



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(42) 2017

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2017

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 3(42) 2017

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2017

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№3(42) 2017

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

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

Zaporizhzhya

ZNTU

2017

Науковий журнал «Радіоелектроніка, інформатика, управління» (скорочена назва – РІУ) видається Запорізьким національним технічним університетом (ЗНТУ) з 1999 р. періодичністю чотири номери на рік.

Зареєстрований Державним комітетом інформаційної політики, телебачення та радіомовлення 29.01.2003 р. Свідectво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія KB №6904.

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

Наказом Міністерства освіти і науки України № 1328 від 21.12.2015 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 15 грудня 2015 року» **журнал включений до переліку наукових фахових видань України**, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата фізико-математичних та технічних наук.

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

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

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

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

Опублікованими статтями 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 (у т. ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВІНІТІ, Джерело), 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 містить: радіофізику, мікро-, нано- і радіоелектроніку, апаратне і програмне забезпечення комп'ютерної техніки, комп'ютерні мережі і телекомунікації, теорію алгоритмів і програмування, оптимізацію і дослідження операцій, міжмашинну і людино-машинну взаємодію, математичне і комп'ютерне моделювання, обробку даних і сигналів, управління в технічних системах, 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.

Усі статті, пропоновані 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 закрите (анонімне для автора) **рецензування** штатними редакторами і незалежними рецензентами – провідними вченими за профілем журналу.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – Субботін С. О., д-р. техн. наук, Україна

Заст. головного редактора – Піза Д. М., д-р техн. наук, Україна

Члени редколегії:

Андрюлідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

Бодянский Є. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління

Васильєв С. М., д-р фіз.-мат. наук, академік РАН, Росія

Гімплевич Ю. Б., д-р техн. наук, Україна

Горбань О. М., д-р фіз.-мат. наук, Великобританія

Дробахін О. О., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Зайцева О. М., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Україна

Корніч Г. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна, редактор розділу з радіофізики

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

Лебедев Д. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління

Левашенко В. Г., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

Марковська-Качмар У., д-р наук, Польща

Олещук В. О., канд. фіз.-мат. наук, Норвегія, редактор розділу з радіоелектроніки

Онуфрієнко В. М., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Папшицький М., д-р філософії, Польща

Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Рубель О. І., канд. техн. наук, Канада

Хаханов В. І., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з інформатики

Шарпанських О. А., д-р філософії, Нідерланди, редактор розділу з інформатики

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 2 від 10.10.2017.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

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

Адреса редакції: Редакція журналу «РІУ», Запорізький національний технічний університет, вул. Жуковського, 64, м. Запоріжжя, 69063, Україна.

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорізький національний технічний університет, 2017

Научный журнал «Радиоэлектроника, информатика, управление» (сокращенное название – РИУ) издается Запорожским национальным техническим университетом (ЗНТУ) с 1999 г. периодичностью четыре номера в год.

Зарегистрирован Государственным комитетом информационной политики, телевидения и радиовещания 29.01.2003 г. (Свидетельство о государственной регистрации печатного средства массовой информации серия КВ №6904).

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

Приказом Министерства образования и науки Украины № 1328 от 21.12.2015 г. «Об утверждении решений Аттестационной коллегии Министерства относительно деятельности специализированных ученых советов от 15 декабря 2015 года» **журнал включен в перечень научных профессиональных изданий Украины**, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на соискание ученых степеней доктора и кандидата физико-математических и технических наук.

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 с CC лицензией CC-BY.

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал входит в наукометрическую базу Web of Science.

Журнал реферируется 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 (в т.ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВИНТИ, Джэрло), 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 включает: радиофизику, микро-, нано- и радиоэлектронику, аппаратное и программное обеспечение компьютерной техники, компьютерные сети и телекоммуникации, теорию алгоритмов и программирования, оптимизацию и исследование операций, межмашинное и человеко-машинное взаимодействие, математическое и компьютерное моделирование, обработку данных и сигналов, управление в технических системах, искусственный интеллект, включая системы, основанные на знаниях, и экспертные системы, интеллектуальный анализ данных, распознавание образов, искусственные нейронные и нейро-нечеткие сети, нечеткую логику, коллективный интеллект и мультиагентные системы, гибридные системы.

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 С. А., д-р. техн. наук, Украина

Зам. главного редактора – Пиза Д. М., д-р техн. наук, Украина

Члены редколлегии:

Андропулидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

Бодянский Е. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению

Васильев С. Н., д-р физ.-мат. наук, академик РАН, Россия

Гимпилевич Ю. Б., д-р техн. наук, Украина

Горбань А. Н., д-р физ.-мат. наук, Великобритания

Дробахин О. О., д-р физ.-мат. наук, Украина

Зайцева Е. Н., канд. физ.-мат. наук, Словакия

Камеяма М., д-р техн. наук, Япония

Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Украина

Корнич Г. В., д-р физ.-мат. наук, Украина, редактор раздела по радиофизике

Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина

Лебедев Д. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению

Левашенко В. Г., канд. физ.-мат. наук, Словакия

Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль

Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша

Олещук В. А., канд. физ.-мат. наук, Норвегия, редактор радиоэлектроники

Онуфриенко В. М., д-р физ.-мат. наук, Украина

Папицкий М., д-р философии, Польша

Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

Рубель О. И., канд. техн. наук, Канада

Хаханов В. И., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по информатике

Шарпанских А. А., доктор философии, Нидерланды – редактор раздела по информатике

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 2 от 10.10.2017.

Журнал сверстан редакционно-издательским отделом ЗНТУ.

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

Адрес редакции: Редакция журнала «РИУ», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина.

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорожский национальный технический университет, 2017

The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control» is published by the Zaporizhzhya National Technical University (ZNTU). since 1999 with periodicity four numbers per year.

The journal is registered by the State Committee for information policy, television and radio broadcasting of Ukraine in 29.01.2003. The journal has a State Registration Certificate of printed mass media (series KB №6904).

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

By the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 21.12.2015 № 1328 “On approval of the decision of the Certifying Collegium of the Ministry on the activities of the specialized scientific councils dated 15 December 2015” **journal is included in the list of scientific specialized periodicals of Ukraine**, where the results of dissertations for Doctor of Science and Doctor of Philosophy in Mathematics and Technical Sciences may be published.

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 a CC license CC-BY.

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 abstractig journals and scientometric databases, and also placed to the digital archives and libraries with a free on-line access (including DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, VINITI (All-Russian Institute of scientific and technical information), Djerelo), full list of which is presented on 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: radio physics, micro-, nano- and radio electronics, computer hardware and software, computer networks and telecommunications, algorithm and programming theory, optimization and operations research, machine-machine and man-machine interfacing, mathematical modeling and computer simulation, data and signal processing, control in technical systems, artificial intelligence, including knowledge-based and expert systems, data mining, pattern recognition, artificial neural and neuro-fuzzy networks, fuzzy logics, swarm intelligence and multiagent systems, hybrid systems.

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: S. A. Subbotin, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Deputy Editor-in-Chief: D. M. Piza, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece

V. M. Bezruk, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

Ye. V. Bodyanskiy, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor

O. O. Drobakhin, Doctor of Science in Physics and Mathematics

Yu. B. Gimpilevich, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

A. N. Gorban, Doctor of Science in Physics and Mathematics, United Kingdom

V. I. Hahanov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Computer Science section editor

M. Kameyama, Doctor of Science, Japan

L. M. Karpukov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

G. V. Kornich, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine, Radio Physics section editor

A. S. Kulik, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

D. V. Lebedev, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor

V. G. Levashenko, Ph.D, Slovakia

A. Lisnianski, Ph.D, Israel

U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland

V. A. Oleshchuk, Ph.D in Physics and Mathematics, Norway, Radio Electronics section editor

V. M. Onufrienko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

M. Paprzycki, Ph.D, Poland

V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

O. I. Rubel, Ph.D, Canada

A. A. Sharpanskykh, Ph.D, Netherlands, Computer Science section editor

S. N. Vassilyev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Academician of Russian Academy of Sciences, Russia

E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 2 dated 10.10.2017.

The journal is imposed by the editorial-publishing department of ZNTU.

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», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy street, 64, Zaporizhzhya, 69063, Ukraine.

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhya National Technical University, 2017

ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА.....	7
<i>Григорчак І. І., Іващишин Ф. О., Борисюк А. К., Швець Р. Я., Кулик Ю. О.</i>	
КЛАТРАТНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ МУЛЬТИФЕРОЇКИ, СИНТЕЗОВАНІ В СИСТЕМІ $\text{GaSe-NaNO}_2\text{-FeSO}_4$. ВПЛИВ КОІНТЕРКАЛЯЦІЇ.....	7
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	20
<i>Лиза Д. М., Семенов Д. С., Мороз Г. В.</i>	
АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОМЕХ.....	20
<i>Ципоренко В. В., Ципоренко В. Г., Хоменко М. Ф.</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ.....	28
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	36
<i>Братусь О. В.</i>	
СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З АДАПТИВНИМИ БЛОКАМИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІОФЛЮКСІВ.....	36
<i>Вовк С. М.</i>	
МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ВЫБРОСАМИ.....	44
<i>Касянчук М. Н.</i>	
ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СОВЕРШЕННОЙ ФОРМЫ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ.....	53
<i>Чопоров С. В.</i>	
ГИБРИДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЛОШНЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЯВНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ.....	60
<i>Чуб І. А., Новожилова М. В., Матухно В. В.</i>	
МОДЕЛЮВАННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ.....	71
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	78
<i>Гороховатский В. А., Пуятин Е. П., Столяров В. С.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ.....	78
<i>Журавська І. М., Мусієнко М. П.</i>	
СИНТЕЗ МАРШРУТІВ СУБ-РОЇВ БЕЗПЛОТНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ.....	86
<i>Коробчинський М. В., Чирун Л. Б., Висоцька В. А., Нич М. О.</i>	
ОСОБЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЧІВ У КІБЕРСПОРТІ.....	95
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	106
<i>Данильченко А. О.</i>	
РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ГЛЮК ТА МЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПРО ПАРОСПОЛУЧЕННЯ ЗІ ЗНИКАЮЧИМИ ДУГАМИ.....	106
<i>Имамвердиев Я. Н., Сухостат Л. В.</i>	
ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ.....	113
<i>Кузьма К. Т.</i>	
ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕВІРКИ РІВНЯ ЗНАНЬ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОГО АНАЛІЗУ.....	121
<i>Фауре Э. В.</i>	
ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК.....	130
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Skrupsky S., Lovkin V., Zaiko T.</i>	
INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSIS MODELS SYNTHESIS BASED ON PARALLEL COMPUTING.....	139
<i>Yelmanova E. S., Romanishyn Y. M.</i>	
NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES.....	152
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	161
<i>Луценко И. А., Фомовская Е. В., Оксанич И. Г., Сердюк О. Ю.</i>	
РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЕРИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	161
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V.</i>	
AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND.....	175
<i>Нагорный В. В.</i>	
АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА.....	183
<i>Сафоник А. П., Клепач М. І., Таргоній І. М.</i>	
ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕАКТОРІВ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ПРИ КОНТРОЛІ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ.....	192

CONTENTS

RADIOPHYSICS.....	7
<i>Grygorchak I. I., Ivashchyshyn F. O., Borysiuk A. K., Shvets R. Ya., Kulyk Yu. O.</i>	
CLATHRATE SEMICONDUCTOR MULTIFERROICS, SYNTHESIZED IN SYSTEM $\text{GaSe-NaNO}_2\text{-FeSO}_4$ AND INFLUENCE OF COINTERCALATION MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	7
RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	20
<i>Piza D. M., Semenov D. S., Moroz G. V.</i>	
ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ADAPTIVE POLARIZING FILTER UNDER THE SIMULTANEOUS ACTION OF ACTIVE AND PASSIVE NOISE.....	20
<i>Tsymporenko V. V., Tsymporenko V. G., Khomenko M. F.</i>	
RESEARCH OF FAST-ACTION OF THE DIRECT DIGITAL METHOD OF SPECTRAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH DOUBLE CORRELATION PROCESSING.....	28
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	36
<i>Bratus O. V.</i>	
DECISION MAKING SUPPORT SYSTEM WITH ADAPTIVE UNITS OF RESTORING AND FORECASTING OF SOLAR RADIO FLUXES.....	36
<i>Vovk S. M.</i>	
METHOD FOR NUMERICAL DIFFERENTIATION OF NOISY DATA WITH OUTLIERS.....	44
<i>Kasianchuk M. M.</i>	
THE CONSTRUCTION OF THE MODIFIED PERFECT FORM OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM USING FACTORIZATION.....	53
<i>Choporov S. V.</i>	
HYBRID REPRESENTATION OF SOLIDS USING IMPLICIT AND PARAMETRIC FUNCTIONS.....	60
<i>Chub I. A., Novozhylva M. V., Matuhno V. V.</i>	
MODELLING OF EMERGENCY WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD.....	71
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	78
<i>Gorokhovatsky V. A., Putyatin Y. P., Stolyarov V. S.</i>	
RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF STRUCTURAL IMAGE CLASSIFICATION METHODS USING CLUSTER DATA MODEL.....	78
<i>Zhuravska I. M., Musiyenko M. P.</i>	
THE SYNTHESIS OF ROUTES OF UAVS' SUB-SWARMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR INSPECTION OF TERRITORIES.....	86
<i>Korobchynskiy M. V., Chyrun L. B., Vysotska V. A., Nych M. O.</i>	
MATCHES PROGNOSTICATION FEATURES AND PERSPECTIVES IN CYBERSPORT.....	95
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	106
<i>Danylchenko A.</i>	
PARALLELING MODIFIED METHOD OF BRANCH AND BOUND TO SOLVE PROBLEM OF MATCHING CURVES FROM ENDANGERED OR THREATENED.....	106
<i>Imamverdiyev Y. N., Sukhostat L. V.</i>	
NETWORK TRAFFIC ANOMALIES DETECTION BASED ON INFORMATIVE FEATURES.....	113
<i>Kuzma K. T.</i>	
COMPUTER TECHNOLOGIES OF VERIFICATION OF KNOWLEDGE BASED ON THE METHOD OF SEQUENTIAL ANALYSIS.....	121
<i>Faure E. V.</i>	
FACTORIAL CODING WITH ERROR CORRECTION.....	130
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Skrupsky S., Lovkin V., Zaiko T.</i>	
INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSIS MODELS SYNTHESIS BASED ON PARALLEL COMPUTING.....	139
<i>Yelmanova E. S., Romanyshyn Y. M.</i>	
NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES.....	152
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	161
<i>Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Serdiuk O.</i>	
DEVELOPMENT OF CRITERION VERIFICATION METHOD FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL PROCESSES WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS.....	161
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V.</i>	
AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND.....	175
<i>Nahorny V. V.</i>	
AUTOMATED CONTROL CUTTING BASED PREDICTION OF INDIVIDUAL LIFE OF THE CUTTING TOOL.....	183
<i>Safonyk A. P., Klepach M. I., Targoniy I. M.</i>	
RESEARCH AND AUTOMATION OF BIOLOGICAL REACTORS OF EFFLUENT WITH THE OXYGEN CONCENTRATION CONTROL.....	192

РАДИОФИЗИКА

РАДИОФИЗИКА

RADIOPHYSICS

УДК 621.382.049.77

Григорчак І. І.¹, Іващишин Ф. О.², Борисюк А. К.³, Швець Р. Я.⁴, Кулик Ю. О.⁵

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Канд. техн. наук, докторант кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Старший науковий співробітник кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁴Канд. техн. наук, науковий співробітник кафедри прикладної фізики і наноматеріалознавства Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁵Канд. фіз.-мат. наук, провідний спеціаліст кафедри фізики металів Львівського національного університету імені Івана Франка, Львів, Україна

КЛАТРАТНІ НАПІВПРОВІДНИКОВІ МУЛЬТИФЕРОЇКИ, СИНТЕЗОВАНІ В СИСТЕМІ $\text{GaSe-NaNO}_2\text{-FeSO}_4$. ВПЛИВ КОІНТЕРКАЛЯЦІЇ

Актуальність. Розглянуто задачу накопичення електричної енергії не в електрохімічний спосіб, а за участі електронів та їх спінів, тобто створення так званих квантових акумуляторів та спінових конденсаторів. Об'єктом дослідження є синтезовані клатрати 4-кратно розширеної матриці GaSe з гостьовими контентами – нітридом натрію (NaNO_2), сульфатом заліза (FeSO_4) та їх коінтеркаляції $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$.

Мета роботи – синтез гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів, які володіли б великою міжфазною поверхнею розділу і забезпечували анізотропію електропровідності в залежності від напрямку; досягнення в таких матеріалах високих значень діелектричної проникності в поєднанні з меншим від 1 значенням тангенса кута електричних втрат.

Метод. Запропоновано інтеркаляційний підхід до створення гетероструктурованих нанокомпозитних матеріалів, що дозволяє використовуючи велику варіабельність гетероінгредієнтів створювати задані складні атомно-молекулярні комплекси типу «господар-гість» та комплекси ієрархічної будови «субгосподар-господар-гість». Методом рентгенівської дифрактометрії виявлено структурні зміни макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ при переході до гостьової нанообмеженої геометрії. На основі частотних залежностей питомого комплексного імпедансу з'ясовані закономірності струмопроходження та накопичення заряду в синтезованих наногібридах і вплив на них власне коінтеркаляції гостьових компонентів. Імпедансні фото- і магнетовідгуки виявили для певних архітектур гігантські фотодіелектричний, магніторезистивний та магнітоємнісний ефекти за кімнатних температур, які відкривають нові можливості їх практичного застосування у якості високочутливих сенсорів постійного магнітного поля та поля світлової хвилі.

Результати. Сформовано клатрати $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \rangle$, $\text{GaSe} \langle \text{FeSO}_4 \rangle$ та $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$. Виявлено накопичення електричного заряду на міжфазних межах. Зафіксовано при кімнатній температурі ефекти від'ємної фотопровідності та гігантського магнітоопору; значне зростання фото-ЕРС; гігантський фотодіелектричний і магнітоємнісний ефекти.

Висновки. Коінтеркаляція $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ істотноше модифікує енергетичний спектр GaSe , ніж їх поокреме впровадження.

Синтезовані клатрати є перспективними (з коінтеркалятною архітектурою найбільше) для нових підходів у технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу, а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

Ключові слова: супрамолекулярні ансамблі, клатрати, наногібриди, селенід галія, імпедансна спектроскопія, фотодіелектричний ефект, магнітоємність, квантові акумулятори, спінові конденсатори.

НОМЕНКЛАТУРА

$\eta(T)$ – параметр порядку;
 σ_s – питома намагніченість насичення зразка;
 δ_H – коефіцієнт магнітоопору;
 $\rho(0)$ – опір електричного струму при відсутності магнітного поля;
 $\rho(H)$ – електроопір в магнітному полі напруженості H ;
 $\tan \delta$ – тангенс кута електричних втрат;
 $\varepsilon(\omega)$ – частотні залежності діелектричної проникності;

$\varepsilon(T)$ – температурні залежності діелектричної проникності;

$\varepsilon(H)$ – діелектрична проникність в магнітному полі;

$\varepsilon(0)$ – діелектрична проникність;

ϕ – магнітоємність;

kT – енергія іонізації;

T – температура.

ВСТУП

Поступ в автономній енергетиці все частіше пов'язують з створенням наносистем, які би перетворювали та

накопичували електричну енергію не в електрохімічний спосіб. Мова іде про перехід на новий – квантовий рівень перетворення, накопичення і зберігання енергії. Одним із перспективних напрямів досліджень в цьому плані являється синтез гетероструктурованих нанокompatитних матеріалів, які володіли б великою міжфазною поверхнею розділу і забезпечували анізотропію електропровідності в залежності від напрямку. Для таких структур ставиться вимога досягнення великих значень діелектричної проникності ($> 10^5$) в поєднанні з тангенсом кута електричних втрат меншим 1, особливо для частот менших від 10–2 Гц. За вище наведених умов теоретично передбачалося [1, 2] можливість накопичення інжектованих електронів на межах розділу наногетерофаз, а відповідні гетеро структури являтимуть собою квантовий акумулятор. Іншим не менш перспективним напрямком являється синтез гетероструктурованих нанокompatитних матеріалів із неоднорідним розподілом магнітної фази, в результаті чого енергія постійного магнітного поля перетворювалася би в електричну в процесі магнітного квантового тунелювання. Останнє явище являє собою не що інше як квантовий конденсатор. Авторами роботи [3] було отримано $ЕРС = 21$ мВ при температурі 3К в постійному магнітному полі з індукцією 1 Тл хоч за законом Фарадея ЕРС не повинна була б виникати під дією статичного магнітного поля. Також велику зацікавленість представляє перехід від резистивних надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур до ємнісних.

