, часто возникающей при разработке алгоритма поведения группы микророботов.

Метод. На первом этапе исследования были выделены основные группы параметров, определяющих течение и характеризующие состояние в любой момент времени алгоритма муравьиной колонии: входящие, управляющие, параметры возмущения, выходные параметры. После выделения основных групп параметров был разработан алгоритм, преимущество которого заключается в масштабируемости, а также гарантированной сходимости, позволяющей получить оптимальное решение независимо от размерности графа. На втором этапе разработан алгоритм, код которого был реализован на языке Matlab. Были

© Vakaliuk T. A., Kukharchuk R. P., Zaika O. V., Ryabko A. V., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-7

проведені комп'ютерні експерименти з метою визначення впливу входних, управляючих, вихідних і параметрів возмущення на швидкість алгоритму. Було уделено увагу основним групам показателів, визначаючих напрямок способу і характеризуючих стан роя мікророботів в даний момент часу. В експерименті варіювалося кількість мурашів, розміщених в вузлах мережі, кількість феромону, число вузлів графа, визначалося кількість ітерацій для пошуку найкоротшого шляху і час виконання методу. Проведено підсумковий тест моделювання і продуктивності методу.

Результати. Проведено дослідження застосування мурашиного алгоритму для розв'язання задачі коммивояжера для тестових графів з випадковим розподілом вершин; для постійного числа вершин і змінності числа мурашів, для постійного числа вершин при різних значеннях коефіцієнта Q ; для розв'язання задачі коммивояжера для постійного числа вершин при різних значеннях коефіцієнта випаровування феромону p ; для різного числа вершин графа. Результати показали, що мурашині способи знаходять хороші маршрути коммивояжера значно швидше, ніж точні методи комбінаторної оптимізації. Встановлено залежність часу пошуку і знайденого оптимального маршруту від значень управляючих параметрів на прикладі тестових мереж для різного числа вершин графа і ітерацій.

Висновки. Проведені дослідження дозволяють дати рекомендації по використанню алгоритму мурашиної колонії для управління групою (роем) мікророботів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: рой роботів, алгоритм мурашиної колонії, задача коммивояжера.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Beni G. From Swarm Intelligence to Swarm Robotics / G. Beni // International Workshop on Swarm Robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 1–9. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_1
2. Colomi A. Distributed optimization by ant colonies [Electronic Resource] / A. Colomi, M. Dorigo, V. Maniezzo // Proceedings of the first European conference on artificial life. – 1991. – Vol. 142. – P. 134–142. Access mode: <https://faculty.washington.edu/paymana/swarm/colomi92-ecal.pdf>
3. Deshpande A. Robot swarm for efficient area coverage inspired by ant foraging: the case of adaptive switching between brownian motion and lévy flight / A. Deshpande, M. Kumar, S. Ramakrishnan // Dynamic Systems and Control Conference. American Society of Mechanical Engineers. – 2017. – Vol. 58288. – P. 1–8. DOI: 10.1115/DSCC2017-5229
4. Dimidov C. Random walks in swarm robotics: an experiment with kilobots / C. Dimidov, G. Oriolo, V. Trianni // International Conference on Swarm Intelligence. – Springer, Cham, 2016. – P. 185–196. DOI: 10.1007/978-3-319-44427-7_16
5. Swarmanoid: a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms / [M. Dorigo, D. Floreano, L. M. Gambardella et al.] // IEEE Robotics & Automation Magazine. – 2013. – Vol. 20(4). – P. 60–71. DOI: 10.1109/MRA.2013.2252996
6. Efremov M. A. Swarm Robotics Foraging Approaches / M. A. Efremov, I. I. Kholod // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). – IEEE, 2020. – P. 299–304. DOI: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039340
7. Immune-inspired search strategies for robot swarms / [G. M. Fricke, J. P. Hecker, J. L. Cannon, M. E. Moses] // Robotica. – 2016. – Vol. 34 (8). – P. 1791–1810. DOI: 10.1017/S0263574716000382
8. Fujisawa R. Lévy walk enhances efficiency of group foraging in pheromone-communicating swarm robots / R. Fujisawa, S. Dobata // Proceedings of the 2013 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, IEEE, 2013. – P. 808–813. DOI: 10.1109/SII.2013.6776760
9. Grosan C. Swarm intelligence in data mining / C. Grosan, A. Abraham, M. Chis // Swarm Intelligence in Data Mining. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. – P. 1–20. DOI: 10.1007/978-3-540-34956-3_1
10. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization [Electronic Resource] / D. Karaboga // Technical Report TR06. – Vol. 200. – Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005. – P. 1–10. – Access mode: https://abc.erciyes.edu.tr/pub/tr06_2005.pdf
11. Lima D. A. A cellular automata model with repulsive pheromone for swarm robotics in surveillance / D. A. Lima, C. R. Tinoco, G. M. Oliveira // International Conference on Cellular Automata. – Springer, Cham, 2016. – P. 312–322. DOI: 10.1007/978-3-319-44365-2_31
12. O'Gra R. Performance Benefits of SelfAssembly in a Swarm-Bot / R. O'Gra, R. Grob, Christensen, M. Dorigo // IEEE Computer Society Press, 2007. – P. 2381–2387. DOI: 10.1109/IROS.2007.4399424
13. Olfati-Saber R. Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory / R. Olfati-Saber // IEEE Transactions on automatic control. – 2006. – Vol. 51(3). – P. 401–420. DOI: 10.1109/TAC.2005.864190
14. Payton D. Pheromone robotics and the logic of virtual pheromones / D. Payton, R. Estkowski, M. Howard // International Workshop on Swarm Robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 45–57. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_5
15. Şahin E. Swarm robotics: From sources of inspiration to domains of application / E. Şahin // International workshop on swarm robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 10–20. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_2
16. Efficient spatial coverage by a robot swarm based on an ant foraging model and the Lévy distribution / [A. Schroeder, S. Ramakrishnan, M. Kumar, B. Trease] // Swarm Intelligence. – 2017. – Vol. 11(1). – P. 39–69. DOI: 10.1007/s11721-017-0132-y
17. Seyfried J. The I-SWARM project: Intelligent small world autonomous robots for micro-manipulation / [J. Seyfried, M. Szymanski, N. Bender et al.] // International Workshop on Swarm Robotics. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2004. – P. 70–83. DOI: 10.1007/978-3-540-30552-1_7
18. Shtovba S. D. Ant algorithms: theory and applications / S. D. Shtovba // Programming and Computer Software. – 2005. – Vol. 31(4). – P. 167–178. DOI: 10.1007/s11086-005-0029-1
19. Timmis J. On artificial immune systems and swarm intelligence / J. Timmis, P. Andrews, E. Hart // Swarm Intelligence. – 2010. – Vol. 4(4). – P. 247–273. DOI: 10.1007/s11721-010-0045-5
20. Tinoco C. R. An improved model for swarm robotics in surveillance based on cellular automata and repulsive pheromone with discrete diffusion / C. R. Tinoco, D. A. Lima, G. M. Oliveira // International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems. – 2019. – Vol. 34(1). – P. 53–77. DOI: 10.1080/17445760.2017.1334886
21. Collective Perception of Environmental Features in a Robot Swarm / [G. Valentini, D. Brambilla, H. Hamann, M. Dorigo] // International Conference on Swarm Intelligence. – Springer, 2016. – P. 65–76. DOI: 10.1007/978-3-319-44427-7_6
22. Design of ant-inspired stochastic control policies for collective transport by robotic swarms / [S. Wilson, T. P. Pavlic, G. P. Kumar et al.] // Swarm Intelligence. – 2014. – Vol. 8(4). – P. 303–327. DOI: 10.1007/s11721-014-0100-8

ЕВОЛЮЦІЙНИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ ІМПУЛЬСНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕХАНІЗМУ НЕЙРОПАТЕРНІВ

Леошенко С. Д. – аспірант кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя Україна.