Однак традиційні методи їх отримання, такі як вакуумне нанесення, фотолітографія, синтетична техніка Ленгмюра-Блоджетт мають певні застереження, пов'язані з обмеженою варіабельністю у виборі різноманітних гетероінгредієнтів та проблематичністю синтезу конфігурацій «господар-гість». Проте саме в останніх системах можна досягати не тільки цілеспрямованої зміни вихідної атомно-молекулярної структури та силових полів матеріалів-«господарів», але і формувати у кристалічному полі на атомно-молекулярному рівні певні структури, а в майбутньому і цілі функціональні блоки, що, безсумнівно, забезпечить суттєвий прогрес в наноелектроніці. Альтернативою є інтеркаляційні технології, які здатні створювати складні атомно-молекулярні комплекси, користуючись певною послідовністю хімічних реакцій, забезпечуючи одночасно надійну антикоагуляційну матричну ізоляцію наносистем. В цьому ракурсі сьогодні до найперспективніших напрямів досліджень відноситься, зокрема технологія інтеркаляційного формування періодично нано/мезо масштабованих структур, а також формування магнетоелектретного стану та магнетоємнісного зв'язку в інтеркалатах з магнітоактивними гостьовими компонентами.

Отже, метою роботи є розроблення наукових основ формування інтеркалатних гетерофазних структур з різною нанообмеженою геометрією, складом і рівнем ієрархічності архітектури, скероване на перетворення та накопичення електричної енергії на квантовому рівні та максималізацію можливостей сенсорики електромагнітного поля. Також будуть досліджені фізичні властивості отриманих наногібридів та їх поведінка у зовнішніх полях.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На основі напівпровідників із шаруватою монокристалічною будовою шляхом інтеркаляції між шари сегнетоелектричного та магнітоактивного контенту, а також їх коінтеркаляції, сформувати гетероструктуровані нанокompatити із потрібною δ -топологією гостьового контенту. Дослідити їх фізичні властивості. Вивчити вплив зовнішніх постійних магнітного поля та поля світлової хвилі на процеси струмопроходження, поляризації і накопичення заряду. Досягнути умов квантового накопичення і зберігання електричної енергії. Отримати високочутливі матеріали зовнішнього постійного магнітного поля та поля світлової хвилі ємнісного типу.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Сьогоднішній інтенсивний розвиток сегнетоелектричних наноструктур актуалізував фундаментальне питання про розмірні ефекти в сегнетоелектричній поляризації [4] (існування критичного розміру сегнетоелектричних доменів, зміна температури Кюрі). Для експериментальних свідчень цього найоптимальнішим виявилось (див. [5–11] і посилання в них) застосування пористих матриць, характерний розмір пор яких лежить в нанометровому діапазоні. Перевага таких структур зумовлена можливістю керування розмірами і взаємним розташуванням впроваджених сегнетоелектричних фаз за рахунок використання різної геометрії сітки пор. Проведені дослідження виявили значні зміни у параметрах фазових переходів для наноструктурованих речовин в умовах нанообмеженої геометрії. При цьому, величини і характер цих змін є залежними від виду пористої матриці та гостьового контенту. Так, для наночастинок NaNO_2 виявлено зсув температури сегнетоелектричного фазового переходу у низькотемпературну область на 18 К порівняно з об'ємним матеріалом і різкий ріст діелектричної проникності відповідно від 10^2 до 10^5 (діелектрична проникність нанокompatиту $\text{SBA-15} < \text{NaNO}_2 >$ з розміром пор 52 Å складала 103) [12]. Аналогічна ситуація властива і для сульфату амонію в порах молекулярно-граткової матриці МСМ-41 з розміром пор 40 Å [13]. В цьому разі діелектрична проникність є суттєво меншою (235 проти 27 для макроструктурованого). А ось для змішаного сегнетоелектричного гостьового контенту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{KNO}_3$ в порах МСМ-41 виявлено зсув температури сегнетоелектричного фазового переходу у високотемпературну область з одночасним зростанням діелектричної проникності нанокompatиту $\text{MCM-41} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{KNO}_3 >$ до 104 [14]. Більше того, в [15] показано, що структурний параметр порядку $\eta(T)$ для нітриту натрію в пористому склі з діаметром пор 3200 і 200 Å практично співпадає з залежністю для масивного матеріалу, в той час як для NaNO_2 в опалах ця залежність суттєво відрізняється як від спостережуваної в масивному матеріалі, так і від NaNO_2 в пористих склах з діаметром 30 і 70 Å.

Водночас, останнє десятиліття ознаменувалося і бурхливим розвитком робіт в галузі наномagnetизму, квантової когерентної спінтроники. Виявлені при цьому магнітні аномалії нанокompatитів так і не отримали єдиної інтерпретації. Так, в роботі [16] допускається, що розу-

порядкування і зменшення розмірів призводить до появи магнітного порядку в титанатах перехідних металів в порах опалових матриць при значно вищих температурах, ніж у відповідних об'ємних матеріалах. З іншого боку, у нанопорах можуть формуватися наночастинки магнітних окислів настільки малих розмірів, що вони не виявляються методом рентгенівської дифракції через сильне розширення піків, але вносять суттєвий вклад в намагніченість. Останнє дещо корелює з результатами роботи [17], у відповідності до яких, процес імплантації іонів заліза в аморфний діоксин кремнію супроводжується виникненням оксидної форми наночастинок заліза внаслідок руйнування зв'язків Si-O-Si і утворення зв'язків Si-Si та Fe-O. Ситуація ускладнюється ще і тим, що, як було показано в [18], різна магнітна поведінка наноккомпозитів опалових матриць з включеннями магнетиту може зумовлюватися агломерацією магнітних частинок в опаловій матриці різної морфології.

Слід зазначити, що стан заліза в системі залежить не тільки від природи попередника активного компонента, але і від типу носія, який виявляє суттєвий вплив на розмір і будову залізовмісних частинок. Так у силікагелі, просоченому FeSO_4 залізо знаходиться у високоспіновому тривалентному стані. При цьому в системі спостерігаються три позиції тривалентного заліза з помітно більшою електронною заселеністю, ніж у вихідному об'ємному матеріалі [19]. В системах на основі оксиду алюмінію теж спостерігаються три позиції заліза, але відрізняються тільки спотворенням локального оточення.

Вище наведений аналіз показує, що розуміння закономірностей як сегнетоелектричної так і магнітної поведінки інкапсуляційних наноккомпозитів є далеко не повним. Незаперечним є лише те, що фізичні властивості наночастинок в умовах обмеженої гостьової геометрії значно відрізняються від властивостей відповідних об'ємних матеріалів як за рахунок квантово-розмірних ефектів, так і за рахунок взаємодії зі стінками матриць. Вивчення викликаних наноккомпозитом змін властивостей матеріалів є необхідною умовою для успішного застосування наноккомпозитів на основі пористих матриць. Саме в цьому ракурсі слід зазначити, що заміна діелектричної матриці на напівпровідникову забезпечує не тільки більш широкі можливості у варіюванні властивостями наноккомпозитів, але і призводить до появи нових унікальних явищ і ефектів. Наприклад, як встановлено нами в [20], для $\text{InSe}/\langle\text{NaNO}_2\rangle$ спостерігається гігантський зсув точки Кюрі у низькотемпературну область на 125 K. В таких інтеркалатах виявлено інверсію осі анізотропії електропровідності та майже десятикратне зростання фоточутливості. Водночас, у синтезованих нами спін-блокаторній наноструктурі з почерговими напівпровідниковими і магнітоактивними нанопрошарками реалізується гігантський магніторезистивний ефект при кімнатних температурах та слабких магнітних полях, проявляється сильна магніто-фазова чутливість та досягається високочастотний індуктивний відгук, керований постійним електричним полем, прикладеним перпендикулярно до нанопрошарків [21].

В такому контексті виникає дуже цікава перспектива – формування нового класу мультифероїків – наносегне-

томагнетиків, поляризаційні і магнітні властивості яких визначаються електронною енергетичною топологією. Останнє дає підстави сподіватися на розвинення поляроніки як аналога спінтроники. Слід додати, якщо мультифероїкам в об'ємному стані присвячено достатньо велике число праць (наприклад [22] і посилання в ній), то публікації, присвячені їхнім клатратним архітектурам нам невідомі. Тому метою даної роботи якраз і є заповнення в певній мірі цієї прогалини.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для досягнення поставленої мети в якості матеріалу-господаря вибирався фоточутливий напівпровідниковий квазідвовимірний селенід галію (GaSe), а в якості сегнетоелектричного і магнітоактивного гостьових контентів відповідно нітрит натрію (NaNO_2) та сульфат заліза дво-валентного (FeSO_4).

Вирощені методом Бріджмена-Стокбаргера монокристали GaSe володіли яскраво вираженою шаруватою структурою і р-типом провідності. Ширина забороненої зони (за оптичними даними) складала 2,02 eV. Як добре відомо [23], вони характеризуються наявністю «гостьових» позицій – орієнтованих перпендикулярно до кристалографічної осі С областей дії слабких ван-дер-ваальсових сил. Впровадження в означені внутрішньокристалічні проміжки чужорідних іонів, атомів чи молекул відоме як явище інтеркаляції [24]. Крім того, монокристалам властива висока фоточутливість у видимій області спектра.

Вибір нітриту натрію в якості сегнетоелектрика ґрунтувався на його здатності у розплавленому стані безпосередньо інтеркалювати монокристали селеніду галію за рахунок неспарених електронів на атомах азоту. Сульфат заліза, катіонна складова якого має великий спіновий магнітний момент, обирався як відомий прекурсор для синтезу наномагнетиту.

Формування інтеркалатних структур проводився за інтеркаляційною методикою, описаною нами в [20, 25].

Рентгенівські дифракційні спектри отримували на дифрактометрі в $\text{CuK}\alpha$ випромінюванні, монохроматизованому відбиванням від площин (200) монокристалу LiF , встановленому на первинному пучку, в симетричному варіанті $\theta-2\theta$ сканування.

Для дослідження магнітних характеристик отриманих інтеркалатів використовували вібраційний магнітометр, який являє собою високочутливий інструмент для визначення магнітних характеристик різних магнітних матеріалів, включаючи парамагнетики, магнітні порошки, тонкі плівки, магнітні стрічки і диски, магнітом'які матеріали, матеріали для постійних магнітів, високотемпературні напівпровідники. Зразки можуть досліджуватися в сильних і слабких магнітних полях, при різних температурах.

Імпедансні виміри проводилися в напрямку кристалографічної осі С в діапазоні частот 10^{-3} – 10^6 Гц за допомогою вимірювального комплексу «AUTOLAB» фірми «Eco Chemie» (Нідерланди), укомплектованого комп'ютерними програмами FRA-2 та GPES. Видалення сумнівних точок проводилося фільтром Дирихле [26, 27]. Частотні залежності комплексного імпедансу Z аналізувалися графоаналітичним методом в середовищі програмного пакету ZView 2.3 (Scribner Associates). По-

хибки апроксимації не перевищували 4%. Адекватність побудованих імпедансних моделей пакету експериментальних даних була підтверджена повністю випадковим характером частотних залежностей залишкових різниць першого порядку [26, 27].

З метою визначення локальних енергетичних рівнів проводили вимірювання струмів термостимульованої деполяризації.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі обраних матеріалів синтезували як одинарні інтеркалати $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$, $\text{GaSe} < \text{FeSO}_4 >$, так і коінтеркалат $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$. Інтеркаляцію нітриту натрія проводили шляхом поміщення в його розплав монокристалу GaSe , в процесі чого відбувалося N-стадійне впорядкування «гостьового» компоненту, що приводило до значного зростання відстані між окремими шарами монокристалу. Формування макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ відбувалося шляхом сплавляння вихідних прекурсорів у співвідношенні 1:1 (за об'ємом), після чого проводили, по аналогії до попереднього випадку, коінтеркаляцію монокристалу GaSe . Для синтезу інтеркалату $\text{GaSe} < \text{FeSO}_4 >$, була використана більш складна – тристадійна схема кристалізацій [20, 25]. Однак слід відмітити, що для усіх інтеркалатів досягалася однакова ступінь (в даному разі 4-кратного) розширення вихідної матриці, а вміст гостьового контенту контролювався прецизійними гравіметричними і хімічними аналізами.

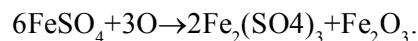
Після синтезу поверхня дослідних зразків була ретельно відмита та нанесені омичні контакти на протилежні грані напівпровідникової матриці в напрямку кристалографічної осі C. Далі були проведені вимірювання імпедансних спектрів, як за нормальних умов, в постійному магнітному полі напруженістю 2,75 кОе так і в полі світлової хвилі при використанні імітатора сонячного випромінювання потужністю 65 Вт. Фізичні поля прикладалися в напрямку пропускання вимірювального сигналу (в напрямку кристалографічної осі C) з метою уникнення дії сили Лоренца.

З метою дослідження локальних домішкових енергетичних рівнів були виміряні струми термостимульованої деполяризації в температурному діапазоні 240÷340 К при сталій швидкості нагріву 1,5 К/хв. Даний температурний діапазон було обрано з практичної точки зору.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На дифрактограмі макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ виявлені максимуми неполярної (несегнетоелектричної) фази NaNO_2 (орторомбічна сингонія, просторова група Immm). Порівняння з літературними даними виявило суттєве зміщення максимумів в сторону більших кутів розсіяння, що вказує на зменшення параметрів елементарної комірки a, b. Параметр c залишається практично незмінним. Водночас помітне зменшення зазначених параметрів не є єдиним неординарним фактом. Викликає здивування відсутність дифракційних рефлексів від FeSO_4 . Для знаходження відповіді на останнє був проведений магнітний аналіз макрокомпозиту. Виявилось, що питома намагніченість насичення зразка, виміряна в магнітному полі напруженістю 800 кА/м склала $\sigma_s = 9,3 \text{ A} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$. Криві

перемагнічування композиту мають безгістерезисний вигляд (рис. 1а) з нульовими значеннями коерцитивної сили та залишкової намагніченості. Імовірно, магнітні властивості зразків обумовлені наявністю в них високодисперсної фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$, котра може утворюватися в результаті розкладу та окислення FeSO_4 за реакцією:



Проведене з метою магнітометричної ідентифікації магнітної фази в композиті вимірювання температурної залежності питомої намагніченості насичення в магнітному полі напруженістю 800 кА м⁻¹ (рис. 1б) підтвердило припущення про присутність магнітної фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Очевидно, її частинки володіють суперпарамагнітними властивостями. Скачок намагніченості в околі 200° С спричинений плавленням солевої матриці NaNO_2 , що супроводжується орієнтацією частинок $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ уздовж прикладеного магнітного поля. Перехід в парамагнітний

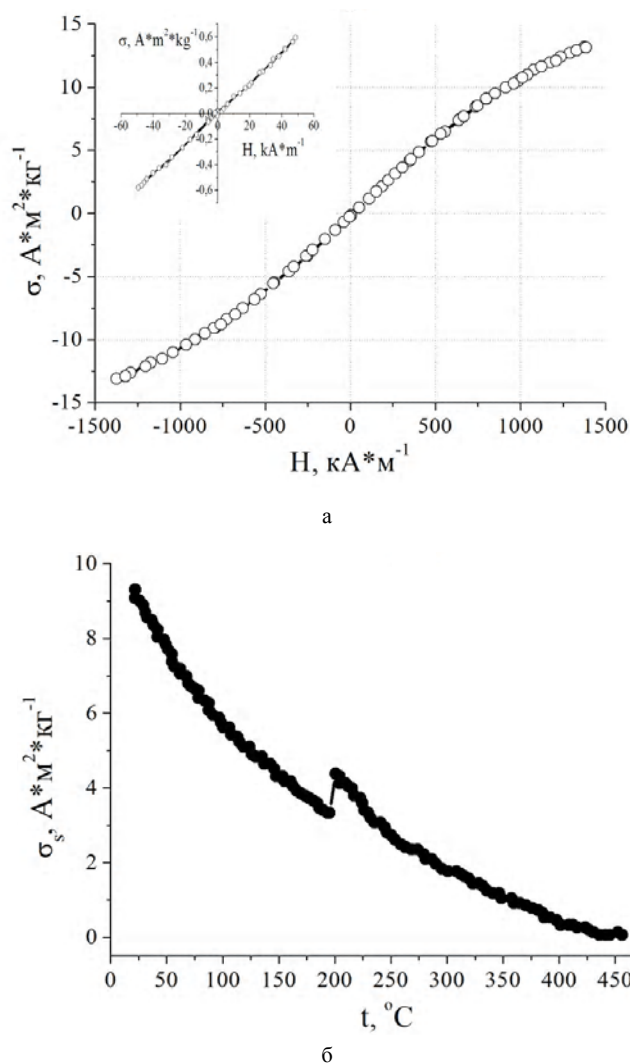


Рисунок 1 – Криві перемагнічування композиту

$\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ в магнітних полях напруженістю до:
а – 1500 кА м⁻¹, б – до 50 кА м⁻¹ (вставка) і температурна залежність його питомої намагніченості

стан близько 430°C пов'язаний з переходом фази $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ під час нагрівання вище $С$ в стабільну немагнітну фазу $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Прийнявши значення питомої намагніченості насичення $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ рівним $75\text{ А}\cdot\text{м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$, вміст фази в композиті складає 12%. Висока дисперсність та незначний вміст фази власне і не дали можливості однозначно ідентифікувати її рентгенівським методом. А ось питання чи дійсно при перекристалізації з сульфатом заліза останній блокує сегнетоелектричне впорядкування залишається відкритим.

Поміщення розплаву досліджуваного макрокомполиту в умови нанообмеженої геометрії (між шари матриці GaSe) і кристалізація його «in-situ» призводить до зміни спектрів рентгенівської дифракції (рис. 2). Видно, що інтеркаляція призводить до суттєвого збільшення міжшарової відстані GaSe: зростання параметра c становить $0,4\text{ Å}$. Профіль максимуму (004) задовільно описується суперпозицією трьох гаусових піків: широкого дифузного максимуму, зміщеного до менших кутів розсіяння, та двох вузьких максимумів, наявність яких може вказувати на формування структурних областей з різними значеннями міжшарової відстані.

Імпедансні дослідження показали, що реальна складова питомого комплексного імпедансу ($\text{Re}Z(\omega)$) макроструктурованого композиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ в дослідженому частотному інтервалі має спадний характер при рості частоти. При переведенні $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ в умови гостьової нанообмеженої геометрії $\text{Re}Z$, що визначається делокалізованими носіями (низькочастотнезалежні ділянки), для утвореного інтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4>$ зменшується у $3\cdot 10^2$ рази порівняно з відповідним значенням для макрокомполиту та у $4\cdot 10^3$ рази порівняно з вихідною матрицею, демонструючи, тим самим, суттєву зміну як енергетичного спектра так, і можливо, рухливості впоперек нанопрошарків. Водночас, неадитивною є і електропровідність $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4>$, зумовлена делокалізованими носіями, щодо електропровідностей $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ і $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (рис. 3).

Таким чином, коінтеркаляція даних гостьових компонентів істотноше модифікує енергетичний спектр, ніж їх

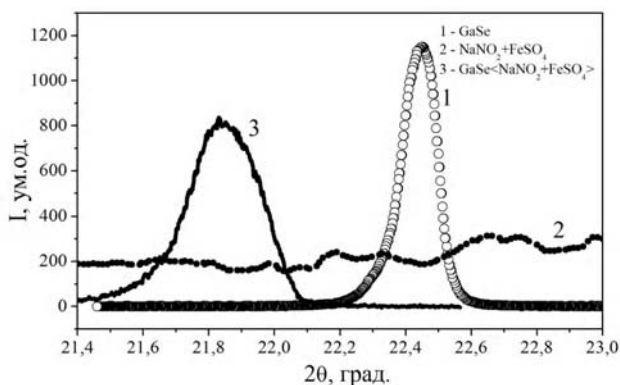


Рисунок 2 – Криві дифракційного відбивання (004) GaSe до (1) та після впровадження композиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ (3). (2) – дифрактограма макрокомполиту у аналізованій кутовій області

поокреме введення. Підтвердження цього можна бачити з наведених на рис. 4 спектрів струмів термостимульованої деполяризації, виміряних в режимі короткозамкнених контактів. Вони засвідчують, також, і квазінеперервність домішкового енергетичного спектра коінтеркалату, причому, на відміну від інтеркалатів, це стосується і мілких рівнів з енергією іонізації $kT < 25\text{ меВ}$. Цікаво зазначити, що тільки для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ властива релаксація як гомо-, так і гетерозаряду. Для вихідного GaSe струми ТСД при релаксації гомозаряду візуалізуються при температурах вищих від 310 K , а для макрокомполиту $\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4$ візуалізація розпочинається при $T > 270\text{ K}$ і відповідає, головним чином, релаксації гетерозаряду.

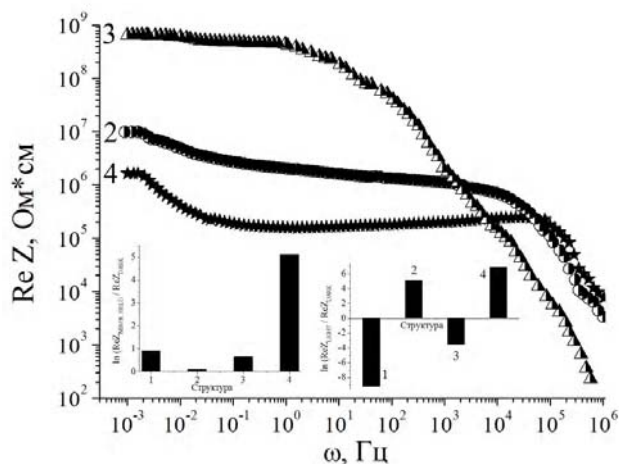


Рисунок 3 – Частотні залежності дійсної складової питомого комплексного імпедансу, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ (2), $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (3) та коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4>$ (4). На вставці – імпедансний низькочастотний відгук даних структур на зовнішнє магнітне поле і поле світлової хвилі (1 – вихідна матриця)

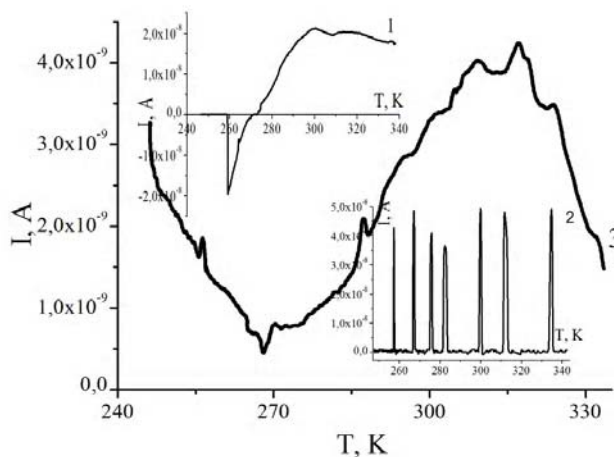


Рисунок 4 – Спектри струмів ТСД перпендикулярних до нанопрошарків $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ (1), $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2\oplus\text{FeSO}_4>$ (3)

Відображення співвідношення $\text{Im}Z(\text{Re}Z)$ у площині комплексного імпедансу (діаграма Найквіста) для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ та $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ має звичний і очікуваний – дводуговий характер. Кожна з дуг є синтетичною, тобто характеризує розподіленість часів релаксації. Високочастотна дуга відображає струмопроходження в нерозширених пакетах матриці, а низькочастотна – між пакетами. В цьому разі заступна електрична схема має вигляд а на рис. 5, де елемент ВСРЕ [26, 27] моделює струмопроходження в просторово обмеженій області з пастковими центрами поблизу рівня Фермі, а паралельна $R||\text{CPE}$ ланка (CPE елемент сталої фази смісного типу) відображає міжпакетне перенесення заряду. Для інтеркалату $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ спостерігається більша частотна дисперсія, що супроводжується появою індуктивного відгуку (відповідна заступна електрична схема – б).

Вольтамперна характеристика $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ (як і $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$) кардинально відрізняється від квазілінійної (властивої вихідним прекурсорам), набуваючи гістерезисного виду. При цьому, коінтеркаляція сульфату заліза не тільки міняє її форму, але і суттєво підвищує величину струму (рис. 6).

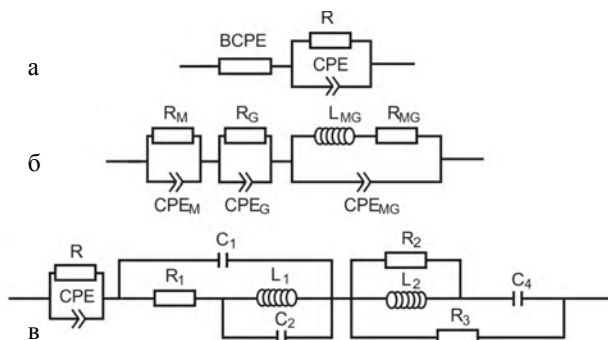


Рисунок 5 – Заступні електричні схеми для годографів імпедансу: а – $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ і $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$, б – $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ за нормальних умов; в – $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ в магнітному полі

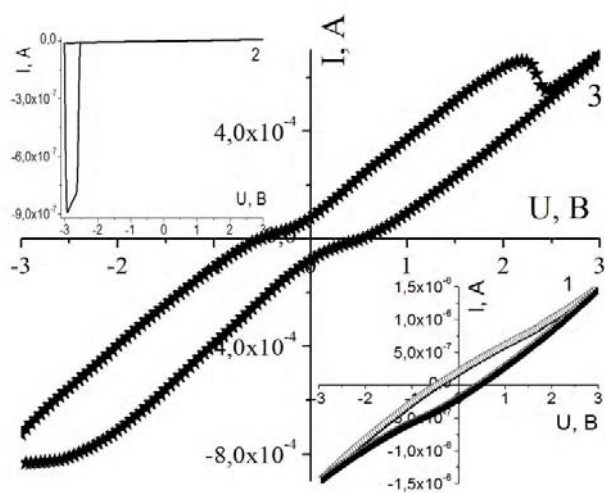


Рисунок 6 – ВАС для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ (1), $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ (3)

Завдяки клатратному принципу організації структури синтезованих наногібридів з супрамолекулярним характером взаємодій гість-господар, який забезпечує квазінеперервний розподіл енергетичних станів у забороненій зоні матеріалу господаря, зокрема – і в періодичному полі координаційних дефектів, слід очікувати від них підвищеної сенсорної спроможності. І дійсно, як видно зі вставок до рис. 3, для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ реалізується гігантський додатний магніторезистивний ефект за кімнатних температур і слабких магнітних полів, який власне забезпечується коінтеркаляцією. За цих умов коефіцієнт магнетоопору, обчислений за формулою

$$\delta_H = \frac{\rho(H)}{\rho(0)}, \text{ складає } 16800 \%.$$

В магнітному полі сильно трансформується і годограф імпедансу власне для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ (рис. 7). А саме:

– появляється низькочастотна дуга, центр якої лежить вище (а не нижче, як звикли) осі реальної складової імпедансу;

– появляється низькочастотна вітка, напрямлена під гострим кутом до осі уявної складової комплексного імпедансу.

Якщо першу особливість зазначеної трансформації можна пов'язати з сильною локалізацією носіїв струму, то друга вказує на ефект магнітного блокування постійного струму (відповідна заступна електрична схема с на рис. 5). Найцікавішим є те, що саме в цьому випадку ВАС (рис. 8) вказує на спостереження «spin-battery» ефекту, величина якого ($\sim 200\text{ мВ}$) при кімнатній температурі і напруженості магнітного поля 2,75.

З рис. 3 також слідує неординарність поведінки синтезованих структур у полі світлової хвилі. Хоч загалом фоточутливість у резистивному режимі дещо зменшується (чого і слід було очікувати) проте для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ та $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ фіксується ефект від'ємної фотопровідності у напрямку, перпендикулярному до нанопрошарків синтезованих клатратів. А ось у фотовольтаїчному режимі отримується практично важ-

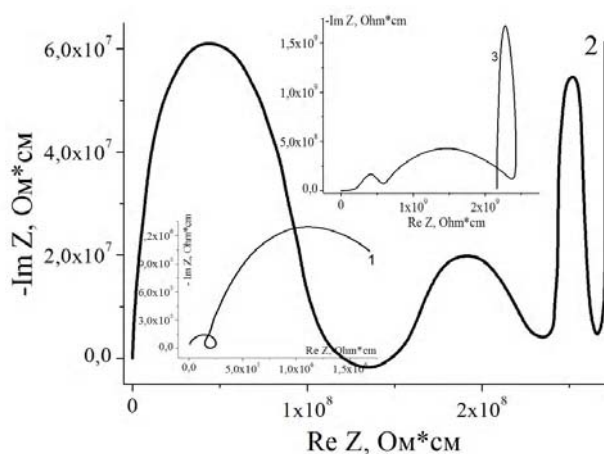


Рисунок 7 – Діаграми Найквіста для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ за нормальних умов (1), в магнітному полі (2) та при освітленні (3)

ливий результат: тільки для коінтеркалату $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$ властиве зростання фото-ЕПС від десятків мВ для вихідної матриці (фото-ЕПС Дембера) до сотень мВ (рис. 8).

Синтезовані наногібриди володіють цікавими і поляризаційними властивостями, результати дослідження яких наведені на рис. 9. Виходячи з практичної цінності, – можливості застосування їх для високодобротних конденсаторів радіочастотного діапазону, при аналізі бралися до уваги дані, яким відповідають значення тангенса кута електричних втрат менші від одиниці. Серед отриманих результатів найперше слід виділити два наступних:

- колосальні значення ε у поєднанні з низьким (<1) значенням $\tan \delta$, особливо у низькочастотній області;
- наявність ділянок аномальної частотної дисперсії діелектричної проникності: ріст ε при збільшенні частоти.

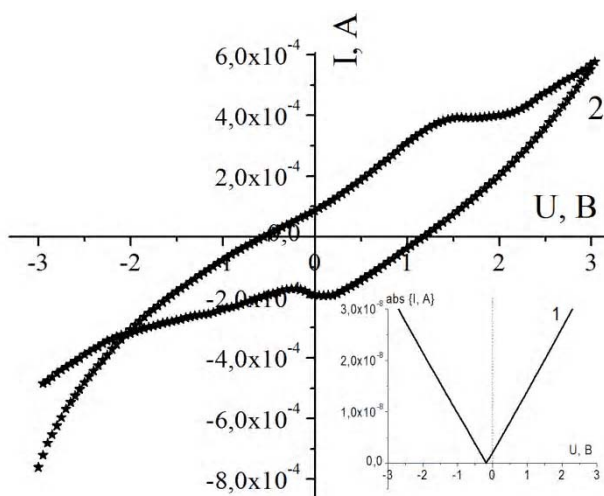


Рисунок 8 – ВАР для напрямку, перпендикулярного до нанопрошарків $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$ в магнітному полі (1) та при освітленні (2)

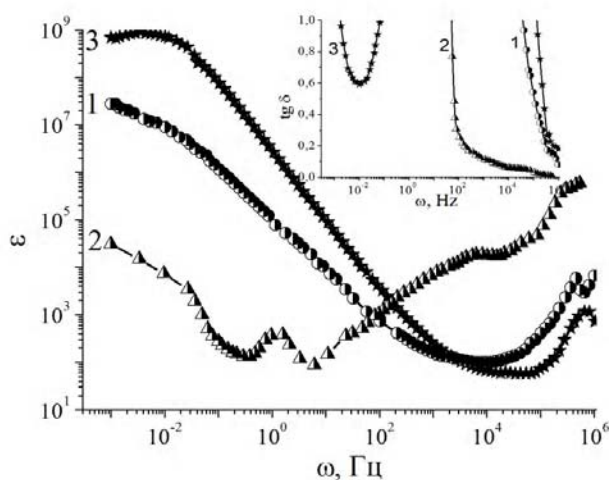
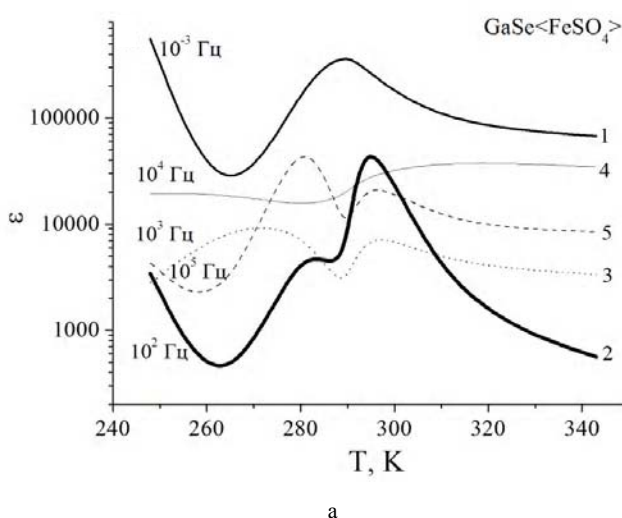


Рисунок 9 – Частотні залежності діелектричної проникності і тангенса кута електричних втрат (вставка), перпендикулярних до нанопрошарків для $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \rangle$ (1), $\text{GaSe} \langle \text{FeSO}_4 \rangle$ (2) та коінтеркалату $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$ (3)

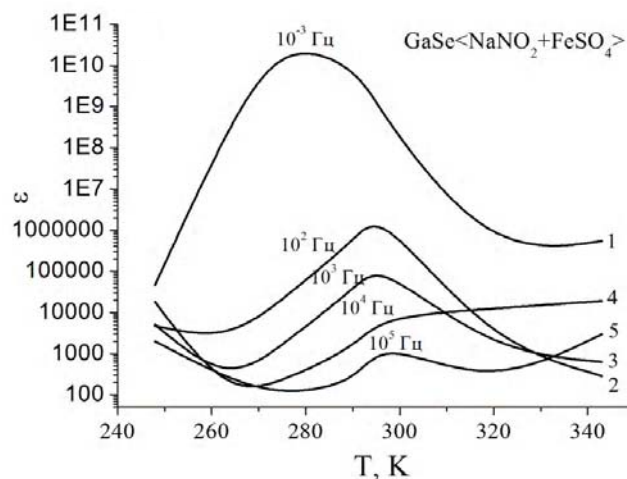
З наведених на рис. 10 температурних залежностей ε для $\text{GaSe} \langle \text{FeSO}_4 \rangle$ немонотонну залежність $\varepsilon(T)$ проблематично віднести до сегнетоелектричної поведінки, так як властивий їй різкий спад максимальних значень ε з підвищенням частоти не спостерігається. Натомість він добре представлений для $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$.

Логічним продовженням отриманих вище результатів є спостережувана нами (рис. 11а) суттєва зміна діелектричної проникності при освітленні видимим світлом.

В нашому випадку величина магнітосмисності χ для синтезованих клатратів на частоті 10 кГц за кімнатних температур в магнітному полі напруженістю 2,75 кОе складає 1120% ($\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \rangle$), 1240% ($\text{GaSe} \langle \text{FeSO}_4 \rangle$) та 19000% ($\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$).



а



б

Рисунок 10 – Температурні залежності діелектричної проникності, перпендикулярної до нанопрошарків для $\text{GaSe} \langle \text{FeSO}_4 \rangle$ (а) та коінтеркалату $\text{GaSe} \langle \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 \rangle$ (б), виміряні на частотах 10^{-3} Гц (1), 10^{-2} Гц (2), 10^{-3} Гц (3), 10^{-4} Гц (4) та 10^{-5} Гц (5)

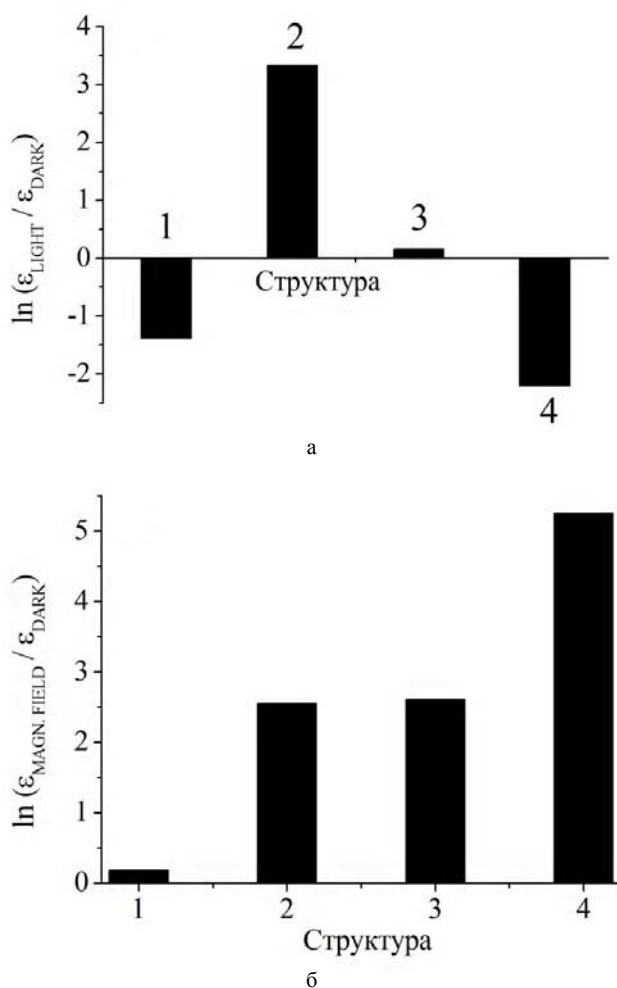


Рисунок 11 – Зміна діелектричної проникності при освітленні та в постійному магнітному полі на частоті 1 МГц для $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$ (2), $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ (3) та коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ (4). 1 – вихідна матриця

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати підтверджують структурну організацію отримуваних супрамолекулярних ансамблів у вигляді нерозширених пакетів вихідної матриці, що чергуються з розширеними областями ван-дер-ваальсових зв'язків з гостьовим контентом (описану нами в [25]) у відповідності до механізму стадійного упорядкування в таких системах [20]. Така структурна будова приводить до появи різноманітних квантових ефектів на міжфазних межах.

Одним із проявів таких ефектів є відоме з літературних джерел явище «від'ємної» ємності, якому надається досить пильна увага (наприклад, [28, 29]) завдяки можливості його застосування в наноелектроніці для створення безгіраторних наноліній затримки. Для напівпровідникових клатратів досліджуваного класу воно нами висвітлене в роботах [30, 31].

Гістерезисний вигляд ВАХ (рис. 6) вказує на процеси накопичення заряду на міжфазних межах. Водночас, незвичний вигляд ВАХ властивий і для клатрату конфігурації $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$, зумовлений появою струмового «хвоста» у від'ємній області потенціалів. Його появу можна

віднести до прояву описаного в [32] явища нерівноважного збіднення поверхні напівпровідника, пов'язаного із захопленням неосновних носіїв поверхневими станами на межі розділу напівпровідник||діелектрик.

Важливе практичне значення має і гігантський додатний магніторезистивний ефект отриманий у наноструктурі $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ $\delta_H = 16800\%$. Для порівняння: δ_H для $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ складає 77,3% [33]. Механізм даного ефекту найбільш ймовірно можна пов'язати з зєсманівською модифікацією енергетичного спектра (для додатного ефекту – локалізацією), як це успішно було зроблено авторами цитованої роботи для пояснення гігантського магніторезистивного ефекту при кімнатних температурах.

Отриманий ефект «spin-battery», величина якого ($\sim 200\text{mV}$) при кімнатній температурі і напруженості магнітного поля 2,75 кОе є на порядок вищою від спостереженого в [3], але при температурі 3 К та напруженості магнітного поля 10 кОе. Іншими словами, саме коінтеркалатна наноструктура $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$ є перспективною для практичної реалізації ідеї [34] створення спінового конденсатора.

Ефект від'ємна фотопровідність може бути пояснений, якщо допустити близькість валентної зони господаря і незаповненої смуги станів гостьових кластерів. Тоді при освітленні білим світлом буде відбуватися просторове розділення заряду, в результаті чого нерівноважні електрони будуть накопичуватися у квантових точках, створюючи, тим самим, фотоіндуковані центри прилипання дірок на гетеромежі господар||гість. Локалізація на них основних носіїв струму і викличе зменшення концентрації делокалізованих носіїв струму, тобто спостережуваний ріст найнижкочастотнішої ділянки ReZ. Однак слід звернути увагу на отриманий фотовольтаїчний

ефект для коінтеркалату $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$, в результаті якого зафіксовано зростання фото-EPC від десятків мВ для вихідної матриці до сотень мВ (рис. 8).

Наявність ділянок аномальної частотної дисперсії діелектричної проникності: ріст ϵ при збільшенні частоти можна пов'язати з додатковою поляризацією, зумовленою перескоками носіїв по локалізованих центрах в околі рівня Фермі [35]. Однак природу колосальних її значень у поєднанні з низьким (<1) значенням $\text{tg}\delta$, особливо у низькочастотній області, пояснити складніше. В останньому контексті добре відомо, що фазами, яким властиве гігантське значення діелектричної проникності в певному температурному околі є сегнетоелектрики. Однак, нами не виявлена візуалізація петель гістерезису (не виключено – через екранування носіями струму), що свідчить про потребу пошуку можливого альтернативного механізму спостережуваних явищ.

Насамперед, у відповідності до вище наведеної особливості енергетичного спектра синтезованих структур та на основі аналізу літературних даних [36–38] спостережуване високе значення діелектричної проникності може бути пов'язане з особливим станом електронної підсистеми, а саме, перерозподілом носіїв заряду між нанопрошарками. За такого перерозподілу, сусідні пари різних фаз заряджені протилежними знаками і їх можна розгля-

дати як диполі, які вносять суттєвий вклад в діелектричну проникність за рахунок зарядової поляризації. Механізм розподілу між різними фазами, при цьому, може бути зумовлений:

- різним значенням хімпотенціалу фаз;
- тунелюванням, при якому час життя електронів на певних рівнях може бути досить великим і система буде заряджена.

Водночас, уже згадуване захоплення заряду пастками в бар'єрному шарі і емісія зарядів в область нанопрошарку – процеси, еквівалентні перемикаючому квазідиполів у зовнішньому полі.

Та чи не найбільш цікавим є питання про природу низького значення тангенса кута електричних втрат $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ у інфранизькочастотній області, поєднання якого з колосальним значенням діелектричної проникності створює реальні перспективи для акумулювання електричної енергії на квантовому рівні без застосування електрохімічних процесів. На жаль, обґрунтованої відповіді на нього поки що немає. Для розкриття його можливого резонансного механізму необхідні окремі дослідження.