Олійник А. О. – д-р техн. наук, професор, 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.

Гофман Є. О. – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної частини Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна.

Ільяшенко М. Б. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу синтезу імпульсних нейронних мереж на основі еволюційного підходу до синтезу штучних нейронних мереж з використанням нейропатерного механізму для побудови діагностичних моделей з високим рівнем точності роботи. Об'єктом дослідження є процес синтезу імпульсних нейронних мереж з використанням еволюційного підходу та нейропатерного механізму.

Мета роботи полягає у розробці методу синтезу імпульсних нейронних мереж на основі еволюційного підходу з використанням нейропатерного механізму для побудови діагностичних моделей з високим рівнем точності роботи.

Метод. Запропоновано метод синтезу імпульсних нейронних мереж на основі еволюційного підходу. На початку генерується популяція імпульсних нейронних мереж, для їх кодування та подальшого розвитку використовується нейропатерний механізм, що полягає в окремому кодуванні нейронів із різними функціями активації, що визначаються попередньо. Так кожен патерн з декількома точками входу може визначати взаємозв'язок між парою точок. В подальшому, це спрощує еволюційний розвиток мереж. Щоб розшифрувати імпульсну нейронну мережу з патерну координати для пари нейронів передаються в мережу, що створює патерн. Вихідний сигнал мережі визначає вагу і затримку з'єднання між двома нейронами в імпульсній нейронній мережі. Після цього можна оцінити кожен нейромодель після еволюційних змін та перевірити критерії зупинки синтезу. Метод дозволяє знизити ресурсоемність під час синтезу мережі, за рахунок абстрагування еволюційних змін патерну мережі від неї самої.

Результати. Розроблений метод реалізовано та досліджено на прикладі синтезу імпульсної нейронної мережі для використання у якості моделі для технічного діагностування. Використання розробленого методу підвищило точність нейромоделі з тестовою вибіркою на 20%, в залежності від використовуваних обчислювальних ресурсів.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при синтезі імпульсних нейронних мереж у якості основи діагностичних моделей для подальшої автоматизації задач діагностування, прогнозування, оцінювання та розпізнавання образів з використанням великих даних. Перспективи подальших досліджень можуть полягати у використанні нейропатерного механізму для непрямого кодування імпульсних нейронних мереж, що буде забезпечувати, ще більш компактне зберігання даних та пришвидшить процес синтезу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: імпульсна нейронна мережа, топологія, патерн, еволюція, синтез, штучні нейронні мережі, діагностування.

АБРЕВІАТУРИ

CPPN – Compositional Pattern Producing Networks;
MGA – Модифікований генетичний алгоритм;
ReSuMe – Remote supervised learning;
TWEANN – Topology and Weight Evolving Artificial Neural Network;
VP – одиниці вимірювання відстаней між двома коливаннями імпульсу;
ГНМ – глибока нейронна мережа;
ЗПП – зворотне поширення помилки;
ІНМ – імпульсна нейронна мережа;
НП – нейропатерн;
РНМ – рекурентна нейронна мережа;
ШНМ – штучна нейронна мережа.

НОМЕНКЛАТУРА

c – міжнейронні зв'язки ШНМ;
 $Error_{NN}$ – точність роботи ШНМ;

$Error_{task}$ – прийнятна точність;
 $index_{in}$ – індекс першого нейрону в між нейронному зв'язку;
 $index_{out}$ – індекс другого нейрону в між нейронному зв'язку;
 Ind – індивідуум популяції;
 k – кількість міжнейронних зв'язків у ШНМ.
 N_i – множина нейронів на вході мережі;
 N_o – множина нейронів на виході мережі;
 N_h – множина нейронів прихованого шару мережі;
 NN – нейронна мережа;
 $param$ – параметри ШНМ;
 P – популяція індивідуумів;
 ri – випадковий індекс;

struct – структура ШНМ;
Sample – вхідна вибірка даних;
x – пресинаптичний вхід;
X – множина незалежних змінних – ознак;
 y^d – бажане значення на виході;
 y^{real} – реальне значення на виході.
Y – множина значень залежних змінних.

ВСТУП

З появою та початком активного дослідження результатів роботи IBM TrueNorth увага до ІНМ значно зросла [1–6]. Такі нейронні мережі мають ще більший потенціал у галузі штучного інтелекту ніж ГНМ, РНМ та інші сучасні архітектури ШНМ. Це легко пояснюється легкістю їх влаштування у нейроморфні системи (neuromorphic system). Проте в більшості кейсів виникає складність із синтезом та навчанням таких нейромоделей, адже класичні методи не можуть бути застосовані для таких складних моделей. Ряд робіт пропонує використання CPPN [1–6]. Такий підхід в більшій мірі нагадує інший спосіб синтезу ШНМ, а саме групу еволюційних методів, що разом із мета параметрами мережі еволюційно модифікують її структуру – TWEANN [1–6]. Тож метою цієї роботи є дослідити можливість використання еволюційних методів та окремих їх механізмів під час синтезу ІНМ.

Досить часто ШНМ порівнюють із роботою головного мозку. Проте такі мережі взяли від реальних, живих, організмів тільки саму поверхневу форму і суть. Унаслідок занадто великої відмінності реальних нейронних мереж від ШНМ доводиться винаходити різні сурогатні методи навчання мережі. Природно ніде в природі немає навчання мережі ЗПП, як і немає навчання без вчителя в чистому вигляді [1–6].

ІНМ створювалися з більшою відсилкою на реальну роботу мозку, і використовують спосіб передачі інформації на подоби біологічних нейронів. Так, наприклад, у мозкових нейронах, імпульс генерується в момент, коли поточна сума змін мембранного потенціалу перетинає поріг [1–6]. Швидкість виникнення імпульсів і тимчасова модель пучків імпульсів несуть інформацію про зовнішній подразник і протікають обчисленнях. В основі ІНМ схожий метод генерації імпульсів і передачі інформації: нейрони використовують диференційовані, нелінійні функції активації, застосування яких дозволяє створювати структури товщиною більше одного шару [1–6].