В межах такої моделі стає зрозумілою спостережувана нами (рис. 11а) суттєва зміна діелектричної проникності при освітленні видимим світлом. Адже освітлення таких речовин призводить до перерозподілу носіїв заряду по дискретних рівнях, поляризації окремих центрів і зміни густини станів [39]. Це, в свою чергу, викликає зміну діелектричної проникності, тобто фотодіелектричний ефект (ФДЕ). У змінних електричних полях ФДЕ характеризується цілою низкою додаткових особливостей, оскільки існування складного спектра локалізованих станів зумовлює вклад в поляризаційні процеси різних енергетичних рівнів в залежності від частоти електричного поля і освітленості. Водночас, безперечно, не виключається вплив на поляризаційні процеси і безпосередньої взаємодії світлового випромінювання з кристалічною ґраткою. Зазначимо, що загальний характер частотних залежностей $\epsilon(\omega)$ у зовнішніх фізичних полях у принциповому плані міняється тільки для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ при освітленні у частотному діапазоні $10^4 \div 10^6$ Гц, переходячи до монотонно спадної поведінки.

Розуміння механізму спостережуваного магнітоємнісного ефекту є досить складним. Магнітоелектрики (див. огляд [40]) не мали практичного застосування через надзвичайно малі величини даного ефекту. Тільки нещодавно появилася публікація про виявлення ефекту гігантської магнітоємності (ГМЕ) [41]. Під ним розумі-

лося досягнення в TbMnO_3 величини $\wp = \frac{\epsilon(H) - \epsilon(0)}{\epsilon(0)}$

10% при низьких (≤ 18 К) температурах. Це відкриває перспективи заміни традиційно використовуваних індуктивних головок для зчитування інформації з магнітних носіїв на ємнісні магнітоелектричні елементи, що дозволяє зменшити розміри і розсіювання енергії в них.

Очевидно, що в даному разі механізм ГМЕ є відмінним від того, що реалізується в [41]. Його, у світлі вищенаведеного, найбільш ймовірно пов'язати з зємаївською модифікацією енергетичного спектра.

Очевидно, що для остаточної відповіді про природу спостережуваних явищ необхідні подальші поглиблені як експериментальні, так і теоретичні дослідження. І вони будуть того варті, оскільки незаперечною є важливість запропонованих підходів до технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу, а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

ВИСНОВКИ

1. На дифрактограмі макрокомполізу $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$, сформованого шляхом сплавляння вихідних прекурсорів у співвідношенні 1:1 (за об'ємом), присутні максимуми неполярної (несегнетоелектричної) фази (орторомбічна сингонія, просторова група Immm) зі зменшеними параметрами елементарної комірки a , b (параметр c залишається практично незмінним) порівняно з прекурсорною фазою NaNO_2 . Відсутність на ній дифракційних рефлексів від FeSO_4 зумовлена її окислювальним розкладом до $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ з високою дисперсністю та невисоким вмістом (12% за даними магнітного аналізу для $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$). При інтеркаляції комполізу в GaSe параметра c останнього зростає на $0,4 \text{ \AA}$.

2. Коінтеркаляція $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ істотніше модифікує енергетичний спектр GaSe , ніж їх поокреме впровадження.

3. Вольтамперна характеристика

$\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ (як і $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$) кардинально відрізняється від квазілінійної (властивої вихідним прекурсорам), набуваючи гістерезисного виду. При цьому, коінтеркаляція сульфату заліза не тільки міняє її форму, але і суттєво підвищує величину струму.

4. Коінтеркаляція $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ ініціює гігантський додатний магніторезистивний ефект за кімнатних температур і слабких магнітних полів.

5. Для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$ та $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ фіксується ефект від'ємної фотопровідності у напрямку, перпендикулярному до нанопрошарків синтезованих клатратів, і лише для коінтеркалату властиве сильне зростання фото-ЕРС.

6. Загальний характер частотних залежностей $\epsilon(\omega)$ у зовнішніх фізичних полях у принциповому плані міняється тільки для $\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$ при освітленні у частотному діапазоні $10^4 \div 10^6$ Гц, переходячи до монотонно спадної поведінки.

7. У синтезованих клатратах спостерігається гігантські фотодіелектричний і магнітоємнісний ефекти. Величина

магнітоємності $\wp = \frac{\epsilon(H) - \epsilon(0)}{\epsilon(0)}$ за кімнатних темпера-

тур в магнітному полі напруженістю $2,75 \text{ кОе}$ складає 1120% ($\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 >$), 1240% ($\text{GaSe} < \text{FeSO}_4 >$) та 19000% ($\text{GaSe} < \text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4 >$).

8. Синтезовані клатрати є перспективними (з коінтеркалатною архітектурою найбільше) для нових підходів у технології надчутливих сенсорів магнітного поля і поля світлової хвилі за кімнатних температур ємнісного типу,

а також до створення квантових акумуляторів і квантових конденсаторів – новітньої альтернативи хімічним джерелам струму.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи Національного університету «Львівська політехніка» «Фізико-технологічні засади створення наноструктур для квантового генерування і акумулювання електричної енергії» (номер державної реєстрації 0115U000438).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Заявка РСТ BY 99/00012 «Quantum-Size Electronic Devices and Operating Conditions Thereof» (International Publication Number: WO 00/41247, 13.07.2000)
2. Krohns S. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature / [S. Krohns, P. Lunkenheimer, Ch. Kant et al] // Appl. Phys. Lett. – 2009. – Vol. 94. – P. 122903-1-122903-3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3105993>
3. Hai P. N. Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions / [P. N. Hai, S. Ohya, M. Tanaka et al] // Nature. – 2009. – Vol. 458, № 7237 – P. 489–493. DOI:10.1038/nature07879
4. Фридкин В. М. Критический размер в сегнетоэлектрических наноструктурах / В. М. Фридкин // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 2. – С. 203–212. DOI: 10.3367/UFNr.0176.200602c.0203
5. Temperature Evolution of Sodium Nitrite Structure in a Restricted Geometry / [A. V. Fokin, Yu. A. Kumzerov, N. M. Okuneva et al] // Physical Review Letters. – 2002. – Vol. 89, № 17. – P. 175503. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.89.175503>
6. Vakhrushev S. B. ^{23}Na spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry / [S. B. Vakhrushev, Yu. A. Kumzerov, A. V. Fokin et al] // Physical Review B. – 2004. – Vol. 70, № 13. – P. 132102. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.70.132102>
7. Dielectric properties of mesoporous sieves filled with NaNO_2 / [S. V. Baryshnikov, C. Tien, E. V. Charnaya et al] // Ferroelectrics. – 2008. – Vol. 363, № 1. – P. 177–186. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00150190802026127>
8. Coexistence of melted and ferroelectric states in sodium nitrite within mesoporous sieves / [C. Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee et al] // Physical Review B. – 2005. – Vol. 72, № 10. – P. 104105. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.72.104105>
9. Tunable ferroelectric photonic crystals based on porous silicon templates infiltrated by sodium nitrite / [T. V. Murzina, F. Y. Sychev, I. A. Kolmychek, O. A. Aktsiperov] // Applied Physics Letters. – 2016. – Vol. 90. – P. 161120–161122. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2724928>
10. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded into mesoporous sieves / [C. Tien, E. V. Charnaya, M. K. Lee et al] // Journal of Physics: Condensed Matter. – 2008. – Vol. 20. – P. 215205. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/20/21/215205>
11. Yadlovker D. Uniform orientation and size of ferroelectric domains / D. Yadlovker, S. Berger // Physical Review B. – 2005. – Vol. 71, № 18. – P. 184112. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.71.184112>
12. Tien C. Эволюция NaNO_2 в пористых матрицах / [Cheng Tien, E. V. Чарная, С. В. Барышников et al] // Физика твердого тела. – 2004. – Т. 46, № 12. – С. 2224–2228.
13. Диелектрические свойства нанопористой матрицы МСМ-41, заполненной сегнетоэлектриком $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ / [С. В. Барышников, Е. В. Чарная, А. Ю. Милинский, А. Ю. Гойхман et al] // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55, № 5. – С. 987–990.
14. Диелектрические свойства смешанных сегнетоэлектриков $\text{NaNO}_2\text{-KNO}_3$ в нанопористых силикатных матрицах / [С. В. Барышников, Е. В. Чарная, А. Ю. Милинский et al] // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51, № 6. – С. 1172–1176.
15. Температурные зависимости параметра порядка для нитрита натрия, введенного в пористые стекла и опалы / [А. И. Бескровный, С. Г. Васильевский, С. Б. Вахрушев et al] // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, № 5. – С. 1021–1025.
16. Магнитные свойства ряда нанокмполитов на основе опаловых матриц / [М. К. Lee, Е. В. Чарная, С. Tien] // Физика твердого тела. – 2013. – Т. 55, № 3. – С. 572–576.
17. Курмаев Э. З. Наночастицы в аморфном SiO_2 : рентгеновские эмиссионные и абсорбционные свойства / [Э. З. Курмаев, Д. А. Зацепин, С. О. Чолах et al] // Физика твердого тела. – 2005. – Т. 47, № 4. – С. 728–730.
18. Свойства 3D-композитов на основе опаловых матриц и магнитных наночастиц / [С. Н. Ивичева, Ю. Ф. Каргин, Е. А. Овченко et al] // Физика твердого тела. – 2011. – Т. 53, № 6. – С. 1053–1058.
19. Состояние железа в наночастицах, полученных методом пропитки силикагеля и оксида алюминия раствором FeSO_4 / [Г. А. Бухтиярова, О. Н. Мартынов, С. С. Якушкин et al] // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 52, № 4. – С. 771–781.
20. Grigorchak I. I. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics / I. I. Grigorchak, V. V. Netyaga, Z. D. Kovalyuk // Journal of Physics: Condensed Matter. – 1997. – Vol. 9. – P. L191–L195. DOI: <https://doi.org/10.1088/0953-8984/9/12/001>
21. Покладок Н. Т. Интеркалатные структуры с δ -топологической зоной чередующихся полупроводниковых и магнитоактивных нанослоев и их импедансное поведение в магнитном и электрическом поле / Н. Т. Покладок, И. И. Григорчак, Я. М. Бужук // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 2. – С. 77–82.
22. Звездин А. К. Фазовые переходы и гигантский магнитоэлектрический эффект в мультиферроиках / А. К. Звездин, А. П. Пятаков // Успехи физических наук. – 2004. – Т. 174, № 4. – С. 465–470. DOI: 10.3367/UFNr.0174.200404n.0465
23. Lies R. M. A. III–VI Compounds / R. M. A. Lies // Preparation and cryst. growth material with layered structure. – Dordrecht-Boston, 1977. – P. 225–254.
24. Friend R. H. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides / R. H. Friend, A. D. Yoffe // Advances in Physics. – 1987. – Vol. 36, № 1. – P. 1–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00018738700101951>
25. Grygorchak I. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor / [I. Grygorchak, F. Ivashchyshyn, P. Stakhira et al] // Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics. – 2013. – Vol. 8, № 3 – P. 292–296. DOI: <https://doi.org/10.1166/jno.2013.1464>
26. Стойнов З. Б. Электрохимический импеданс / [З. Б. Стойнов, Б. М. Графов, Б. Савова-Стойнова, В. В. Елкин]. – М.: Наука, 1991. – 336 с.
27. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application / Ed. E. Barsoukov and J. R. Macdonald. – Wiley interscience, 2005. – 585 p.
28. Bisquert J. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry / J. Bisquert, H. Randriamahazaka, G. Garcia-Belmonte // Electrochimica Acta. – 2005. – Vol. 51. – P. 627–640. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2005.05.025>
29. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forward Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells / [I. Mora-Sero, J. Bisquert, F. Fabregat-Santiago et al] // Nano Letters. – 2006. – Vol. 6, № 4. – P. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q
30. Nonorganic semiconductor – Conductive polymer intercalate nanohybrids: Fabrication, properties, application / [F. Ivashchyshyn, I. Grygorchak, P. Stakhira et al] // Current Applied Physics. – 2012. – Vol. 12. – P. 160–165. DOI:10.1016/j.cap.2011.05.032

31. Полупроводниковые клатраты с периодически модулированной топологией гостевого сегнетоэлектрического жидкого кристалла в термическом, магнитном и световой волн полях / [Т. Н. Бищанюк, И. И. Григорчак, А. В. Фечан, Ф. О. Иващишин] // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 7. – С. 139–142.
 32. Тихов С. В. Особенности явления неравновесного обеднения, сопровождаемого процессами захвата неосновных носителей поверхностными состояниями, в структурах металл-диэлектрик-полупроводник / [С. В. Тихов, О. Н. Горшков, М. Н. Коряжнина et al] // Письма в журнал технической физики. – 2016. – Т. 42, № 3. – С. 52–60.
 33. Гигантская объемная магнитострикция и колоссальное магнитосопротивление при комнатных температурах в $\text{La}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ / [Р. В. Демин, Л. И. Королева, А. З. Муминов, Я. М. Муковский] // Физика твердого тела. – 2006. – Т. 48, № 2. – С. 305–307.
 34. Datta S. Proposal for a “spin capacitor” / S. Datta // Applied physics letters: – 2005. – Vol. 83. – P. 013115(1–3). DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1968417>
 35. Диэлектрические свойства соединений $\text{Cd}_{1-x}\text{Fe}_x\text{Se}$ / [П. В. Жуковский, Я. Партыка, П. Венгерэк et al] // Физика и техника полупроводников – 2000. – Т. 34, № 10. – С. 1174–1177.
 36. Нагаев Э. Л. Малые металлические частицы / Э. Л. Нагаев // Успехи физических наук. – 1992. – Т. 162, № 9. – С. 49–124. DOI: 10.3367/UFNr.0162.199209b.0049
 37. Болтаев А. П. Аномально высокая низкочастотная эффективная диэлектрическая проницаемость в системе металлических наноостровов / А. П. Болтаев, Ф. А. Пудонин // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2008. – Т. 134, № 3. – С. 587–594.
 38. Беляев Б. А. Спектры импеданса тонких пермаллоевых пленок с наноостровковой структурой / Б. А. Беляев, Н. А. Дрокин // Физика твердого тела. – 2012. – Т. 54, № 2. – С. 340–346.
 39. Особенности фотодиэлектрического эффекта в слоях $\alpha\text{-As}_2\text{Se}_3$ / [Н. И. Анисимова, В. А. Бордовский, В. И. Грабко, Р. А. Кастро] // Письма в журнал технической физики. – 2013. – Т. 39, № 2. – С. 1–7.
 40. Смоленский Г. А. Сегнетомагнетики / Г. А. Смоленский, И. Е. Чупис // Успехи физических наук. – 1982. – Т. 137, № 3. – С. 415–448. DOI: 10.3367/UFNr.0137.198207b.0415
 41. Magnetic control of ferroelectric polarization / [T. Kimura, T. Goto, H. Shintani et al] // Nature. – 2003. – Vol. 426, No. 6962. – P. 55–58. DOI:10.1038/nature02018
- Статья надійшла до редакції 09.03.2017.
Після доробки 20.06.2017.

Григорчак И. И.¹, Иващишин Ф. О.², Борисюк А. К.³, Швець Р. Я.⁴, Кулик Ю. О.⁵

¹Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

²Канд. техн. наук, докторант кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

³Старший научный сотрудник кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

⁴Канд. техн. наук, научный сотрудник кафедры прикладной физики и наноматериаловедения Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

⁵Канд. физ.-мат. наук, ведущий специалист кафедры физики металлов Львовского национального университета имени Ивана Франко, Львов, Украина

КЛАТРАТНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МУЛЬТИФЕРОИКИ, СИНТЕЗИРОВАННЫЕ В СИСТЕМЕ $\text{GaSe-NaNO}_2\text{-FeSO}_4$. ВЛИЯНИЕ КОИНТЕРКАЛЯЦИИ

Актуальность. Рассмотрена задача накопления электрической энергии не в электрохимический способ, а с участием электронов и их спинов, то есть создание так называемых квантовых аккумуляторов и спиновых конденсаторов. Объектом исследования являются синтезированные клатраты 4-кратно расширенной матрицы GaSe с гостевыми компонентами – нитритом натрия (NaNO_2), сульфатом железа (FeSO_4) и их коинтеркаляции $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$.

Цель работы – синтез гетероструктурированных нанокompозитных материалов, которые обладали бы большой межфазной поверхностью раздела и обеспечивали анизотропию электропроводности в зависимости от направления; достижения в таких материалах высоких значений диэлектрической проницаемости в сочетании с меньше 1 значением тангенса угла электрических потерь.

Метод. Предложено интеркаляционный подход к созданию гетероструктурированных нанокompозитных материалов, что позволяет используя большую вариабельность гетероингредиентов создавать заданные сложные атомно-молекулярные комплексы типа «хозяин-гость» и комплексы иерархического строения «субхозяин-хозяин-гость». Методом рентгеновской дифрактометрии выявлены структурные изменения макрокомпозиту $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ при переходе к гостевой наноограниченной геометрии. На основе частотных зависимостей удельного комплексного импеданса выяснены закономерности токопрохождения и накопления заряда в синтезированных наногибридах и влияние на них собственно коинтеркаляции гостевых компонентов. Импедансные фото- и магнетоотзывы обнаружили для определенных архитектур гигантские фотодиэлектрический, магниторезистивный и магнетоемкостный эффекты при комнатных температурах, которые открывают новые возможности их практического применения в качестве высокочувствительных сенсоров постоянного магнитного поля и поля световой волны.

Результаты. Сформированы клатраты $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2>$, $\text{GaSe}<\text{FeSO}_4>$ и $\text{GaSe}<\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4>$. Выявлено накопление электрического заряда на межфазных пределах. Зафиксировано при комнатной температуре эффекты отрицательной фотопроводимости и гигантского магнетосопротивления; значительный рост фото-ЭДС; гигантский фотодиэлектрический и магнетоемкостный эффекты.

Выводы. Коинтеркаляция $\text{NaNO}_2 \oplus \text{FeSO}_4$ существенно модифицирует энергетический спектр GaSe, чем их поотдельное внедрения.

Синтезированные клатраты являются перспективными (с коинтеркалатной архитектурой всего) для новых подходов в технологии сверхчувствительных сенсоров магнитного поля и поля световой волны при комнатных температур емкостного типа, а также к созданию квантовых аккумуляторов и квантовых конденсаторов – новейшей альтернативы химическим источникам тока.

Ключевые слова: супрамолекулярные ансамбли, клатраты, наногибриды, селенид галлия, импедансная спектроскопия, фотодиэлектрический эффект, магнетоемкость, квантовые аккумуляторы, спиновые конденсаторы.

Grygorchak I. I.¹, Ivashchysyn F. O.², Borysiuk A. K.³, Shvets R. Ya.⁴, Kulyk Yu. O.⁵

CLATHRATE SEMICONDUCTOR MULTIFERROICS, SYNTHESIZED IN SYSTEM GaSe-NaNO₂-FeSO₄ AND INFLUENCE OF COINTERCALATION

¹Dr.Sc., Professor, Head of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

²PhD, Doctoral Candidate of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

³Senior Research Fellow of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

⁴PhD, Researcher of Department of Applied Physics and Nanomaterials Science, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

⁵PhD, Leading Specialist of Department of Metal Physics, Ivan Franko National University of Lviv, Lviv, Ukraine

Context. The task for electric energy accumulation in non-electrochemical way but by means of electrons and spins was developed on the basis of quantum accumulators and spin capacitors. Synthesized clathrates of 4 folds expanded GaSe matrix with guest component sodium nitrite NaNO₂, Iron II Sulfate FeSO₄ and combination of them NaNO₂⊕FeSO₄ are the object of research.

Objective. Synthesis of heterostructured nanocomposite materials with large developed interface, anisotropic electric conductance and high values of dielectric permittivity in combination with loss tangent less than 1.

Method. The intercalation approach to heterostructured nanocomposite materials formation was proposed. It allows creating developed atomic-molecular complexes of host-guest type and hierarchical structures of subhost-host-guest type. The X-ray diffractometry data show the structural changes in macro composite NaNO₂⊕FeSO₄ at the transition to the guest nanoscale geometry. With the help of frequency dependence of specific complex impedance the main features of current flow and charge accumulation processes in synthesized nanohybrids and effect of cointercalation were determined. Impedance photo- and magneto- responses show a gigantic photodielectric, magnetoresistive and magnetocapacitive effects at room temperature. These effects open up a new possibilities of theirs application as highly sensitive sensors of constant magnetic and light wave field.

Results. Clathrates GaSe<NaNO₂>, GaSe<FeSO₄> та GaSe<NaNO₂⊕FeSO₄> were synthesized. Electric charge accumulation at the interface was determined. The effects of negative photoconductivity and giant magnetoresistance, drastic increase in photo-EMF, giant photodielectric and magnetocapacitive effects were registered at room temperature.

Conclusions. Cointercalation of NaNO₂⊕FeSO₄ modifies the energetic specter of GaSe more than individual intercalation. Synthesized clathrates are promising materials for novel approaches in technology of highly sensible sensors of capacitive type for magnetic and light wave field at room temperatures as well as for quantum accumulators and quantum capacitors as a new alternative of chemical power sources.

Keywords: supramolecular ensembles, clathrates, nanohybrids, Galium Selenide, impedance spectroscopy, photodielectric effect, magnetocapacity, quantum accumulators, spin capacitors.