Перша модель ІНМ була запропонована ще в 1952 році Аланом Ходжіном і Ендрю Хакслі [7]. Основна риса такої моделі – це генерація і поширення потенціалів дії в нейронах. Після [7] з біологічними уточненнями і великими обчислювальними витратами були запропоновані різноманітні моделі нейронів: Jolivet, Timothy and Gerstner [8]; Izhikevich [9]; Delorme [10]. Остання дуже популярна, так як вона бере до уваги властивості зовнішнього подразника, акумулюючи

протікання заряду через клітинну мембрану, при перетині певного порогу.

Надалі, завдяки дослідженнями Кохонена, Гроссберга і Андерсона сформувався потужний теоретичний фундамент, за допомогою якого став можливим подальший розвиток ШНМ, а саме проектування і реалізація багатшарових структур [4–6]. Але, навчання, як і раніше, залишається величезною проблемою. Так як функції активації мають похідні, то з'являється простір у використанні градієнтних методів оптимізації для навчання нейронних мереж. З поширенням доступних великих маркованих наборів даних для навчання нейронних мереж, зі збільшенням обчислювальної потужності графічних процесорів і просуnutими методами регуляризації, нейронні мережі стають неймовірно багатшаровими, що дозволяє узагальнювати велику кількість невидимих даних. Багатшаровість–величезна перевага в продуктивності нейронних мереж [1–3].

Добре відомо, що здатність мозку розпізнавати складні візуальні моделі або ідентифікувати оратора в галасливій обстановці це результат декількох послідовних етапів обробки і безлічі механізмів навчання, які також вбудовані в ІНМ з глибоким навчанням [7–10]. У порівнянні з ГНМ, навчання ІНМ відбувається на самих ранніх етапах розвитку. Важливою особливістю такого типу систем є нейронна архітектура. Вона набагато краще підходить для обробки просторово-часових даних, особливо в онлайн режимі. Представлення даних у часі і просторі, яким володіють ІНМ, дозволяє таким нейромережам виконувати обчислення на рівні з людським мозком, а також розуміти діяльність мозку в просторово-часовій структурі. Дуже важливо в найближчі роки зрозуміти, як навчити такі нейромережі виконувати різні завдання [1–6].

Якщо подивитися на ІНМ з інженерної точки зору, то цей тип нейромереж має ряд переваг в апаратній реалізації над звичайними ШНМ. Пучки імпульсів в ІНМ розкидані в часі, кожен з них містить величезну кількість інформації, що дозволяє значно знизити енергоспоживання. Таким чином, можна створити апаратну платформу із помірними показниками ресурсоемності, що підлаштовує свою роботу під імпульсну активність. Приклад ІНМ наведено на рис. 1.

Проте, більшість методів навчання ІНМ є все тими ж модифікаціями методу ЗПП з певними адаптаціями до більш складної архітектури ІНМ [11]. Більш того, такі методи не в якому разі не дотичні до етапу синтезу саме топології мережі. Саме тому актуальною є задача розроблення нових методів на основі еволюційного підходу для повноцінного синтезу ІНМ.

Об'єкт дослідження – процес синтезу ІНМ.

Існуючі методи навчання ІНМ забезпечують виконання виключно етапу параметричного синтезу нейромоделі без виконання попереднього структурного синтезу. Це призводить до невизначеності структури ІНМ та проблеми із подальшою практичною імплементацією.

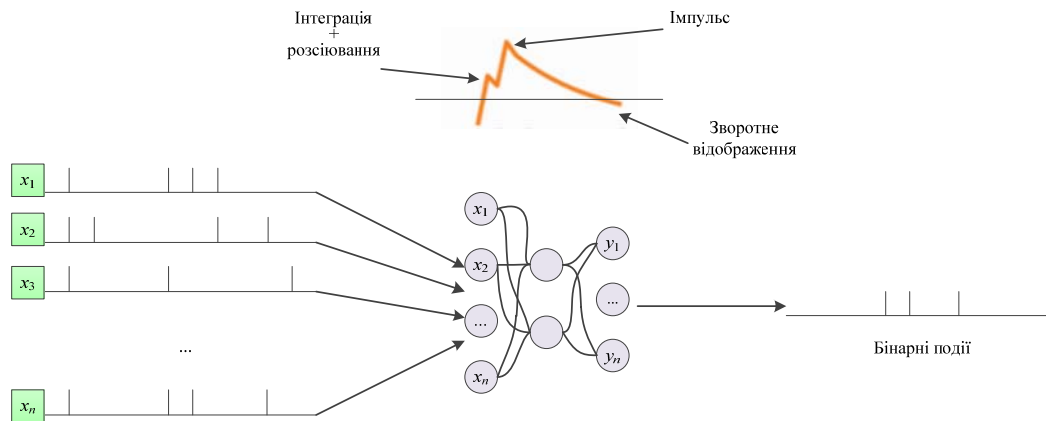


Рисунок 1 – Приклад імплементації ІНМ

Предмет дослідження – метод еволюційного синтезу ІНМ із використанням нейронного механізму.

На сьогоднішній день існує група методів, які застосовують ЗПП до ІНМ. Але такі методи не можуть використовувати традиційні механізми методу ЗПП і змінювати оновлення градієнта або самі ІНМ, і більш того накладають архітектурні обмеження на отримані ІНМ, наприклад, вимагаючи архітектури ІНМ з прямим зв'язком. Отже, існує безліч топологій ІНМ, які не можуть бути оптимізовані за допомогою цих методів. Тому, у роботі запропоновано підхід, що базується на використанні еволюційного підходу, що забезпечує і структурний, і параметричний синтез нейромоделі.

Мета роботи – розробка методу еволюційного синтезу ІНС з використанням нейронного механізму для побудови діагностичних моделей.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Нехай маємо вибірку даних $Sample = \langle X, Y \rangle$, яка складається з множини незалежних змінних $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, що є інформаційними ознаками ознак та множини значень залежних змінних $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, які характеризуються ознаками, тоді n та m – кількість незалежних та залежних змінних (ознак та екземплярів). вхідних ознак, що характеризують екземпляри вибірки.

Тоді використовуючи еволюційний підхід для синтезу ШНМ, ініціалізуємо популяцію ІНМ $P = \{NN_1, NN_2, NN_3, \dots, NN_l\}$, де кожна особина ІНМ буде характеризуватися виключно множиною нейронів $NN_{ri} = Ind_{ri} = \{N_i, N_h, N_o\}$.

Тоді задача синтезу ІНМ буде полягати в тому, щоб через внесення еволюційних змін до структури особин популяції розподілити міжнейронні зв'язки, що будуть відображати взаємозв'язки в даних $struct_{Ind_{ri}} = struct_{NN_{ri}} = \{N_i, N_h, N_o, c\}$, такі зв'язки будуть характеризуватися індексами входу/виходу та ваговим коефіцієнтом

$c = \{c, index_{in}, index_{out}, w\}$, $w = \{w_k\}$. Отримане рішення має забезпечувати прийнятну точність роботи $Error_{NN} \leq Error_{task}$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Варто відзначити, що натхненні біологічним прикладом ІНМ, в принципі, набагато краще і швидше розпізнають образи, ніж звичайні ШНМ [11]. Більш того, ІНМ дозволяють використовувати методи навчання, що залежать від часу виникнення імпульсів між парами безпосередньо з'єднаних нейронів, в яких інформація для зміни ваги ребер доступна локально. Цей метод навчання дуже нагадує те, що відбувається в багатьох частинах мозку.