REFERENCES

- Request PCT BY 99/00012 "Quantum-Size Electronic Devices and Operating Conditions Thereof" (International Publication Number: WO 00/41247, 13.07.2000)
- Krohns S., Lunkenheimer P., Kant Ch., Pronin A. V., Brom H. B., Nugroho A. A., Diantoro M., and Loidl A. Colossal dielectric constant up to gigahertz at room temperature, *Appl. Phys. Lett.*, 2009, Vol. 94, pp. 122903-1–122903-3. DOI: 10.1063/1.3105993
- Hai P. N., Ohya S., Tanaka M., Barnes S. E., Maekawa S. Electromotive force and huge magnetoresistance in magnetic tunnel junctions, *Nature*, 2009, Vol. 458, No. 7237, pp. 489–493. DOI:10.1038/nature07879
- Fridkin V.M. Critical size in ferroelectric nanostructures, *Physics Uspekhi*, 2006, Vol. 49, pp. 193–202. DOI: 10.1070/PU2006v049n02ABEH005840
- Fokin A. V., Kumzerov Yu. A., Okuneva N. M., Naberezhnov A. A., Vakhrushev S. B., Golosovsky I. V., Kurbakov A. I. Temperature Evolution of Sodium Nitrite Structure in a Restricted Geometry, *Physical Review Letters*, 2002, Vol. 89, No. 17, P. 175503. DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.175503
- Vakhrushev S. B., Kumzerov Yu. A., Fokin A. V., Naberezhnov A. A., Zalar B., Lebar A., Blinc R. ²³Na spin-lattice relaxation of sodium nitrite in confined geometry, *Physical Review B*, 2004, Vol. 70, No. 13, pp. 132102. DOI: 10.1103/PhysRevB.70.132102
- Baryshnikov S. V., Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Michel D., Bohlmann W. Dielectric properties of mesoporous sieves filled with NaNO₂, *Ferroelectrics*, 2008, Vol. 363, No.1, pp. 177–186. DOI: 10.1080/00150190802026127
- Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Baryshnikov S. V., Sun S. Y., Michel D., Bohlmann W. Coexistence of melted and ferroelectric states in sodium nitrite within mesoporous sieves, *Physical Review B*, 2005, Vol. 72, No. 10, pp. 104–105. DOI: 10.1103/PhysRevB.72.104105
- Murzina T. V., Sychev F. Y., Kolmychek I. A., Aktsiperov O. A. Tunable ferroelectric photonic crystals based on porous silicon templates infiltrated by sodium nitrite, *Applied Physics Letters*, 2016, Vol. 90, pp. 161120–161122. DOI: 10.1063/1.2724928
- Tien C., Charnaya E. V., Lee M. K., Baryshnikov S. V., Michel D., Bohlmann W. NMR studies of structure and ferroelectricity for Rochelle salt nanoparticles embedded into mesoporous sieves, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2008, Vol. 20, pp. 215205. DOI: 10.1088/0953-8984/20/21/215205
- Yadlovker D., Berger S. Uniform orientation and size of ferroelectric domains, *Physical Review B*, 2005, Vol. 71, No. 18, pp. 184112. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.184112
- Tien C., Charnaya E. V., Baryshnikov S. V., Lee M. K., Sun S. Y., Michel D., Bohlmann W. Evolution of NaNO₂ in porous matrices, *Physics of the Solid State*, 2004, Vol. 46, No. 12, pp. 2301–2305. DOI:10.1134/1.1841397
- Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Milinskii A. Yu., Goikhman A. Yu., Tien C., Lee M. K., Chang L. J. Dielectric properties of the nanoporous MCM-41 matrix filled with the (NH₄)₂SO₄ ferroelectric, *Physics of the Solid State*, 2013, Vol. 55, No. 5, pp. 1070–1073. DOI: 10.1134/S1063783413050041
- Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Milinskii A. Yu., Stukova E. V., Tien C., Bohlmann W., Michel D. Dielectric properties of mixed NaNO₂-KNO₃ ferroelectrics in nanoporous silicate matrices, *Physics of the Solid State*, 2009, Vol. 51, No. 6, pp. 1243–1247. DOI: 10.1134/S1063783409060262
- Beskrovny A. I., Vasilovski S. G., Vakhrushev S. B., Kurdyukov D. A., Zvorykina O. I., Naberezhnov A. A., Okuneva N. M., Tovar M., Rysakiewicz-Pasek E., Jaguś P. Temperature dependences of the order parameter for sodium nitrite embedded into porous glasses and opals, *Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, No. 5, pp. 1092–1097. DOI: 10.1134/S1063783410050410

16. Lee M. K., Charnaya E. V., Tien C., Samoilovich M. I., Chang L. J., Mikushev V. M. Magnetic properties of some opal-based nanocomposites, *Physics of the Solid State*, 2013, Vol. 55, No. 3, pp. 629–633. DOI: 10.1134/S1063783413030165
17. Kurmaev É. Z., Zatsepin D. A., Cholakh S. O., Schmidt B., Harada Y., Tokushima T., Osawa H., Shin S., Takeuchi T. Iron nanoparticles in amorphous SiO₂: X-ray emission and absorption spectra, *Physics of the Solid State*, 2005, Vol. 47, No. 4, pp. 754–757. DOI: 10.1134/1.1913992
18. Ivicheva S. N., Kargin Yu. F., Ovchenkov E. A., Koksharov Yu. A., Yurkov G. Yu. Properties of three-dimensional composites based on opal matrices and magnetic nanoparticles, *Physics of the Solid State*, 2011, Vol. 53, No. 6, P. 1114. DOI: 10.1134/S1063783411060138
19. Bukhtiyarova G. A., Mart'yanov O. N., Yakushkin S. S., Shuvaeva M. A., Bayukov O. A. State of iron in nanoparticles prepared by impregnation of silica gel and aluminum oxide with FeSO₄ solutions, *Physics of the Solid State*, 2010, Vol. 52, No. 4, pp. 826–837. DOI: 10.1134/S1063783410040268
20. Grigorchak I. I., Netyaga V. V., Kovalyuk Z. D. On some physical properties of InSe and GaSe semiconducting crystals intercalated by ferroelectrics, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1997, Vol. 9, pp. L191–L195. DOI: 10.1088/0953-8984/9/12/001
21. Pokladok N. T., Grigorchak I. I., Buzhuk Ya. M. Intercalated structures with a δ topological zone of alternating semiconductors and magnetoactive nanolayers and behavior of their impedance in magnetic and electric fields, *Technical Physics*, 2010, Vol. 80, No. 2, pp. 236–241. DOI: 10.1134/S106378421002012X
22. Zvezdin A. K., Pyatakov A. P. Phase transitions and the giant magnetoelectric effect in multiferroics, *Physics Uspekhi*, 2004, Vol. 47, pp. 416–421. DOI: 10.1070/PU2004v047n04ABEH001752
23. Lies R. M. A. III – VI Compounds, *Preparation and cryst. growth material with layered structure*. Dordrecht-Boston, 1977, pp. 225–254.
24. Friend R. H., Yoffe A. D. Electronic Properties of intercalation complexes of the transition metal dichalcogenides, *Advances in Physics*, 1987, Vol. 36, No. 1, pp. 1–94. DOI: 10.1080/00018738700101951
25. Grygorchak I., Ivashchyshyn F., Stakhira P., Reghu R. R., Cherpak V., and Grazulevicius J. V. Intercalated Nanostructure Consisting of Inorganic Receptor and Organic Ambipolar Semiconductor, *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 2013, Vol. 8, No. 3, pp. 292–296. DOI: 10.1166/jno.2013.1464
26. Stoinov Z. B., Grafov B. M., Savova-Stoinova B. S., Elkin V. V. Electrochemical Impedance. Moscow, Nauka, 1991, 336 p.
27. Ed. Barsoukov E. and Macdonald J. R. Impedance spectroscopy. Theory, experiment and application. Wiley interscience, 2005, 585 p.
28. Bisquert J., Randriamahazaka H., Garcia-Belmonte G. Inductive behaviour by charge-transfer and relaxation in solid-state electrochemistry, *Electrochimica Acta*, 2005, Vol. 51, pp. 627–640. DOI: 10.1016/j.electacta.2005.05.025
29. Mora-Sero I., Bisquert J., Fabregat-Santiago F., Garcia-Belmonte G., Zoppi G., Durose K., Proskuryakov Yu., Oja I., Belaidi A., Ditttrich T., Tena-Zaera R., Katty A., Lévy-Clément C., Barrioz V., Irvine S. J. C. Implications of the Negative Capacitance Observed at Forwards Bias in Nanocomposite and Polycrystalline Solar Cells, *Nano Letters*, 2006, Vol. 6, No. 4, pp. 640–650. DOI: 10.1021/nl052295q
30. Ivashchyshyn F., Grygorchak I., Stakhira P., Cherpak V., Micov M. Nonorganic semiconductor – Conductive polymer intercalate nanohybrids: Fabrication, properties, application, *Current Applied Physics*, 2012, Vol. 12, pp. 160–165. DOI: 10.1016/j.cap.2011.05.032
31. Bishchaniuk T. M., Grygorchak I. I., Fechan A. V., Ivashchyshyn F. O. Semiconductor clathrates with a periodically modulated topology of a host ferroelectric liquid crystal in thermal, magnetic, and light-wave fields, *Technical Physics*, 2014, Vol. 84, No. 7, pp. 1085–1087. DOI: 10.1134/S1063784214070068
32. Tikhov S. V., Gorshkov O. N., Koryazhkina M. N., Antonov I. N., Kasatkin A. P. Specific features of nonequilibrium depletion accompanied by the trapping of minority carriers by surface states in metal-insulator-semiconductor structures, *Technical Physics Letters*, 2016, Vol. 42, No. 2, pp. 138–142. DOI: 10.1134/S1063785016020139
33. Demin R. V., Koroleva L. I., Muminov A. Z., Mukovski- Ya. M. Giant volume magnetostriction and colossal magnetoresistance in La_{0.7}Ba_{0.3}MnO₃ at room temperature, *Physics of the Solid State*, 2006, Vol. 48, No. 2, pp. 322–325. DOI: 10.1134/S1063783406020211
34. Datta S. Proposal for a “spin capacitor”, *Applied physics letters*, 2005, Vol. 83, pp. 013115(1-3). DOI: 10.1063/1.1968417
35. Tukowski P. V., Partyka J., Wagierek P., Shostak Yu., Sidorenko Yu., Rodzik A. Dielectric properties of Cd_{1-x}Fe_xSe compounds, *Semiconductors*, 2000, Vol. 34, No. 10, pp. 1124–1127. DOI: 10.1134/1.1317568
36. Nagaev E. L. Small metal particles, *Physics Uspekhi*, 1992, Vol. 35, No. 9, pp. 747–782. DOI: 10.1070/PU1992v035n09ABEH002261
37. Boltaev A. P., Pudonin F. A. Anomalously high low-frequency effective permittivity in a system of metal nanoislands, *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 2008, Vol. 107, No. 3, pp. 501–508. DOI: 10.1134/S1063776108090173
38. Belyaev B. A., Drokin N. A. Impedance spectra of thin permalloy films with a nanoisland structure, *Physics of the Solid State*, 2012, Vol. 54, No. 2, pp. 360–367. DOI: 10.1134/S1063783412020084
39. Anisimova N. I., Bordovskii V. A., Grabko G. I., Castro R. A. Specific features of the photodielectric effect in amorphous As₂Se₃ layers, *Technical Physics Letters*, 2013, Vol. 39, No. 1, pp. 98–100. DOI: 10.1134/S1063785013010318
40. Smolenskii G. A., Chupis I. E. Ferroelectromagnets, *Physics Uspekhi*, 1982, Vol. 25, No. 7, pp. 475–493. DOI: 10.1070/PU1982v025n07ABEH004570
41. Kimura T., Goto T., Shintani H., Ishizaka K., Arima T., Tokura Y. Magnetic control of ferroelectric polarization, *Nature*, 2003, Vol. 426, No. 6962, pp. 55–58. DOI: 10.1038/nature02018

РАДИОЕЛЕКТРОНІКА
ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇРАДИОЕЛЕКТРОНИКА
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИRADIO ELECTRONICS
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.96

Пиза Д. М.¹, Семенов Д. С.², Мороз Г. В.³¹Д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина²Начальник отдела, казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», г. Запорожье, Украина³Аспирант кафедры радиотехники и телекоммуникаций, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, УкраинаАНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО
ФИЛЬТРА В УСЛОВИЯХ ОДНОВРЕМЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ
АКТИВНЫХ И ПАССИВНЫХ ПОМЕХ

Актуальность. При воздействии комбинированной помехи пространственно-распределенный характер пассивной составляющей разрушает пространственную корреляцию точечных источников активной помехи. Это приводит к существенному ухудшению коэффициента подавления активной составляющей комбинированной помехи. Поэтому актуальным является исследование влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации активной шумовой помехи, а также формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной только активной шумовой помехой, для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

Цель. Исследование частотного метода формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра в условиях одновременного воздействия активных шумовых и пассивных помех, действующих по главному лучу и по боковым лепесткам диаграммы направленности.

Метод. В предложенном методе при формировании классифицированной обучающей выборки используются частотные отличия в ширине спектра активной и пассивной помехи.

Результаты. Разработана имитационная модель адаптивного поляризационного фильтра. Путем анализа процессов формирования весовых коэффициентов установлено, что предложенный метод может обеспечить эффективную компенсацию активной составляющей комбинированной помехи. Проведенные экспериментальные исследования поляризационного фильтра в полигонных условиях подтвердили высокую эффективность подавления активных шумовых помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны.

Научная новизна состоит в разработке нового метода и имитационной модели формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

Практическая значимость определяется проведенными экспериментальными исследованиями в полигонных условиях с количественными оценками эффективности предложенного метода. Показано, что при использовании частотных отличий в структуре активной и пассивной составляющей комбинированной помехи коэффициент подавления активной шумовой помехи, действующий с направления главного луча диаграммы направленности антенны, может достигать 25 децибел.

Ключевые слова: адаптация, поляризационный фильтр, моделирование, эксперимент.

НОМЕНКЛАТУРА

ААР – адаптивная антенная решетка;
АТ – аттенуатор;
АШП – активная шумовая помеха;
ГШ – генератор шума;
ДНА – диаграмма направленности антенны;
Е – вектор электромагнитного поля;
ПФ – полосовой фильтр;
Р – рупор;

РЛС – радиолокационная станция;
УМ – усилитель мощности;
 $\dot{U}_k$ – комплексное значение амплитуды АШП на входе компенсационного канала;
 $\dot{U}_0$ – комплексное значение амплитуды АШП на входе основного канала;
 $\dot{U}_\Sigma$ – комплексное значение амплитуды АШП на выходе поляризационного фильтра;

$\tilde{W}$ – комплексное значение весового коэффициента;
 μ – скалярная величина, определяющая глубину корреляционной обратной связи.

ВВЕДЕНИЕ

Для защиты радиолокационных средств от воздействия АШП могут быть использованы как пространственные, так и поляризационные отличия в структуре полезных и помеховых сигналов [1–5]. Пространственную фильтрацию сигналов используют при защите радиолокационных средств от помех, действующих по боковым лепесткам ДНА. Поляризационную фильтрацию используют при воздействии активных шумовых помех, действующих в направлении главного луча ДНА. В качестве элемента адаптации пространственного или поляризационного фильтра используют различного вида автокомпенсаторы помех или ААР.

В результате исследований было установлено [2], что при совместном воздействии активной и пассивной (комбинированной) помехи пространственно-распределенный характер последней разрушает пространственную корреляцию точечных источников активной помехи. Это может привести к существенному ухудшению коэффициента подавления активной составляющей комбинированной помехи. Поэтому исследование влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс компенсации АШП является достаточно актуальным. Актуальными также являются вопросы формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора, порожденной только активной шумовой помехой.

Объектом исследования является процесс компенсации активной составляющей комбинированной помехи.

Предметом исследования является математическая модель, а также непосредственно поляризационный адаптивный фильтр в составе РЛС.

Цель данной работы состоит в выборе метода формирования классифицированной обучающей выборки, анализе переходных процессов при формировании весовых коэффициентов поляризационного фильтра и оценке его эффективности в условиях воздействия комбинированных помех.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для уменьшения влияния пассивной составляющей комбинированной помехи на процесс формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра необходимо тем или иным способом сформировать классификационную обучающую выборку, порожденную только активной шумовой помехой. Учитывая значительное превышение коэффициента усиления антенны в направлении главного луча диаграммы направленности по отношению к уровню боковых лепестков, можно считать, что наибольшее влияние пассивной помехи на процесс компенсации активной составляющей комбинированной помехи происходит при ее воздействии по главному лучу.

Кроме того, из [6] по приведенным энергетическим дальностно-азимутальным характеристикам пассивных

помех от подстилающей поверхности земли и гидрометеоров, действующих в нижних лучах диаграммы направленности следует, что их интенсивность относительно собственных шумов приемных устройств составляет 50–60 дБ. Причем пассивные помехи перекрывают всю развертку дальности, что ограничивает эффективность использования корреляционных отличий в структуре активных и пассивных помех при формировании классифицированной обучающей выборки.

Поэтому представлялось целесообразным провести дополнительный анализ переходных процессов в сигнальных цепях имитационной модели [7] поляризационного фильтра при формировании классификационной обучающей выборки [8] с использованием частотных отличий в структуре активных и пассивных помех [9]. Еще одна задача, которая решалась в процессе исследований заключалась в экспериментальной оценке эффективности компенсации активной составляющей комбинированной помехи при формировании обучающей выборки частотным методом в полигонных условиях.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Для формирования классифицированной обучающей выборки могут быть использованы различные отличия в структуре активных и пассивных помех. Это могут быть временные, спектральные, корреляционные или частотные отличия.

В [11] для формирования обучающей выборки используется временной интервал, расположенный в конце дальности действия РЛС, в предположении, что отраженные от гидрометеоров и подстилающей поверхности земли сигналы имеют гораздо меньшую интенсивность. Однако, анализ энергетических дальностно-азимутальных характеристик пассивных помех, приведенных в [6], дает основание считать, что такое решение не обеспечивает формирование классифицированной обучающей выборки в нижних лучах диаграммы направленности антенны. По-видимому это обусловлено увеличением импульсного объема при увеличении дальности.

В патенте [11], в котором обучающая выборка формируется после преобразования Фурье, используются спектральные отличия в структуре пассивных и активных помех. При этом для формирования весовых коэффициентов адаптивных фильтров (пространственных или поляризационных) используются фазовые каналы с номерами $N/2$, где N – количество точек преобразования Фурье. Это объясняется тем, что в фазовых фильтрах основного и компенсационного каналов с номерами $N/2$ вероятность нахождения пассивных помех наименьшая. Основным недостатком такого технического решения является дискретная адаптация весовых коэффициентов на межпачечных интервалах. Это, в условиях динамично меняющейся обстановки, что определяется перемещением источников активных помех или сканированием антенны, приводит к значительному ухудшению компенсации помех.

В [12] предложен корреляционный метод формирования классифицированной обучающей выборки. Метод основан на использовании естественной нестациона-

нажности пассивной помехи во времени (по дальности). Это характерно для сигналов, отраженных как от гидрометеоров, так и от облаков дипольных помех, имеющих локальный характер. Метод реализуется путем текущего анализа распределения модуля межканального нормированного коэффициента корреляции по дальности. Последующий выбор временного интервала с наибольшим значением модуля нормированного коэффициента корреляции соответствует отсутствию пассивной помехи и может обеспечить формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной активной шумовой помехой. Однако, анализ энергетических дальностно-азимутальных характеристик пассивных помех [6] дает основание считать, что в случае отражения сигналов от подстилающей поверхности земли и гидрометеоров, покрывающих большие территории (кучево-дождевые облака) качество формирования обучающей выборки может существенно ухудшиться.

Следует отметить, что частотный метод формирования классифицированной обучающей выборки лишен недостатков методов, рассмотренных выше, и может быть использован для формирования весовых коэффициентов адаптивных поляризационных фильтров, включая и нижние лучи диаграммы направленности антенны.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Математическая модель адаптивного поляризационного фильтра при поляризационно-временной обработке радиолокационных сигналов для исследования пере-

ходных процессов при воздействии комбинированных помех, разработана в соответствии с его упрощенной структурной схемой, представленной на рис. 1.

В структурную схему поляризационного фильтра 1 входят дуальнополяризованная антенна 2, основной 3 и компенсационный 4 каналы приема и автокомпенсатор активной шумовой помехи 5. В состав автокомпенсатора входят режекторные фильтры 6, устройство комплексного сопряжения 7, комплексный умножитель 8, формирователь весовых коэффициентов 9, сумматор 10 и умножитель 11. В состав поляризационно-временной обработки радиолокационных сигналов также входит устройство преобразования Фурье 12, обеспечивающее временную (спектральную) обработку сигналов.