Виникаючі пучки імпульсів представляють у вигляді недиференційованих сум дельта-функцій. Відповідно, складно застосовувати методи оптимізації, засновані на похідних, для навчання ІНМ, хоч і останнім часом активно йде дослідження різних типів наближених похідних. Незважаючи на те, що в теорії імпульсних нейронних мереж мають еквівалентну за Тьюрингом обчислювальну потужність [12], все ще проблематично навчати ІНМ, особливо ті, що мають багатопшарову архітектуру. У багатьох існуючих імпульсних нейронних мережах, навчати можна лише один шар. Якщо вийде забезпечити імпульсні системи багатопшаровим навчанням, то продуктивність в різного роду завданнях виросте в десятки разів.

Архітектура імпульсних нейронних мереж складається з імпульсних нейронів і взаємопов'язаних синапсів [7–9]. Пучки імпульсів в нейронних мережах імпульсних нейронів поширюються через синаптичні зв'язки. Синапс може бути як збудливим, коли мембранний потенціал нейрона зростає після отримання сигналу, так і уповільнює. Величина ваги ребер може змінюватися в результаті навчання. Глибоке навчання багатопшарових ІНМ – це справжня головоломка, так як недиференційованість пучків імпульсів не дозволяє використовувати популярні методи, такі як метод зворотного поширення [13–14].

Як зазначалося, навчання всіляких штучних нейронних мереж відбувається за рахунок коригування

скалярних синаптичних ваг (рис. 2). В ІНМ можна використовувати методи навчання наближені до тих, які використовує мозок. Вчені визначили безліч варіантів цього методу навчання, але всі вони потрапляють під загальний термін дендритної пластичності [15]. Ключовою особливістю дендритної пластичності є те, що вага ребра, що з'єднує пре- і постсинаптичні нейрони, регулюється з часом їх імпульсу в інтервалі приблизно в десятки мілісекунд за довжиною.

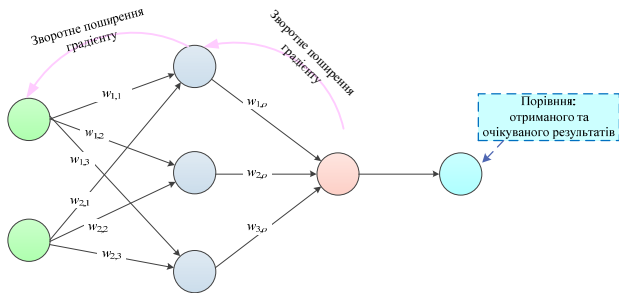


Рисунок 2 – Використання методу ЗПП

Метод SpikeProp. Це перший метод навчання ІНМ шляхом зворотного поширення помилок [16]. Функція вартості враховує період коливання і, завдяки цьому, цей метод може класифікувати нелінійно розділені дані для завдання XOR з тимчасовим кодуванням з використанням 3-рівневої архітектури. Головним рішенням на етапі розробки методу був вибір моделі нейрона Герсгнера [175]. Використовуючи цю модель, питання взяття похідних на виході коливання обтікався, так як необхідний результат безпосередньо моделювався як безперервне значення [16, 17]. Одним з обмежень цього способу є те, що кожна вихідна одиниця була змушена генерувати рівно одне коливання. Крім того, значення безперервних змінних, таких як в задачах XOR, повинні були бути закодовані як затримки між коливаннями, які можуть бути досить довгими [16, 17].

Метод ReSuMe. Дана модель навчання складається з одного нейрона, що коливається, на вхід якого приймаються коливання від безлічі інших коливних пресинаптичних нейронів [18]. Метою є навчити синапс викликати постсинаптичний нейрон для генерування хвиль коливань з бажаним періодом коливання. ReSuMe адаптував Дельта-правило, що використовується для неімпульсних лінеаризованих одиниць, до ІНМ. У Дельта-правилі ваги змінюються пропорційно [18]:

$$\Delta\omega = (y^d - y^{real})x = y^d x - y^{real} x. \quad (1)$$

Переформулювавши рівняння (1) можна отримати суму STDP і anti-STDP:

$$\Delta\omega = \Delta\omega^{STDP}(S^{in}, S^d) + \Delta\omega^{aSTDP}(S^{in}, S^{real}), \quad (2)$$

Вище $\Delta\omega^{STDP}$ – це функція кореляції пресинаптичних і бажаних періодів коливань, тоді як $\Delta\omega^{aSTDP}$ – залежить від пресинаптичних і реальних періодів коливань. Так як цей метод використовує кореляцію між безліччю пресинаптичних нейронів і вагається нейроном, то ніякої фізичної зв'язку між ними немає. Ось чому цей метод називають віддаленим.

Метод Chronotron. Цей метод був розроблений на основі методу Tempotron [19], який міг навчати окремі нейрони розпізнавати кодування за точним часом приходу коливання.

Цей метод був розроблений на основі методу Tempotron [19], який міг навчати окремі нейрони розпізнавати кодування за точним часом приходу коливання. Обмеженням методу Tempotron була можливість видавати 0 або 1 на виході протягом обраного інтервалу часу. Через це у вихідні дані неможливо було закодувати інформацію про час приходу коливання. На створення Chronotron вплинув успіх SpikeProp і його наступників. Ідеєю Chronotron було використовувати для навчання більш складні одиниці вимірювання відстаней – VP [20] між двома коливаннями. Вони адаптували відстань VP так, щоб воно було кусочно-диференційованим і підходило в якості функції вартості для виконання градієнтного спуску по відношенню до ваг.

Серед існуючих методів виділяють декілька основних недоліків. По-перше, для кожного каналу потрібна окрема схема швидкого збігу. Тобто є ризик множення похідних на кожному каналі, що в подальшому може накласти великі обчислювальні потреби.

По-друге, стає досить складно отримати велику кількість каналів через спотворень імпульсів, які виникають при підключенні ланцюгів збігу до коаксіальних кабелів.

Але ключовою проблемою завжди залишається питання топології (структури такої мережі). Існує безліч підходів, які застосовують зворотне поширення до ІНМ. Але такі методи не можуть використовувати традиційне зворотне поширення і змінювати оновлення градієнта або самі ІНМ, щоб подолати цю складність. Ці типи методів часто накладають архітектурні обмеження на отримані ІНМ, наприклад, вимагаючи архітектури ІНМ з прямим зв'язком. Отже, існує безліч топологій ІНМ з бажаними властивостями, такими як повторюваність, які не можуть бути оптимізовані за допомогою цих методів.