В качестве алгоритма адаптации поляризационного фильтра использован классический алгоритм Уидроу [13], при котором весовые коэффициенты $\dot{W}$ формируются с использованием корреляционной обратной связи

$$\dot{W}_{k+1} = \dot{W}_k - 2\mu \dot{U}_k^* \dot{U}_\Sigma, \quad (1)$$

где $\dot{U}_k$ и $\dot{U}_\Sigma$ – комплексные значения амплитуд АШП на входе компенсационного канала и на выходе поляризационного фильтра, соответственно; μ – скалярная величина, определяющая глубину обратной связи. При этом комплексное значение амплитуды на выходе поляризационного фильтра определяется как разность между АШП, действующей на основном входе автокомпенсато-

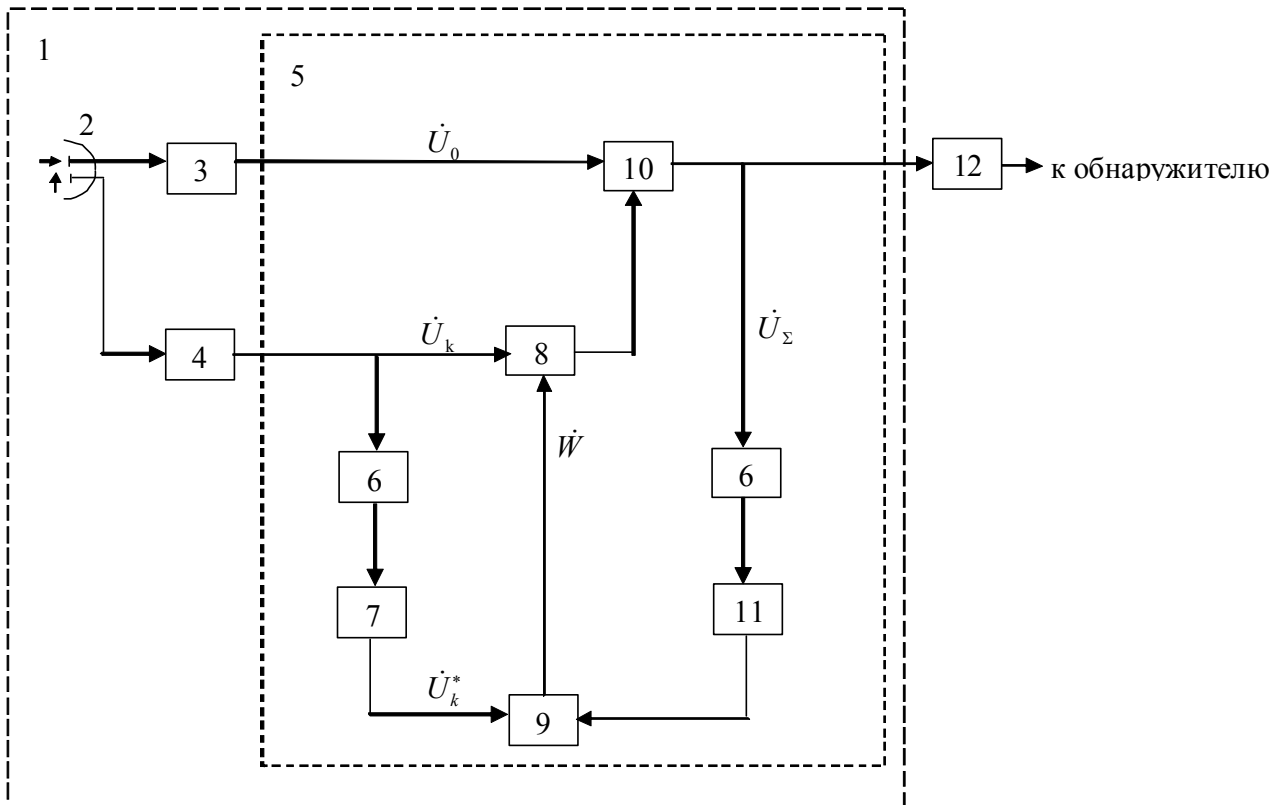


Рисунок 1 – Структурная схема поляризационно-временной обработки радиолокационных сигналов

ра 5, и взвешенным коэффициентом $\dot{W}$ значением помехи, действующей на входе компенсационного канала

$$\dot{U}_{\Sigma} = \dot{U}_0 - \dot{W}\dot{U}_k. \quad (2)$$

Математическая модель поляризационного фильтра является статистической, моделирующей АШП и независимые в каналах приема собственные шумы с нормальным законом распределения вероятностей. Пассивная помеха моделировалась случайным процессом с нормальным законом распределения с последующим ее ограничением по амплитуде и с различным соотношением дисперсий в каналах приема по отношению к активной помехе. Это позволило в дальнейшем определиться с характером влияния пассивной помехи на процесс формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В процессе моделирования исследовалось как влияет режекция пассивной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов поляризационного фильтра на качество подавления АШП, а также на процесс его адаптации. При этом отношение активная помеха/шум в ос-

новном канале равнялось 30 дБ, а в компенсационном – 33 дБ. Отношение пассивная помеха/шум в основном канале равнялось 33 дБ, а в компенсационном – 30 дБ.

Результаты моделирования адаптивного поляризационного фильтра с режекцией пассивной помехи (интервал 0–0,4 мс) и без режекции (интервал 0,5–0,9 мс) в цепях формирования весовых коэффициентов представлены на рис. 2.

На рис. 2а показана смесь активной (интервалы 0–0,4 и 0,5–0,9 мс) и пассивной (интервалы 0,1–0,2 и 0,6–0,7 мс) составляющих комбинированной помехи на входе основного канала автокомпенсатора. На рис. 2б представлен результат компенсации комбинированной помехи на выходе поляризационного фильтра с режекцией пассивной составляющей (интервал 0–0,4 мс) и без режекции (интервал 0,5–0,9 мс). На рис. 2в показан процесс формирования модуля весового коэффициента для обоих вариантов построения автокомпенсатора помех.

Анализ результатов моделирования на временных интервалах 0–0,4 и 0,5–0,9 мс (рис. 2б, в) дает основание считать, что режекция пассивной составляющей комбинированной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов обеспечивает эффективную компенсацию

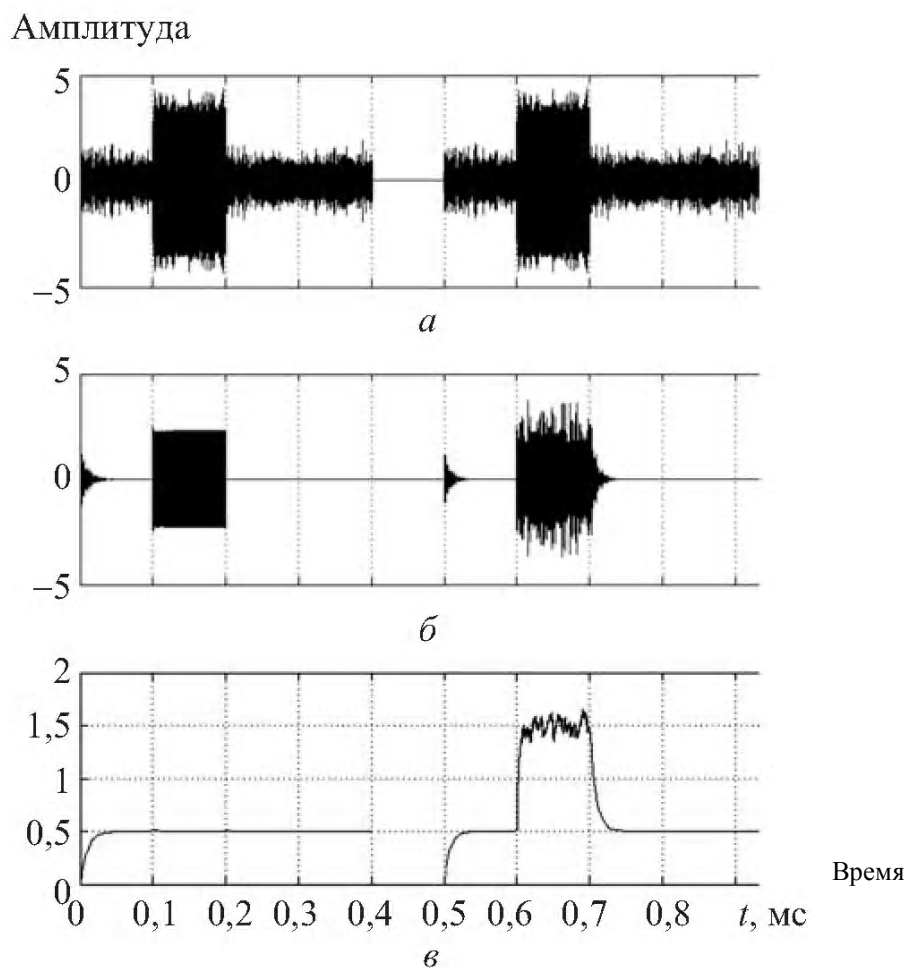


Рисунок 2 – Результаты моделирования поляризационного фильтра:
а – смесь активной и пассивной помехи на основном входе автокомпенсатора; б – на его выходе; в – процесс формирования модуля весового коэффициента

АШП при одновременном воздействии пассивной помехи. Действительно при режекции пассивной помехи, что реализуется на временном интервале 0–0,4 мс, модуль весового коэффициента после его формирования вначале интервала по АШП достигает значения 0,5 и остается неизменным до конца интервала. Значение модуля весового коэффициента, равное 0,5, соответствует превышению дисперсии АШП в компенсационном канале поляризационного фильтра относительно дисперсии помехи в основном канале, которое по условиям моделирования составляло 3 дБ. Сравнительный анализ процессов формирования весовых коэффициентов при различных вариантах построения автокомпенсатора (рис. 2в) показывает, что на интервале 0,6–0,7 мс (без режекции пассивной помехи) автокомпенсатор находится в режиме перенастраивания на подавление пассивной помехи. Это подтверждается существенным увеличением модуля весового коэффициента до полутора единиц, что объясняется превышением дисперсии пассивной помехи в основном канале поляризационного фильтра над соответствующим значением ее в компенсационном канале.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Представлялось целесообразным в процессе исследований:

- во первых, экспериментально подтвердить полученные результаты моделирования оценкой качества подавления АШП при режекции части энергетического спектра активной помехи, совпадающего со спектром пассивной помехи в цепи корреляционной обратной связи;
- во вторых, количественно оценить возможные потери в качестве компенсации АШП при использовании метода формирования классифицированной обучающей выборки по патенту [8] при смещении источника АШП с направления главного луча в область боковых лепестков ДНА. Это становится важным, когда по техническому заданию на проектирование РЛС необходимо

обеспечить защиту от АШП, действующей как по главному лучу, так и по боковым лепесткам.

Исследования проведены в полигонных условиях с использованием РЛС 36Д6М. Схема проведения эксперимента приведена на рис. 3. В дальней зоне устанавливался генератор помехи, содержащий генератор шума (ГШ), полосовой фильтр (ПФ), аттенуатор (АТ) и усилитель мощности (УМ), обеспечивающий необходимый уровень сигнала в приемных каналах. В качестве излучателя использовался рупор Р с ориентацией вектора Е электромагнитного поля, равного 45° относительно радиогоризонта. Излучатель устанавливался на вышке, что обеспечивало при изменении высоты излучателя произвести оценку коэффициента подавления АШП в 4-х угломестных лучах нижней зоны обзора РЛС 36Д6. На входах формирователей весовых коэффициентов автокомпенсатора в каждом угломестном канале были установлены режекторные фильтры с полосой режекции, равной ширине спектра пассивной помехи.

Измерения проводились в каждом угломестном канале при воздействии АШП как по боковым лепесткам, так и по главному лучу ДНА. В первом случае к компенсационному каналу приема подключалась слабонаправленная антенна защиты боковых лепестков с согласованной по отношению к основной антенне поляризации. Во втором случае – ортогональный по поляризации канал защиты главного луча. В результате проведенных измерений установлено, что при формировании классифицированной обучающей выборки по методу, изложенному в [8], усредненное по четырем угломестным каналам значение коэффициента подавления АШП составило 25 дБ в режиме защиты главного луча, в режиме защиты боковых лепестков – 14 дБ.

Уменьшение коэффициента подавления АШП в режиме защиты боковых лепестков ДНА обусловлено формированием весовых коэффициентов на частоте, отличающейся от частоты помехи в сигнальных цепях авто-

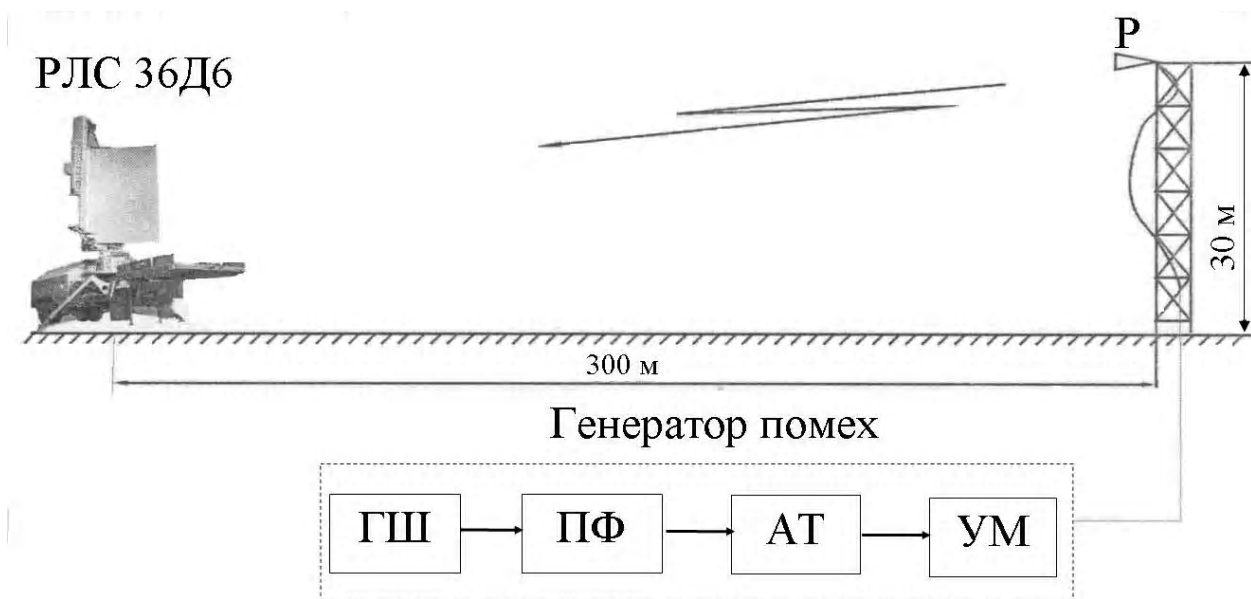


Рисунок 3 – Схема проведения эксперимента

компенсатора. В случае разнесенного приема, что характерно для защиты РЛС от АШП, действующей по боковым лепесткам это приводит к различию фазовых сдвигов в этих цепях на разных частотах. В [14] для устранения возникающих фазовых сдвигов предложено измерять возникающие фазовые сдвиги с последующей автоподстройкой измеренной разности фаз.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2б на интервале 0–0,4 мс представлен выходной сигнал поляризационного фильтра с режекцией пассивной помехи в цепях формирования весовых коэффициентов. В начале этого интервала виден переходной процесс, обусловленный адаптацией весовых коэффициентов. После этого АШП становится подавленной. Можно только предположить, что на интервале 0,1–0,2 мс, когда одновременно с АШП действует пассивная помеха, АШП подавляется. Однако подтверждением этого является отсутствие переходного процесса, обусловленного адаптацией весовых коэффициентов поляризационного фильтра после окончания воздействия пассивной помехи.

На интервале 0,5–0,9 мс, на котором режекция пассивной помехи не проводится, в начале интервала процесс адаптации весовых коэффициентов происходит аналогично. Однако на интервале 0,6–0,7 мс при одновременном воздействии пассивной помехи происходит ее искажение некомпенсированной активной помехой. После окончания воздействия пассивной помехи явно виден повторный процесс адаптации поляризационного фильтра для подавления некомпенсированной АШП. Это свидетельствует о эффективности предложенного метода и адекватности разработанной математической модели.

Полученное в результате проведенного эксперимента значение коэффициента подавления АШП, равное 25 дБ, является максимально возможным. При этом выигрыш в отношении сигнал/помеха реализуется при достаточно больших отличиях в структуре полезного сигнала и АШП. В случае когда таких отличий нет, то нет и выигрыша. Однако, даже в этом случае выигрыш в отношении сигнал/помеха можно обеспечить путем изменения поляризационного базиса, в котором функционирует РЛС.

ВЫВОДЫ

В статье исследован частотный метод формирования классификационной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов поляризационного фильтра в условиях одновременного воздействия активных шумовых и пассивных помех. В предложенном методе формирования обучающей выборки при классификации используются частотные отличия в ширине спектра активной и пассивной помехи.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые разработана математическая модель адаптивного поляризационного фильтра, обеспечивающая исследование переходных процессов при формировании классифицированной обучающей выборки. Путем анализа переходных процессов при формировании весовых коэффициентов установлено, что предложенный метод формирования обучающей выборки

может обеспечить эффективную компенсацию активной составляющей комбинированной помехи, действующей с направления главного луча диаграммы направленности антенны.

Практическая новизна полученных результатов заключается в том, что проведенные экспериментальные исследования поляризационного фильтра с использованием РЛС 36Дб в полигонных условиях подтвердили высокую эффективность подавления активных шумовых помех, действующих по главному лучу диаграммы направленности антенны. В результате проведенного эксперимента установлено, что усредненное значение коэффициента подавления АШП поляризационным фильтром составило 25дБ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Разработка и усовершенствование алгоритмов обработки сигналов в радиотехнических и телекоммуникационных системах». (номер госрегистрации 0117U000013T) при финансовой поддержке МОНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / Я. Д. Ширман, В. Н. Голиков, И. Н. Бусыгин и др. ; под общ. ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Сов. радио, 1970. – 560 с.
2. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / [А. К. Журавльов, В. А. Хлебников, А. П. Радимов и др.]. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
3. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки : введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. Ц. Миллер : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1986. – 448 с.
4. Patent 1 599 035 United Kingdom G01 S 7/36 13/52 Adaptive cancellation arrangement [electronic resource] /Jack Gordon McQueen; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, index at acceptance H4D 259 265 36X 40X, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>
5. Patent 3881177 United States of America G01 S 7/36 Frequency agile-baseband sidelobe canceller arrangement [electronic resource] / Len Joseph F, Rankin Peter M; filed 12 Mar. 1974; published 29 Apr. 1975, appl. № 450, 543, access mode: <http://www.google.com/patents/US3881177>
6. Леховицкий Д. И. СДЦ в импульсных РЛС: 1. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Том 10, № 4.
7. Пиза Д. М. Метод компенсации активной составляющей комбинированной помехи в когерентно-импульсной РЛС / Д. М. Пиза, Е. А. Звягинцев, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 23–29. DOI:10.20535/S0021347016060030
8. Пат. 91114 Україна, МПК G01S 7/36 Спосіб захисту радіолокаторів від комбінованих завад, діючих по головному променю діаграми спрямованості антени / Пиза Д. М., Сіренко А. С., Звягинцев С. О.; Запорізький національний технічний університет; заявл. 20.12.2013; опубл. 25.06.2014, Бюл. №12.
9. Перунов Ю. М. Зарубежные радиоэлектронные средства / Ю. М. Перунов, В. В. Мацукевич, А. А. Васильев ; под ред. Ю. М. Перунова. В 4-х книгах. Кн. 2: Системы радиоэлектронной борьбы. – М. : Радиотехника, 2010. – 352 с.

10. Адаптивные алгоритмы компенсации помех : учебно-методическое пособие / [Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов]. – Нижний Новгород : ННГУ им. И. И. Лобачевского, 2014. – 88 с.
 11. Пат. 48705 Україна, МПК G01 S 7/36 H04B 15/00. Спосіб компенсації активної складової комбінованої завади / Кононович В. Я., Кукольніцький А. П., Залевський О. П., Каспирович О. Г.; Майстер Ю. Л., Денека А. А.; Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра». – № u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. №6, 2010 р. – 4 с.
 12. Пат. 78120 Україна, МПК G01S 7/36 Спосіб захисту когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій від комбінованих завад / Піза Д. М., Сіренко А. С.; Запорізький національний технічний університет; заявл. 28.08.2012; опубл. 11.03.2013, Бюл. № 5.
 13. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
 14. Пат. 2444741 Рос. Федерация МПК G01S 7/36 Устройство компенсации активных помех / Анохин В. Д., Симохамед Ф., Анохин Е. В., Кильдюшевская В. Г.; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Военный авиационный инженерный университет» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации; заявл. 10.03.2009; опубл. 10.03.2012, Бюл. № 7. – 5 с.
- Статья поступила в редакцию 09.03.2017.
После доработки 21.05.2017.

Піза Д. М.¹, Семенов Д. С.², Мороз Г. В.³

¹Д-р техн. наук, професор кафедри радіотехніки, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

²Начальник відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», м. Запоріжжя, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО ПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО ФІЛЬТРА В УМОВАХ ОДНОЧАСНОГО ВПЛИВУ АКТИВНИХ І ПАСИВНИХ ЗАВАД

Актуальність. В умовах дії комбінованої завади просторово-розподілений характер пасивної складової руйнує просторову кореляцію точкових джерел активної завади. Це спричиняє суттєве погіршення коефіцієнта подавлення активної складової комбінованої завади. Тому актуальними є дослідження впливу пасивної завади на процес компенсації активної шумової завади, а також методи формування класифікаційної навчальної вибірки, породженої тільки активною завадою, для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра.