Саме тому є актуальною задачею розробка еволюційних методів для повноцінного синтезу ІНМ-моделі. При імплементації методів еволюційного підходу оцінювання популяції ІНМ дозволить в подальшому використовувати процеси стохастичної варіації і відбору для створення наступної популяції або контролювати ці процеси. Протягом послідовних ітерацій мутацій та відбору мереж-індивідуумів із зростаючою придатністю, яку можна широко визначити як точність у задачі класифікації або максимальної винагороди з навколишнього середовища, нові рішення бу-

дуть якісно відрізнитися від попередніх. Однією з істотних переваг еволюційних підходів є їх гнучкість. Стосовно ІНМ еволюційна оптимізація потенційно може впливати на будь-яку топологію мережі, а також оптимізувати будь-який мережевий параметр.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Загалом метод, що запропонований в роботі схожий на MGA для синтезу звичайних ШНМ [21, 22]. Так, на початку слід зазначити, що для виконання синтезу використовується пряме кодування структури індивідуумів, кожен з яких є окремою нейронною мережею, проте основою такого кодування є між нейронні зв'язки. За рахунок цього можливо більш детально відстежувати походження кожного параметра (вузла або з'єднання) в геномі. На наступних етапах методу це в значній мірі спрощує процеси схрещування та мутації, дозволяючи вибудовувати та змінювати генетичну інформацію про особини і мінятися місцями під час схрещування [21, 22].

Основною інновацією є використання певних шаблонних механізмів, а саме НП на основі технології CPPN [23]. Цей механізм забезпечує абстрагування процесів природної еволюції [23]. НП будуть складатися із нейронів з різними функціями активації, включаючи періодичні функції, такі як синусоїдальні та симетричні функції, такі як абсолютне значення. Основна ідея заснована на тому, що НП на базі CPPN із декількома точками входу може визначати взаємозв'язок між парою точок. Фіксований набір нейронів, вводиться у вигляді певного субстрат до НП, що надалі спрощує нейросинтез з використанням MGA [21, 22].

Загалом на початку еволюції отримуємо популяцію із NP, які визначають шаблони підключення результуючих ІНМ. Кожний NP визначається закодованою генетичною інформацією із визначенням його внутрішніх ваг і функціями активації. Проте важливо зазначити, що кожний окремий нейрон в НП може мати будь-яку функцію активації з певного набору (\sin , \tanh , gauss , relu , identity). Щоб розшифрувати ІНМ із НП координати для пари нейронів передаються в мережу, що створює НП (рис. 4). Вихідний сигнал мережі визначає вагу і затримку з'єднання між двома нейронами в пікіруючій нейронній мережі. Цей процес повторюється для кожної пари нейронів, щоб побудувати повну мережу.

Після підготовки популяції можливо виконувати подальший синтез. Основні кроки синтезу та дешифрування ІНМ з НП наведено на рис. 3 [21, 22].

Проте слід зазначити декілька нюансів цього синтезу:

- положення нейронів ІНМ, у вигляді НП заздалегідь фіксуються на час еволюційного пошуку для кожної особини. Тобто будь-яка мутація та модифікація можлива тільки у вигляді нової особини;
- кожне рішення дешифрується і оцінюється для виконання заданого завдання (класифікація або управління). Отже, придатність рішення визначається продуктивністю згенерованої ІНМ для зазначеного завдання;
- видоутворення використовується для захисту інновацій в нових рішеннях та може припинитися за умови їх відсутності.

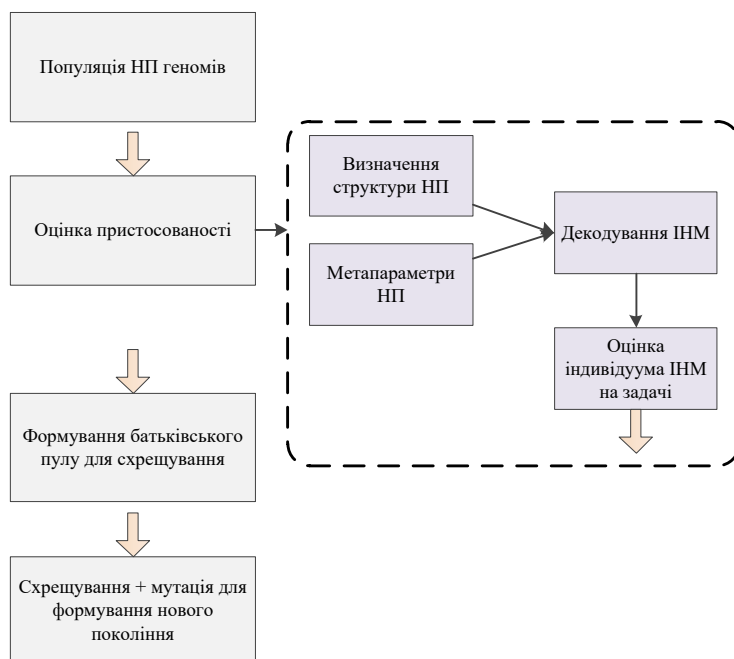


Рисунок 3 – Загальний процес синтезу ІНМ

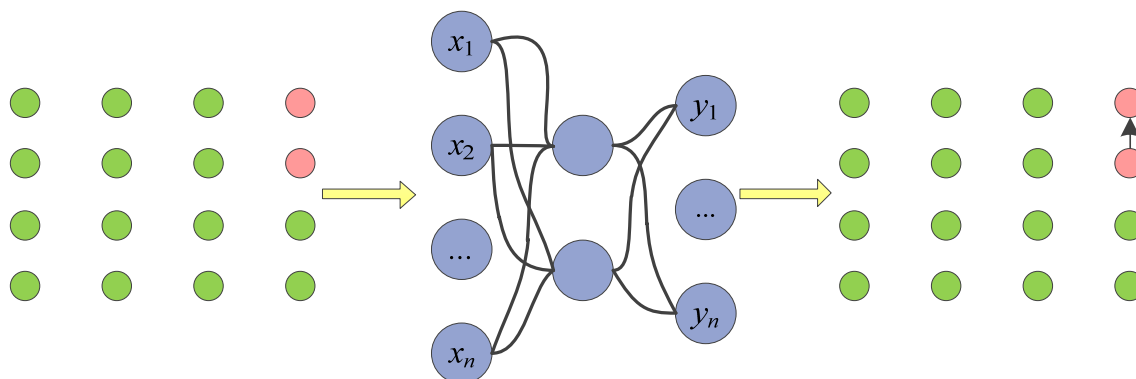


Рисунок 4 – Приклад декодування ІНМ з НН

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для дослідження результатів роботи методу було обрано задачу на основі набору даних HIGGS Data Set з відкритого джерела UCI Machine Learning Repository [24]. Для навчання використовувалася 75% (частина) вибірки, для тестування проводилося на 25% вибірки. Загальну ж інформацію про вибірку наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Загальна характеристика вибірки даних HIGGS Data Set

Критерій	Характеристика
Характеристики вибірки даних:	Багатоваріантна
Атрибутивні характеристики:	Real
Кількість примірників:	11000000
Кількість атрибутів	28

Результативність ІНМ-моделей буде порівнюватися із нейромоделями на базі РНМ (рис. 5 а) та ГНМ (рис. 5 б) [25].

РНМ це один з типів ШНМ і використовується в областях застосування природного опрацювання мови та розпізнавання мовлення [25]. Модель РНМ розроблена для розпізнавання послідовних характеристик даних і надалі з використанням шаблонів для прогнозування майбутнього сценарію. ГНМ це нейронна мережа з певним рівнем складності, нейронна мережа з більш ніж двома шарами. ГНМ використовують складне математичне моделювання для обробки даних складними способами [25].

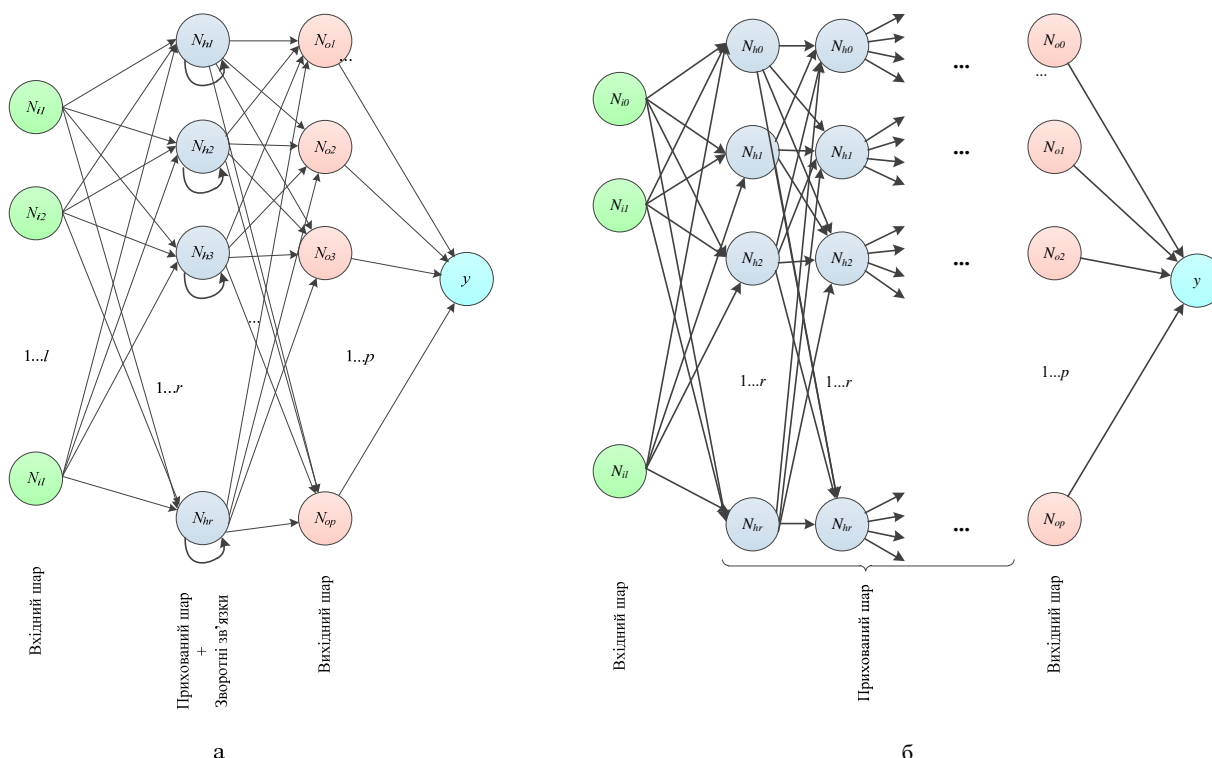


Рисунок 5 – Топології ШНМ для порівняння результатів під час експериментального дослідження

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У таблиці 2 представлено результати роботи методів синтезу із різними топологіями нейромереж.

Таблиця 2 – Порівняння результатів роботи

Метод синтезу	Час синтезу, с	Помилка на навчальній вибірці	Помилка на тестовій вибірці
MGA ІНМ	20200,32	0,016	0,051
MGA РНМ	14672,88	0,028	0,063
MGA ГНМ	7625	0,022	0,052

6 ОБГОВОРЕННЯ

Переглядаючи тестові результати можна прийти до висновків, що пропозиція використовувати еволюційні методи для синтезу ІНМ демонструє хороші результати для її подальшого розгортання та використання. Адже, для мереж цього класу завжди є актуальним питання складної та іноді не до кінця чіткої структури. Використання ж еволюційних підходів із кодуванням та декодуванням НП значно полегшує цю задачу, адже в цьому випадку структурний синтез зводиться до відомих підходів із еволюційного синтезу із використанням TWEANN. Параметричний же синтез представляє собою тонке налаштування на виключно визначених етапах без необхідності ітераційно знов і знов обраховувати fitness functions або її похідні.

З іншого ж боку можна зробити висновок, що практичне використання нейромереж класу ІНМ поки що є виключно перспективним, адже отримані результати точності роботи не можуть в повній мірі продемонструвати доцільність значних часових витрат. Так величини похибок в обох випадках (навчання та тестування) не відрізняються значущістю, яка б могла покрити часові витрати на синтез таких мереж та їх подальші обрахунки. Адже варто зазначити, що за умови відсутності спеціалізованого устаткування для емуляції роботи ІНМ виконання цього процесу на звичайній робочій станції також супроводжується часовими накладками.

Також варто окремо проаналізувати роботи із складними топологіями класичних ШНМ. Так, відмінності у часі синтезу пояснюються більш простим обрахунком та коригуванням рекурентних зв'язків на відмінно від обрахунку вузлів та ваг міжнейронних зв'язків у множині прихованих шарів. А аналіз точності роботи синтезованих рішень на навчальних та тестових даних демонструє, що різниця в точності не є критичною та прийнятна в рамках задачі. Саме тому можна говорити про конкретну вказівку, про використання тієї чи іншої топології ШНМ в залежності, який з ресурсів є більш важливим: час синтезу та роботи нейромоделі або ж її точність.

ВИСНОВКИ

Вирішено актуальну науково-прикладну проблему розроблення методу синтезу ІНМ на основі еволюційного підходу з використанням нейропатерного механізму.

Наукова новизна полягає в тому що розроблено метод еволюційного синтезу складних топологій ШНМ, а саме ІНМ з використанням нейропатернів. У запропонованому методі використовуються техніка кодування особин, кожна з яких окрема ІНМ, заснована на використанні спеціальних НП, що абстрагують еволюційні процеси від самих складних структур ІНМ, оптимізуючи ресурси на етапах кодування та декодування.

Практична цінність полягає в тому, що розв'язано практичні завдання синтезу ІНМ, що можуть використовуватися для діагностування, прогнозування, оцінювання та розпізнавання образів, забезпечуючи високу точність. Результати експериментів показали, що запропонований метод може використовуватися на практиці та дозволяє синтезувати точніші ІНМ для їх подальшого використання у якості моделей для діагностування, прогнозування, оцінювання та моделювання.

Майбутні напрями дослідження та розробки полягають запровадженні та використанні методів непрямого кодування НП та загалом особин ШНМ під час синтезу. Такі підходи можуть допомогти більш детально вивчити множину варіантів взаємозв'язків між унікальними характеристиками ІНМ. Наприклад, різні стратегії кодування вхідних даних можуть спричинити варіативність конфігурації нейронів для НП.