Ціль. Дослідження частотного методу формування класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра в умовах одночасної дії активних шумових та пасивних завад, які діють по головному променю та бокових пелюстках діаграми спрямованості антени.

Метод. В запропонованому методі при формуванні класифікаційної навчальної вибірки використовуються частотні відмінності в ширині спектра активної та пасивної завади.

Результати. Розроблена імітаційна модель адаптації поляризаційного фільтра. Шляхом аналізу процесів формування вагових коефіцієнтів встановлено, що запропонований метод може забезпечити ефективну компенсацію активної складової комбінованої завади. Проведені експериментальні дослідження поляризаційного фільтра в полігонних умовах підтвердили високу ефективність подавлення активних шумових завад, які діють по головному променю діаграми спрямованості антени.

Наукова новизна полягає в розробці нового методу та імітаційної моделі формування класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів поляризаційного фільтра.

Практична значимість визначається проведеними експериментальними дослідженнями в полігонних умовах з кількісними оцінками ефективності запропонованого методу. Показано, що при використанні частотних відмінностей в структурі активної і пасивної складової комбінованої завади коефіцієнт подавлення активної шумової завади, діючий з напрямку головного променя діаграми спрямованості антени, може досягати 25 децибел.

Ключові слова: адаптація, поляризаційний фільтр, моделювання, експеримент.

Piza D. M.¹, Semenov D. S.², Moroz G. V.³

¹Dr. Sc. the Sciences, Professor of the Department of Radio Engineering, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Head of the Department, State Enterprise “Scientific-Industrial Complex “Iskra”, Zaporizhzhya, Ukraine

³PhD student of the Department of Radio Engineering and Telecommunications, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ADAPTIVE POLARIZING FILTER UNDER THE SIMULTANEOUS ACTION OF ACTIVE AND PASSIVE NOISE

Context. The spatially-distributed nature of the passive component destroys the spatial correlation of point sources of active interference under the influence of combined interference. This leads to a significant degradation in the suppression coefficient of the active component of the combined interference. Therefore, it is relevant to research the influence of the passive component of the combined interference on the process of compensation of active noise interference, as well as the formation of a classified training sample generated with only active interference, to adapt the weighting coefficients of the polarization filter.

Objective is research of the frequency method that used for the formation of a classification training sample for the adaptation of the polarization filter's weighting coefficients under conditions of simultaneous acting of active noise and passive interference along the main beam of the antenna pattern.

Method. The proposed method uses the frequency differences in the width of the spectrum of active and passive interference for training sample forming.

Results. The simulation model of the adaptive polarization filter was developed. It was found with analyzing of the formation of weight coefficients that the proposed method can provide effective compensation of the active component of the combined interference. The conducted experimental researches of the polarization filter in the field conditions confirmed the high efficiency of suppression of active noise interference that acts along the main beam of the antenna pattern.

Scientific novelty is consist in the development of a new method and an imitation model for the formation of a classification training sample for the adaptation of the weight coefficients of a polarization filter.

Practical significance was determined by the conducted experimental researches in the field conditions with quantitative estimates of the effectiveness of the proposed method. It was shown that using of the frequency differences in the structure of the active and passive components of the combined noise, it is possible to achieve of the cancellation factor equal 25 decibels and more for the active noise that act in the direction of the main beam of antenna pattern.

Keywords: adaptation, a polarizing filter, clutter, jammer, training sample.

REFERENCES

1. Shirman Ya. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr. ; pod obshh. red. Ya. D. Shirmana Teoreticheskie osnovy radiolokacii: ucheb. posobie dlya vuzov. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
2. Zhuravl'ov A. K., Xlebnikov V. A., Radimov A. P. Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
3. Monzingo R. A., Miller T. C. : per. s angl. Adaptivnye antennnye reshetki : Vvedenie v teoriyu. Moscow, Radio i svyaz', 1986, 448 p.
4. Patent 1 599 035 United Kingdom G01 S 7/36 13/52 Adaptive cancellation arrangement [electronic resource]/Jack Gordon McQueen; filed 31 Mar. 1977; published 30 Sep. 1981, index at acceptance H4D 259 265 36X 40X, access mode: <http://www.directorypatent.com/GB/1599035-a.html>
5. Len Joseph F, Rankin Peter M Patent 3881177 United States of America G01 S 7/36 Frequency agile-baseband sidelobe canceller arrangement [electronic resource]; filed 12 Mer. 1974; published 29 Apr. 1975, appl. № 450, 543, access mode: <http://www.google.com/patents/US3881177>
6. Ryabuxa V. P., Rachkov D. S., Semenyaka A. V., Katyushin E. A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannykh pomex, *Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Radioelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
7. Zalevskij A. P., Piza D. M., Presnyak I. S., Sirenko A. S., Ocenka e'ffektivnosti prostranstvenno-vremennoj i vremya-prostranstvennoj fil'tracii signalov v kogerentno-impul'snykh RLS, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 2, pp. 39–44.
8. Piza D. M., Sirenko A. S., Zvyagincev E. O Pat. 91114 Ukraïna, MPK G01S 7/36 Sposib zaxistu radiolokatoriv vid kombinovanix zavud, diyuchix po golovnomu promenyu diagrami spryamovanosti anteni. Zaporiz'kij nacional'nij tekhnichnij universitet; zayavl. 20.12.2013; opubl. 25.06.2014, Byul. №12.
9. Perunov Yu. M., Macukevich V. V., Vasil'ev A. A. Pod red. Yu. M. Perunova. Zarubezhnye radioelektronnye sredstva V 4-x knigax. Kn.2: Sistemy radioelektronnoj bor'by. Moscow, Radiotekhnika, 2010, 352 p.
10. Ivlev D. N., Orlov I. Ya., Sorokina A. V., Fitasov E. S. Adaptivnye algoritmy kompensacii pomex : uchebno-metodicheskoe posobie. Nizhnij Novgorod, NNGU im. I. I. Lobachevskogo, 2014, 88 p.
11. Kononovich V. Ya., Kukul'nic'kij A. P., Zalevskij O. P., Kaspirovich O. G., Majster Yu. L., Deneka A. A.; Pat. 48705 Ukraïna, MPK G01 S 7/36 H04B 15/00. Sposib kompensacii aktivnoi skladovoi kombinovanoi zavadi ; Kazenne pidpriemstvo "Naukovo-virobnichij kompleks "Iskra". № u200911296; Zayavl. 2009.11.06; Opubl. 2010.03.25, Byul. №6, 2010 r., 4 p.
12. Piza D. M., Sirenko A. S. Pat. 78120 Ukraïna, MPK G01S 7/36 Sposib zaxistu kogerentno-impul'snix radiolokacijnix stancij vid kombinovanix zavud; Zaporiz'kij nacional'nij tekhnichnij universitet; zayavl. 28.08.2012; opubl. 11.03.2013, Byul. № 5.
13. Uidrou B., Stirnz S. Adaptivnaya obrabotka signalov : per. s angl. Moscow, Radio i svyaz', 1989, 440 p.
14. Anokhin V. D., Simokhamed F., Anokhin Ye. V., Kil'dyushevskaya V. G. Pat. 2444741 Ros. Federatsiya MPK G01S 7/36 Ustroystvo kompensatsii aktivnykh pomekh, zayavitel' i patentoobladatel', Federal'noye gosudarstvennoye obrazovatel'noye uchrezhdeniye vysshego professional'nogo obrazovaniya «Voyennyy aviatsionnyy inzhenernyy universitet». g. Voronezh Ministerstva oborony Rossiyskoy Federatsii; zayavl. 10.03.2009; opubl. 10.03.2012, Byul. № 7, 5 p.

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко М. Ф.³¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна,³Старший викладач кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОДІЇ БЕЗПОШУКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДУ СПЕКТРАЛЬНОГО КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ З ПОДВІЙНИМ КОРЕЛЯЦІЙНИМ ОБРОБЛЕННЯМ

Актуальність. На сьогодні пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки, великої апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання широкосмугових цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

Мета. Метою статті є оцінка сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Метод. В роботі виконано аналітичні дослідження сумарних часових витрат кореляційно-інтерферометричного алгоритмів пеленгування та експериментальні дослідження відносної часової ефективності.

Результати. Виконано аналітичну оцінку сумарних часових витрат, швидкодії та відносної часової ефективності безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність порівняно з відомим пошуковим цифровим спектральним кореляційно-інтерферометричним методом пеленгування.

Висновки. Порівняльний аналіз показав, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність, яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

Ключові слова: кореляційно-інтерферометричний метод, безпошукове радіопеленгування, швидкодія, часова ефективність.

НОМЕНКЛАТУРА

АР – антенна решітка;

ДРВ – джерело радіовипромінювання;

ЕМО – електромагнітна обстановка;

ШПФ – швидке перетворення Фур'є.

c – швидкість поширення електромагнітного випромінювання у вільному просторі;

d – величина антенної бази;

D_θ – робочий сектор пеленгування;

f_{IF} – значення циклічної проміжної частоти;

F_d – частота дискретизації;

h_θ – дискретність просторового кореляційного аналізу напрямку на ДРВ;

k_L, k_H – номери частотних складових спектра прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті, що відповідають його нижній $\omega_{IF.L}$ та верхній $\omega_{IF.H}$ граничним частотам, відповідно;

M – кількість сигналів у прийнятій суміші;

$n_1(t), n_2(t)$ – власний адитивний білий гаусів шум першого та другого радіоканалів;

$N_{\theta, \max}$ – максимальна кількість пеленгів, яку можна отримати за секунду;

N_S – кількість набраних часових відліків прийнятих сумішей радіовипромінювань;

$S(t)$ – прийнятий квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал;

$S_1(t), S_2(t)$ – сигнал, що приймається першою та другою антеною;

t – змінна часу;

T_a – час аналізу прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_P – сумарні часові витрати для оцінки одного пеленга;

T_{SA} – часові витрати спектрального аналізу на проміжній частоті прийнятих сумішей радіовипромінювань;

T_1 – тривалість однієї операції комплексного множення з накопичуванням;

T_C – витрати подвійного кореляційного оброблення спектрів;

T_V – сумарні часові витрати на обробку сигналів відомого пошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

$U_1(t), U_2(t)$ – прийнята адитивна суміш радіовипромінювань першою та другою антеною;

$U_1(\omega_{IF.k}), U_2(\omega_{IF.k})$ – амплітудні спектри прийнятих сумішей радіовипромінювань, отримані на проміжній частоті;

Δ – смуга пропускання радіоприймача пеленгатора;

$\Delta\omega$ – частотний перетворювальний зсув;

$\Delta\varphi_{\Delta k} = \Delta\varphi(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) - \Delta\varphi(\omega_{IF,k})$ – різницевий фазовий спектр другого добутку спектрів сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$;

$\hat{\theta}$ – оцінка напрямку на ДРВ;

θ – випадковий невідомий напрямок;

μ_T – відносна часова ефективність;

τ_S – апіорі невідома затримка радіосигналу, що є випадковою величиною;

$\hat{\tau}_D$ – оцінка затримки сигналу між двома антенами;

$\omega_{IF,L}$, $\omega_{IF,H}$ – нижня та верхня граничні частоти

прийнятого радіовипромінювання на проміжній частоті;

ω_{IF} – значення колової проміжної частоти.

ВСТУП

На сьогодні в автоматизованих системах радіомоніторингу пеленгування радіоелектронних засобів повинно здійснюватись в умовах складної електромагнітної обстановки (ЕМО), великої апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань, а також в умовах реального масштабу часу реалізації. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для вказаних умов є використання широкосмугових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів із застосуванням цифрового оброблення комплексних спектрів прийнятої суміші радіовипромінювань [1].

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апіорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об'єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізнявальну здатність [2].

Зазвичай кореляційно-інтерферометричне пеленгування реалізується пошуковим компенсаційним методом з пошуком такого значення компенсуючої затримки, яке забезпечує максимум взаємної кореляційної функції. Недоліком цього методу є великі часові або апаратні витрати та неможливість пеленгування джерел радіовипромінювань із розширеним спектром у реальному масштабі часу з високою точністю. Тому дослідження по підвищенню швидкодії кореляційно-інтерферометричного пеленгування при використанні одноканального корелятора при забезпеченні високої точності є актуальною задачею.

Таким чином, не вирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки швидкодіючих кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є дослідження швидкодії безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до не вирішеної раніше проблеми розробки і дослідження ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою статті є: оцінка сумарних часових витрат T_P , швидкодії $N_{\theta, \max}$ та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

- оцінка сумарних часових витрат для отримання одного пеленгу згідно досліджуваного та відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування;

- оцінка швидкодії пеленгування;

- відносної часової ефективності досліджуваного методу шляхом моделювання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень по аналізу та синтезу конфігурацій АР, а також впливу їх параметрів на завадостійкість та точність кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів представлені в великій кількості сучасних наукових праць.

В роботі [3] запропоновано кореляційний метод пеленгування, що має підвищену точність пеленгування. Метод базується на збільшенні крутизни взаємної кореляційної пеленгаційної характеристики. Однак швидкодія пеленгування та можливість роботи пеленгатора в реальному масштабі часу не досліджена.

У роботах [4, 5] досліджені пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються в цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] в результаті проведених досліджень безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням отримано аналітичні оцінки дисперсії похибки пеленгування для умов великого та малого відношення сигнал/шум на вході пеленгаційних каналів. Проведено імітаційне моделювання роботи пеленгатора та визначено його основні точнісні характеристики. Актуальним є подальше його дослідження з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування.

У роботах [7–9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Такі методи мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу недоліків, таких як великий час обробки сигналів, що в кілька разів більший ніж для пошукового кореляційно-інтерферометричного методу пеленгування; необхідність точної апіорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщення оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) входних відно-

шеннях сигнал/шум. В результаті часова ефективність застосування спектральних методів пеленгування, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодії/точність пеленгування, в системах радіомоніторингу недостатня. Це підтверджується відсутністю їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу [1, 2].

В роботах [10–12] досліджено застосування АР різної конфігурації для покращення ефективності пеленгування ДРВ. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі, можливість ефективного подавлення завад.

Таким чином, для використання в автоматизованих системах радіомоніторингу розробка та дослідження швидкодії і часової ефективності кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виконаємо аналіз швидкодії радіопеленгатора з мінімальними апаратними витратами, що працює згідно безпошукового цифрового методу спектрально-кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням [6].

Нехай в горизонтальній площині з випадкового невідомого напрямку θ приймається квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал $S(t)$ двома радіоканалами, що рознесені у просторі на величину d антенної бази і мають статистично незалежні власні шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ відповідно. Нехай $S_1(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_1(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_1(t)$ впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ першою антенною, а $S_2(t)$ – сигнал, що приймається в адитивній суміші $U_2(t)$ зі статистично незалежним білим гаусовим шумом $n_2(t)$ також впродовж часового інтервалу $t \in [0, T_a]$ другою антенною. Шуми $n_1(t)$ і $n_2(t)$ та сигнали $S_1(t)$ та $S_2(t)$ є обмеженими смугою Δ . Вихідні умови запишемо наступним чином:

$$\begin{aligned} U_1(t) &= S_1(t) + n_1(t); \\ U_2(t) &= S_2(t) + n_2(t); \\ S_2(t) &= S_1(t - \tau_S). \end{aligned} \quad (1)$$

Згідно досліджуваного методу пеленгування оцінка $\hat{\theta}$ здійснюється наступним чином:

$$\hat{\theta} = \arccos(c \cdot \hat{\tau}_D / d);$$

$$\hat{\tau}_D = (1/\Delta\omega) \cdot \arctg \left[\frac{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \sin[\Delta\varphi_{\Delta,k}]}{\sum_{k=k_L}^{k_H} U_1(\omega_{IF,k}) \cdot U_2(\omega_{IF,k}) \cdot U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot \cos[\Delta\varphi_{\Delta,k}]} \right]. \quad (2)$$

Для аналізу швидкодії радіопеленгатора оцінимо часові витрати на оброблення $U_1(t)$ та $U_2(t)$ в смузі Δ .

Особливістю алгоритму оброблення (2) прийнятих радіовипромінювань $U_1(t)$ та $U_2(t)$ є використання алгоритму ШПФ. Оскільки основною операцією, що виконується при такій реалізації кореляційно-інтерферометричного пеленгування є множення з накопичуванням [13], то тривалість пеленгування доцільно оцінювати через загальну кількість операцій множення з накопичуванням, що необхідно виконати для оцінки пеленга на ДРВ. Швидкодії пеленгування будемо оцінювати через максимальну кількість пеленгів $N_{\theta, \max}$, яку можна отримати за секунду при заданій тривалості процесу аналізу T_a .

Структурна схема досліджуваного пеленгатора зображена на рис. 1. Особливості роботи пеленгатора рис. 1 наступні. Для пеленгування в секторі $[0; 360]^\circ$ суміш радіовипромінювань приймається двома парами антен, що розташовані у просторі під прямим кутом. При використанні двоканального радіоприймача антени А2, А3 трихелементної АР попарно з опорною антеною А1 послідовно в часі комутуються до двоканального радіоприймача із спільним гетеродином. На проміжній частоті протягом часу аналізу T_a вихідні сигнали радіоприймача перетворюються в цифрову форму і записуються в пам'ять ЕОМ. Отримані масиви відліків, прийнятих сумішей радіовипромінювань, обробляються згідно рівняння (2), розробленого в [6] методу пеленгування.



Рисунок 1 – Структурна схема досліджуваного пеленгатора

Тривалість виконання ШПФ та кореляційного аналізу доцільно визначати через кількість операцій комплексного множення [13]. В результаті для оцінки одного пеленга сумарні часові витрати T_P складаються з витрат часового спектрального аналізу T_{SA} сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань, що виконується на проміжній частоті $\omega_{IF,k}$, витрат T_C подвійного кореляційного оброблення, що складається з першого перемноження комплексних спектрів: $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$, другого перемноження отриманого взаємного комплексного спектра $U_1(j\omega_{IF,k}) \cdot U_2(j\omega_{IF,k})$ на його зсуугу на $\Delta\omega$ за частотою копію $U_1(\omega_{IF,k} + \Delta\omega) \cdot U_2(\omega_{IF,k} + \Delta\omega)$:

$$T_P = T_{SA} + T_C. \quad (3)$$

Для мінімізації часових витрат часового спектрального аналізу його доцільно реалізувати на основі швидких алгоритмів, наприклад, алгоритму ШПФ [13]. В цьому випадку тривалість T_{SA} часового спектрального аналізу сумішей $U_1(t)$ та $U_2(t)$ радіовипромінювань дорівнює:

$$T_{SA} = 2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S \cdot T_1. \quad (4)$$

Часові витрати подвійного кореляційного оброблення:

$$T_C = (0,5 \cdot N_S + 0,5 \cdot N_S) \cdot T_1 = N_S \cdot T_1. \quad (5)$$

Таким чином, загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням рівнянь (3)–(5) дорівнюють:

$$T_P = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + N_S). \quad (6)$$

Швидкодія пеленгування $N_{\theta, \max}$ повинна визначатися за умови оброблення прийнятої суміші радіовипромінювань в реальному масштабі часу, тобто при $T_P < T_a$ наступним чином:

$$N_{\theta, \max} = M / T_a. \quad (7)$$

Для прикладу, для типових умов [1, 2] ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M=1$ в межах смуги Δ , та при заданій тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с забезпечується максимальна швидкодія $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1/10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Виконаємо дослідження відносної часової ефективності μ_T реалізації безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням порівняно з відомим цифровим кореляційним пошуковим методом пеленгування, що також використовує цифрові методи спектрального аналізу [4, 5].

Відмінністю відомих пошукових методів кореляційно-інтерферометричного пеленгування є знаходження кореляційної функції з кількістю кроків (D_θ / h_θ) перемно-

жування N_S спектральних відліків двох сигналів. З урахуванням цього сумарні часові витрати T_V на обробку сигналів відомого методу пеленгування дорівнюють:

$$T_V = T_1 \cdot (2 \cdot N_S \cdot \log_2 N_S + 0,5 N_S \cdot (D_\theta / h_\theta)). \quad (8)$$

Аналіз рівняння (8) показує, що часові витрати T_V суттєво залежать від h_θ . Цей фактор зумовлює велику тривалість оброблення та загальні часові витрати $T_V > T_a$ більші за тривалість аналізу радіовипромінювань, що робить неможливим пеленгування в реальному масштабі часу з високою точністю за умови застосування одноканальної системи оброблення даних, наприклад, сучасного сигнального процесора типу TMS320. Можливе також суттєве збільшення дискретності оцінки пеленгу h_θ , що погіршує точність пеленгування, або застосування багатопроцесорної схеми оброблення, що суттєво збільшує вартість пеленгатора.

Швидкодія пеленгування при $T_V > T_a$ буде визначатися згідно рівняння: $N_\theta = M / T_V < N_{\theta, \max}$.