ПОДЯКИ

Робота була проведена за підтримки держбюджетних науково-дослідницьких проектів державного бюджету Національного університету «Запорізька політехніка» «Інтелектуальні методи та засоби діагностування та прогнозування стану складних об'єктів» (номер державної реєстрації 0122U000972) та «Розроблення методів та засобів для аналізу та прогнозування динамічної поведінки нелінійних об'єктів» номер державної реєстрації 0121U107499).

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Ping D. The Machine Learning Solutions Architect Handbook: Create machine learning platforms to run solutions in an enterprise setting / D. Ping. – Birmingham : Packt Publishing, 2022. – 442 p.
2. Burkov A. Machine Learning Engineering / A. Burkov. – Quebec City: True Positive Inc., 2020. – 310 p.
3. Alkhalifa S. Machine Learning in Biotechnology and Life Sciences: Build machine learning models using Python and deploy them on the cloud / S. Alkhalifa. – Birmingham : Packt Publishing, 2022. – 408 p.
4. Aggarwal C. C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook / C. C. Aggarwal. – Berlin : Springer, 2018. – 520 p.
5. Hiesinger P. R. The Self-Assembling Brain: How Neural Networks Grow Smarter / P. R. Hiesinger. – Princeton : Princeton University Press, 2021. – 384 p.
6. Graupe D. Principles of Artificial Neural Networks: Basic Designs to Deep Learning (4th Edition) (Advanced Circuits and Systems) / D. Graupe. – Singapore: WSPC, 2019. – 438 p.
7. Hodgkin A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve /

- A. Hodgkin, A. Huxley // *J. Physiol.* – 1952. – Vol. 117(4). – P. 500–544. DOI: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
8. The Spike Response Model: A Framework to Predict Neuronal Spike Trains / [R. Jolivet, J. Timothy, W. Gerstner] // *International conference on Artificial neural networks and neural information processing, ICANN/ICONIP'03, Istanbul, 26–29 June 2003 : proceedings.* – Istanbul: ACM Digital Library, 2003. – P. 846–853. DOI: 10.1007/3-540-44989-2_101
9. Izhikevich E. Simple model of spiking neurons / E. Izhikevich // *Transactions of neural networks.* – 2003. – Vol. 14. – P. 1569–1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440
10. SpikeNET: A simulator for modeling large networks of integrate and fire neurons / [A. Delorme, J. Gautrais, R. van Rullen, S. Thorpe] // *Neurocomputing.* – 1999. – Vol. 26(7). – P. 989–996. DOI: 10.1016/S0925-2312(99)00095-8
11. Pfeiffer M. Deep learning with spiking neurons: Opportunities and challenges / M. Pfeiffer, T. Pfeil // *Frontiers in Neuroscience.* – 2018. – Vol. 12: 774. – P. 32–50. DOI: 10.3389/fnins.2018.00774
12. Maass W. Lower bounds for the computational power of networks of spiking neurons / W. Maass // *Neural Computation.* – 1996. – Vol. 8. – P. 1–40.
13. Development of programmable home security using GSM system for early prevention / [J. A. J. Alsayaydeh, A. Aziz, A. I. A. Rahman et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2021. – Vol. 16(1). – P. 88–97.
14. Development of vehicle ignition using fingerprint / [J.A.J. Alsayaydeh, W. A. Indra, W. A. Y. Khang et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences.* – 2019. – Vol. 14(23). – P. 4045–4053.
15. A spike-timing-dependent plasticity rule for dendritic spines / [S. Tazerart, D. E. Mitchell, S. Miranda-Rottmann, R. Araya] // *Nature Communications.* – 2020. – Vol. 11. – P. 12–23. DOI: 10.1038/s41467-020-17861-7
16. Bohte S. M. Error-backpropagation in temporally encoded networks of spiking neurons / S. M. Bohte // *Artificial Neural Network and Machine Learning, ICANN 2011, Espoo, 11–14 June 2011 : proceedings.* – Espoo: ACM Digital Library, 2011. – P. 60–68.
17. Gerstner W. *Spiking neuron models: Single neurons, populations, plasticity* / W. Gerstner, W. M. Kistler. – Cambridge : Cambridge University Press, 2002. – 496 p.
18. Ponulak F. Supervised learning in spiking neural networks with ReSuMe: Sequence learning, classification, and spike shifting / F. Ponulak, A. Kasinski // *Neural Computation.* – 2009. – Vol. 22. – P. 467–510. DOI: 10.1162/neco.2009.11-08-901
19. Gütig R. The tempotron: A neuron that learns spike timing-based decisions / R. Gütig, H. Sompolinsky // *Nature Neuroscience.* – 2006. – Vol. 9. – P. 420–428. DOI: 10.1038/nn1643
20. Serre T. Hierarchical models of the visual system, *Encyclopedia of Computation Neuroscience* / T. Serre. – New York : Springer, 2014. – 15 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7320-6_345-1
21. Synthesis of artificial neural networks using a modified genetic algorithm / [S. Leoshchenko, A. Oliinyk, S. Subbotin et al.] // *1st International Workshop on Informatics & Data-Driven Medicine (IDDM 2018), Lviv, 28–30 October, 2018 : proceedings.* – Lviv : CEUR WS, 2018. – P. 1–13.
22. Modification and parallelization of genetic algorithm for synthesis of artificial neural networks / [S. D. Leoshchenko, A. O. Oliinyk, S. A. Subbotin et al.] // *Radio Electronics, Computer Science, Control.* – 2019. – № 4. – P. 68–82. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-7
23. Elbrecht D. Neuroevolution of Spiking Neural Networks Using Compositional Pattern Producing Networks / D. Elbrecht, C. Schuman // *International Conference on Neuro-morphic Systems 2020, ICONS 2020, Knoxville, 27–29 July 2020 : proceedings.* – Knoxville : ACM Digital Library, 2020. – P. 1–5. DOI: 10.1145/3407197.3407198
24. HIGGS Data Set [Electronic resource]. – Access mode: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/HIGGS>
25. A Using modern architectures of recurrent neural networks for technical diagnosis of complex systems / [S. Leoshchenko, A. Oliinyk, S. Subbotin, T. Zaiko] // *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

Стаття надійшла до редакції 20.06.2022.
Після доробки 24.08.2022.

UDC 004.896

EVOLUTIONARY METHOD FOR SYNTHESIS SPIKING NEURAL NETWORKS USING THE NEUROPATHERN MECHANISM

Leoshchenko S. D. – Post-graduate student of the Department of Software Tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

Oliinyk A. O. – Dr. Sc., 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.

Gofman Ye. O. – PhD, Senior Researcher of the Research Unit, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

Ilyashenko M. B. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Systems and networks, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of synthesizing pulsed neural networks based on an evolutionary approach to the synthesis of artificial neural networks using a neuropathic mechanism for constructing diagnostic models with a high level of accuracy is considered. The object of research is the process of synthesis of pulsed neural networks using an evolutionary approach and a neuropathic mechanism.

Objective of the work is to develop a method for synthesizing pulsed neural networks based on an evolutionary approach using a neuropathic mechanism to build diagnostic models with a high level of accuracy of work.

© Леошенко С. Д., Олійник А. О., Субботін С. О., Гофман Є. О., Ільяшенко М. Б., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-3-8

Method. A method for synthesizing pulsed neural networks based on an evolutionary approach is proposed. At the beginning, a population of pulsed neural networks is generated, and a neuropathic mechanism is used for their encoding and further development, which consists in separate encoding of neurons with different activation functions that are determined beforehand. So each pattern with multiple entry points can define the relationship between a pair of points. In the future, this simplifies the evolutionary development of networks. To decipher a pulsed neural network from a pattern, the coordinates for a pair of neurons are passed to the network that creates the pattern. The network output determines the weight and delay of the connection between two neurons in a pulsed neural network. After that, you can evaluate each neuromodel after evolutionary changes and check the criteria for stopping synthesis. This method allows you to reduce the resource intensity during network synthesis by abstracting the evolutionary changes of the network pattern from itself.

Results. The developed method is implemented and investigated on the example of the synthesis of a pulsed neural network for use as a model for technical diagnostics. Using the developed method to increase the accuracy of the neuromodel with a test sample by 20%, depending on the computing resources used.

Conclusions. The conducted experiments confirmed the operability of the proposed mathematical software and allow us to recommend it for use in practice in the synthesis of pulsed neural networks as the basis of diagnostic models for further automation of tasks of diagnostics, forecasting, evaluation and pattern recognition using big data. Prospects for further research may lie in the use of a neuropathic mechanism for indirect encoding of pulsed neural networks, which will provide even more compact data storage and speed up the synthesis process.

KEYWORDS: spiking neural network, topology, pattern, evolution, synthesis, artificial neural networks, diagnostics.

REFERENCES

1. Ping D. The Machine Learning Solutions Architect Handbook: Create machine learning platforms to run solutions in an enterprise setting. Birmingham, Packt Publishing, 2022, 442 p.
2. Burkov A. Machine Learning Engineering. Quebec City, True Positive Inc., 2020, 310 p.
3. Alkhalifa S. Machine Learning in Biotechnology and Life Sciences: Build machine learning models using Python and deploy them on the cloud. Birmingham, Packt Publishing, 2022, 408 p.
4. Aggarwal C. C. Neural Networks and Deep Learning: A Textbook. Berlin, Springer, 2018, 520 p.
5. Hiesinger P. R. The Self-Assembling Brain: How Neural Networks Grow Smarter. Princeton, Princeton University Press, 2021, 384 p.
6. Graupe D. Principles of Artificial Neural Networks: Basic Designs to Deep Learning (4th Edition) (Advanced Circuits and Systems). Singapore, WSPC, 2019, 438 p.
7. Hodgkin A., Huxley A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve, *J. Physiol.*, 1952, Vol. 117(4), pp. 500–544. DOI: 10.1113/jphysiol.1952.sp004764
8. Jolivet R., Timothy J., Gerstner W. The Spike Response Model: A Framework to Predict Neuronal Spike Trains, *International conference on Artificial neural networks and neural information processing, ICANN/ICONIP'03, Istanbul, 26–29 June 2003, proceedings*. Istanbul. ACM Digital Library, 2003, pp. 846–853. DOI: 10.1007/3-540-44989-2_101
9. Izhikevich E. Simple model of spiking neurons, *Transactions of neural networks*, 2003, Vol. 14, pp. 1569–1572. DOI: 10.1109/TNN.2003.820440
10. Delorme A., Gautrais J., van Rullen R., Thorpe S. SpikeNET: A simulator for modeling large networks of integrate and fire neurons, *Neurocomputing*, 1999, Vol. 26(7), pp. 989–996. DOI: 10.1016/S0925-2312(99)00095-8
11. Pfeiffer M., Pfeil T. Deep learning with spiking neurons: Opportunities and challenges, *Frontiers in Neuroscience*, 2018, Vol. 12: 774, pp. 32–50. DOI: 10.3389/fnins.2018.00774
12. Maass W. Lower bounds for the computational power of networks of spiking neurons, *Neural Computation*, 1996, Vol. 8, pp. 1–40.
13. Alsayaydeh J.A.J., Aziz A., Rahman A.I.A., Salim S.N.S., Zainon M., Baharudin Z.A., Abbasi M.I., Khang A.W.Y. Development of programmable home security using GSM system for early prevention, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2021, Vol. 16(1), pp. 88–97.
14. Alsayaydeh J.A.J., Indra W.A., Khang W.A.Y., Shkaruplyo V., Jkatisan D.A.P.P. Development of vehicle ignition using fingerprint, *ARN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2019, Vol. 14(23), pp. 4045–4053.
15. Tazerart S., Mitchell D. E., Miranda-Rottmann S., Araya R. A spike-timing-dependent plasticity rule for dendritic spines, *Nature Communications*, 2020, Vol. 11, pp. 12–23. DOI: 10.1038/s41467-020-17861-7
16. Bohte S.M. Error-backpropagation in temporally encoded networks of spiking neurons, *Artificial Neural Network and Machine Learning, ICANN 2011, Espoo, 11–14 June 2011, proceedings*. Espoo, ACM Digital Library, 2011, pp. 60–68.
17. Gerstner W., Kistler W. M. Spiking neuron models: Single neurons, populations, plasticity. Cambridge, Cambridge University Press, 2002, 496 p.
18. Ponulak F., Kasinski A. Supervised learning in spiking neural networks with ReSuMe: Sequence learning, classification, and spike shifting, *Neural Computation*, 2009, Vol. 22, pp. 467–510. DOI: 10.1162/neco.2009.11-08-901
19. Gütig R., Sompolinsky H. The tempotron: A neuron that learns spike timing-based decisions, *Nature Neuroscience*, 2006, Vol. 9, pp. 420–428. DOI: 10.1038/nn1643
20. Serre T. Hierarchical models of the visual system, *Encyclopedia of Computation Neuroscience*. New York, Springer, 2014, 15 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-7320-6_345-1
21. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Gorobii N., Zaiko T. Synthesis of artificial neural networks using a modified genetic algorithm, *1st International Workshop on Informatics & Data-Driven Medicine (IDDM 2018), Lviv, 28–30 October, 2018, proceedings*. Lviv, CEUR WS, 2018, pp. 1–13.
22. Leoshchenko S. D., Oliinyk A. O., Subbotin S. A., Lytvyn V. A., Shkaruplyo V. V. Modification and parallelization of genetic algorithm for synthesis of artificial neural networks, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2019, No. 4, P. 68–82. DOI: 10.15588/1607-3274-2019-4-7
23. Elbrecht D., Schuman C. Neuroevolution of Spiking Neural Networks Using Compositional Pattern Producing Networks, *International Conference on Neuromorphic Systems 2020, ICONS 2020, Knoxville, 27–29 July 2020, proceedings*. Knoxville, ACM Digital Library, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1145/3407197.3407198
24. HIGGS Data Set [Electronic resource]. Access mode: <https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/HIGGS>
25. Leoshchenko S., Oliinyk A., Subbotin S., Zaiko T. A Using modern architectures of recurrent neural networks for technical diagnosis of complex systems, *International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 9–12 October 2018, proceedings*. Kharkiv, IEEE, 2018, pp. 411–416. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632015