В результаті відносна часова ефективність μ_T безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням з урахуванням (6) та (8) визначається згідно з рівнянням:

$$\mu_T = \frac{T_V}{T_P} = \frac{2 \cdot \log_2 N_S + 0,5 \cdot (D_\theta / h_\theta)}{2 \cdot \log_2 N_S + 1}. \quad (9)$$

Аналіз рівняння (9) показує, що оскільки $(D_\theta / h_\theta) \gg 2 \cdot \log_2 N_S$, то $\mu_T \gg 1$, що підтверджує високу ефективність досліджуваного методу пеленгування.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Проведемо з урахуванням рівняння (6) дослідження залежності загальних часових витрат T_P від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ для наступних типових початкових умов: значення проміжної частоти $f_{IF} = 10,7$ МГц; частота дискретизації F_d вибрана згідно теореми відліків: $F_d = 2 \cdot (f_{IF} + 0,5\Delta)$; тривалість процесу аналізу в кожному пеленгаційному радіоканалі $T_a = 10^{-3}$ с; кількість часових сигнальних відліків визначається згідно з рівнянням: $N_S = T_a \cdot F_d$; робочий сектор пеленгування $D_\theta = 360^\circ$; крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$.

Дослідження проведемо для умови, що цифрове оброблення сигналів буде виконуватись з використанням ноутбука середньої обчислювальної продуктивності, який, наприклад, має $T_1 = 0,1 \cdot 10^{-9}$ с при перемноженні 32-розрядних комплексних чисел, що гірше ніж для кращих сигнальних процесорів типу TMS320с6678 [13].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Отримані згідно рівнянь (6) та (8) залежності T_P та T_V від ширини смуги пропускання радіопеленгатора Δ [МГц] для досліджуваного та відомого методів пеленгування наведено на рис. 2. Також горизонтальною лінією показано тривалість T_a процесу аналізу.

Аналіз рис. 2 показує, що загальні часові витрати T_P на здійснення оброблення прийнятої суміші сигналів згідно алгоритму (2) менші за тривалість T_a процесу аналізу при $\Delta < 500$ МГц, а для відомого пошукового радіопеленгатора при $\Delta < 10$ МГц навіть при визначенні кореляційної функції з кроком $h_\theta = 0,6^\circ$. Великий крок оцінки напрямку $h_\theta = 0,6^\circ$ спричиняє додаткову методичну похибку пеленгування до $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$.

Таким чином, для пеленгування згідно безпошукового цифрового методу кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням в реальному масштабі часу може бути використаний радіоприймач з шириною смуги пропускання до 500 МГц та одноканальною системою оброблення даних, що дозволить здешевити комплекс радіомоніторинга шляхом використання ноутбука середньої обчислювальної продуктивності замість потужного багатоканального комплексу. Також у досліджуваного радіопеленгатора похибка дискретності $h_\theta / 2 = 0,3^\circ$ пеленгування відсутня внаслідок прямої оцінки затримки сигналу.

Проведемо дослідження залежності відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ пропускання радіоприймача пеленгатора при $D_\theta = 360^\circ$; $h_\theta = 0,1^\circ$; $T_a = 10^{-3}$ с. Отриману залежність, згідно з рівнянням (9), наведено на рис. 3.

Аналіз залежностей на рис. 3 показує, що відносна часова ефективність μ_T відповідного запропонованого пеленгатора обернено пропорційна ширині смуги Δ , та перевищує 100 разів при $\Delta < 100$ МГц.

Таким чином, виконані дослідження швидкодії показали, що досліджений безпошуковий пеленгатор забезпечує пеленгування усіх радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу, має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування. При цьому швидкодія пеленгування становить $N_{\theta, \max} = M / T_a = 1/10^{-3} = 10^3$ пеленгів за секунду.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримана оцінка сумарних часових витрат T_P та відносної часової ефективності μ_T безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням показала, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу. Досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

Отримані результати доцільно використовувати при реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують в складній динамічній ЕМО.

Дані дослідження є продовженням роботи по розробці безпошукових цифрових спектральних кореляційно-інтерферометричних методів пеленгування.

В подальшому необхідно провести оптимізацію конфігурації АР для використання досліджуваного методу пеленгування в широкому діапазоні робочих частот.

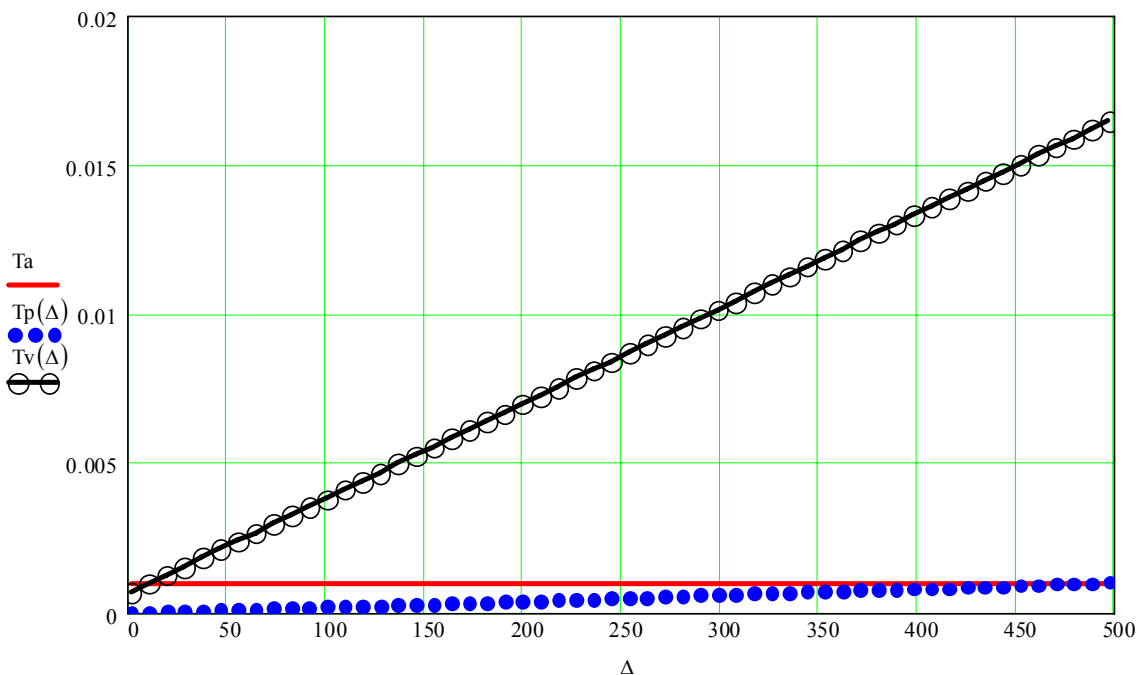


Рисунок 2 – Залежності загальних часових витрат T_P та T_V досліджуваного та відомого кореляційно-інтерферометричного пеленгатора від ширини Δ

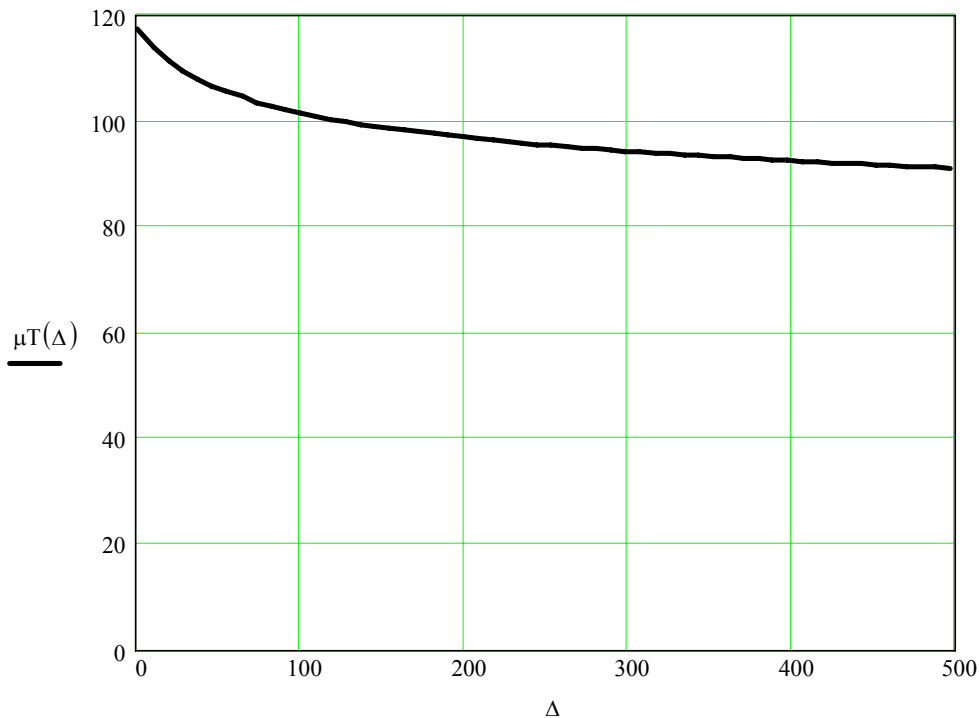


Рисунок 3 – Залежність відносної часової ефективності μ_T від ширини смуги Δ

ВИСНОВКИ

Виконано оцінку сумарних часових витрат T_P для отримання одного пеленга відомого пошукового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування та досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. За умов мінімальних апаратних витрат, тобто при використанні одноканальної системи обробки даних визначено, що досліджений безпошуковий метод пеленгування забезпечує пеленгування радіовипромінювань, що потрапляють в смугу частот одночасного аналізу з можливою шириною до 500 МГц в реальному масштабі часу.

Оцінено швидкодню пеленгування. Для типових умов ЕМО при пеленгуванні в реальному масштабі часу та при мінімальній кількості радіовипромінювань $M = 1$ в межах смуги Δ пропускання радіоканалів пеленгатора, тривалості процесу аналізу $T_a = 10^{-3}$ с, забезпечується максимальна швидкодня $N_{\theta, \max} = 10^3$ пеленгів за секунду.

Отримано аналітичну оцінку відносної часової ефективності μ_T досліджуваного безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного пеленгування з подвійним кореляційним обробленням. В результаті моделювання визначено, що досліджений метод пеленгування має високу відносну часову ефективність μ_T , яка в 100 разів перевищує відомий пошуковий цифровий спектральний кореляційно-інтерферометричний метод пеленгування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин ; под

- ред. А. М. Рембовского; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Слободянюк П. В. Довідник з радіомоніторингу / П. В. Слободянюк, В. Г. Благодарний, В. С. Ступак; під заг. ред. П. В. Слободянюка. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. – 588 с.: іл.
3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas / A. G. Sorochan // Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings. – Crimea, 2013. – P. 298–299.
4. Jung-Hoon L. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations / L. Jung-Hoon, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / [Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang] // Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings. – Mengqi Zhou, 2014. – P. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Ципоренко В. В. Дослідження безпошукового цифрового методу спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгування з подвійним кореляційним обробленням / В. В. Ципоренко // Всеукраїнський міжвідомчий науково-технічний збірник «Радіотехніка». – 2012. – № 170. – С. 172–179.
7. Kaluri V. R. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum / V. R. Kaluri, V. Shridhar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 4. – P. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements / [W. Chen, X. Xu, S. Wen, Z. Cao] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2011. – Vol. 5, № 8. – P. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference

- ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings. – Pisa : Marco Luise, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ASSP.2014.6855108
10. Jung-Hoon L. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System / L. Jung-Hoon, L. Jong-Hwan, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
11. Houcem G. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources / G. Houcem, P. D. Jean, M. J. Larsys Sergio // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation / [J. S. Matthew, D. C. Schmitz, D. M. Anderson, L. J. Douglas, T. B. Jennifer] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
13. Proakis J. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077 p.

Стаття надійшла до редакції 22.03.2017.
Після доробки 27.04.2017.

Ципоренко В. В.¹, Ципоренко В. Г.², Хоменко Н. Ф.³

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

³Старший преподаватель кафедры радиотехники, радиоэлектронных аппаратов и телекоммуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ БЕСПОИСКОВОГО ЦИФРОВОГО МЕТОДА СПЕКТРАЛЬНОГО КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ С ДВОЙНОЙ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Актуальность. На сегодня пеленгование радиоэлектронных средств должно осуществляться в условиях сложной электромагнитной обстановки, большой априорной неопределенности относительно параметров радиоизлучений, а также в условиях реального масштаба времени реализации. Перспективным направлением реализации пеленгования для указанных условий является использование широкополосных цифровых корреляционно-интерферометрических радиопеленгаторов.

Цель. Целью статьи является оценка суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспоискового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой.

Метод. В работе выполнены аналитические исследования суммарных временных затрат корреляционно-интерферометрических алгоритмов пеленгования и экспериментальные исследования относительной временной эффективности.

Результаты. Выполнено аналитическую оценку суммарных временных затрат, быстродействия и относительной временной эффективности беспоискового цифрового метода корреляционно-интерферометрического пеленгования с двойной корреляционной обработкой. При минимальных аппаратных затратах, то есть при использовании одноканальной системы обработки данных, определено, что исследованный беспоисковый метод пеленгования обеспечивает пеленгование радиоизлучений, попадающих в полосу частот одновременного анализа с возможной шириной до 500 МГц в реальном масштабе времени. Исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность по сравнению с известным поисковым цифровым спектральным корреляционно-интерферометрическим методом пеленгования.

Выводы. Сравнительный анализ показал, что исследованный метод пеленгования имеет высокую относительную временную эффективность, которая в 100 раз больше, чем у известного поискового цифрового спектрального корреляционно-интерферометрического метода пеленгования.

Ключевые слова: корреляционно-интерферометрический метод, беспоисковое радиопеленгование, быстродействие, временная эффективность.

Tsyporenko V. V.¹, Tsyporenko V. G.², Khomenko N. F.³

¹PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

²PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

³Senior lecturer of Department of Radio Engineering, Radioelectronic Devices and Telecommunication Systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

RESEARCH OF FAST-ACTION OF THE DIRECT DIGITAL METHOD OF SPECTRAL CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC DIRECTION FINDING WITH DOUBLE CORRELATION PROCESSING

Context. At present, the direction finding of radio electronic means should be carried out under conditions of a complex electromagnetic situation, a large a priori uncertainty regarding the parameters of radio emissions, and also in conditions of a real-time implementation. A promising direction in the direction finding implementation for these conditions is the use of broadband digital correlation-interferometric radio direction finders.

Objective. The aim of the article is to estimate the total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing.

Method. Analytic studies of total time costs of correlation-interferometric direction finding algorithms and experimental studies of relative time efficiency are performed in the work.

Results. Analytical estimation of total time costs, speed and relative time efficiency of the direct digital method of spectral correlative-interferometric direction finding with double correlation processing is performed. With minimal hardware costs, that is, using a single-channel data processing system, it is determined that the investigated direct direction finding method provides direction finding of radio emissions entering the frequency band of simultaneous analysis with a possible width of up to 500 MHz in real time. The investigated direction finding method has relative time efficiency in 100 times higher in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Conclusions. Comparative analysis has shown that the investigated direction finding method has a high relative time efficiency exceeding 100 times in comparison with the known search digital spectral correlation-interferometric method of direction finding.

Keywords: correlative-interferometric method; direct direction finding; fast-action; time efficiency.

REFERENCES

1. Rembovskiy A. M. Ashychmin A. V., Kozmin V. A. ; pod red. A. M. Rembovskogo.; 2-ye izd., pererab. i dop. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva. Moscow, Goriaczaya liniya, Telekom, 2010, 624 p.
2. Slobodyanuk P. V., Blagodarny V. G., Stupak V. S. ; Pid. zag. red. P. V. Slobodyanuka. Dovidnyk z radiomonitoringu. Nizhyn, TOV «Vydavnytstvo «Aspekt-Poligraf», 2008, 588 p.: il.
3. Sorochan A. G. Correlation direction finder with two OMNI-directional antennas, *Microwave and Telecommunication Technology : 23rd International Conference CriMiCo-2013, Sevastopol, 8–14 September, 2013 : proceedings.* Crimea, 2013, pp. 298–299.
4. Jung-Hoon L., Jong-Myung W. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2014, Vol. 14, pp. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Jian Y., Wangjie C., Lei L., Xiaokang N. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source, *Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings.* Mengqi Zhou, 2014, pp. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Tsyporenko V. V. Doslidzennua bezposhukovogo tsifrovogo metodu spektralnogo koreluatsijno-interferometrychnogo radiopelenguvannua z podvijnym koreluatsijnym obroblennum, *Vseukrainskiy mizhvidomchyj naukovo-tehnichnyj zbirnyk «Radiotekhnika»*, 2012, No. 170, pp. 172–179.
7. Kaluri V. R., Shridhar V. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Chen W., Xu X., Wen S., Cao Z. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements, *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2011, Vol. 5, No. 8, pp. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Xiao F., Sidiropoulos N. D., Wing-Kin M., Tranter J. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT, *Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings.* Pisa, Marco Luise, 2014, pp. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. Jung-Hoon L., Jong-Hwan L., Jong-Myung W. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, Vol. 15, pp. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
11. Houcem G., Jean P. D., Larsys Sergio M. J. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Matthew J. S., Schmitz D. C., Anderson D. M., Douglas L. J., Jennifer T. B. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 3, pp. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
13. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006, 1077 p.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 681.5.015

Братусь О. В.

Здобувач наукового ступеня кандидата технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З АДАПТИВНИМИ БЛОКАМИ ВІДНОВЛЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СОНЯЧНИХ РАДІОФЛЮКСІВ

Актуальність. Створення нових методів для відновлення та прогнозування сонячних даних, нових систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см є актуальними задачами, тому що це дасть можливість виконувати правильно та автоматизовано попередню обробку даних та подальше прогнозування.

Мета. Розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень та прогнозування часових рядів; створити інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів; створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см з використанням розроблених методів; застосувати розроблені методи для реальних даних та порівняти з традиційними методами.

Метод. Для досягнення поставленої мети використано такі методи: розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування; метод експоненційного згладжування; метод 13-місячного ковзного середнього; експоненційний підхід, запропонований Хетеуеєм, Уілсоном та Рейхманом.

Результати. Розроблено метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів та для прогнозування часових рядів. Створено інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості. Розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування сонячних даних. Виконано практичне застосування розроблених методів для реальних даних та порівняння з традиційними методами.

Висновки. Розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з усіма традиційними методами при відновленні пропущених значень, істинних закономірностей та прогнозуванні сонячних радіофлюксів.

Ключові слова: метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей часових рядів, система підтримки прийняття рішень, інтегральний критерій адекватності моделі, критерій близькості, сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см.

НОМЕНКЛАТУРА

БД – база даних;
ЕЗ – експоненційне згладжування;
ЕП – експоненційний підхід;
індекс F10.7 – місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см;
КДЕЗ – ковзне двобічне експоненційне згладжування;
СКБД – система керування базою даних;
ТКС – 13-місячне ковзне середнє;
 a – амплітуда циклу;
 b – час у місяцях від мінімуму до максимуму;
 c – асиметрія циклу;
 DW – статистика Дарбіна-Уотсона;
 $e(k)$ – похибка моделі у k -й момент часу;

$e(k-1)$ – похибка моделі у $(k-1)$ -й момент часу;
 $f(i)$ – функція, що описує фази росту і падіння сонячних даних в i -й момент часу, що вимірюється у місяцях, i_0 – початковий момент часу;
 $MAPE$ – середня відсоткова абсолютна похибка;
 N – кількість значень у вибірці даних;
 n – номер циклу;
 R^2 – коефіцієнт детермінації;
 $RMSE$ – середньоквадратична похибка;
 S_k – значення експоненційного середнього в k -й момент часу;
 S_{k-1} – значення експоненційного середнього в

$(k-1)$ -й момент часу;

S_k^* – значення експоненційного середнього у зворотному часі в k -й момент часу;

S_{k+1}^* – значення експоненційного середнього у зворотному часі в $(k+1)$ -й момент часу;

SFU – одиниця виміру сонячних радіофлюксів (Solar Flux Unit);

SSE – сума квадратів похибок моделі;

U – коефіцієнт Тейла;

$Var[y(k)]$ – фактична дисперсія основної змінної $y(k)$, обчислена на основі вибірки даних;

$\hat{Var}[y(k)]$ – дисперсія основної змінної $\hat{y}(k)$, оціненої за моделлю;

$y(k)$ – значення ряду в k -й момент часу;

$\hat{y}(k)$ – оцінка значення ряду, що отримана за певною математичною моделлю;

α – коефіцієнт згладжування;

ρ – коефіцієнт автокореляції для $e(k)$ та $e(k-1)$, тобто при зміщенні $S=1$.

ВСТУП

Існує особливий клас задач, які неможливо розв'язати за допомогою алгоритмів оптимальної фільтрації. До них відносяться, наприклад, задачі обробки даних про сонячну активність, задачі океанографічних досліджень. Ці задачі мають певні особливості, які дозволяють розглядати їх як задачі з уточнення минулих по відношенню до теперішнього часу параметрів. Такі задачі можуть вирішуватися методом згладжування. Актуальною задачею є відновлення істинних прихованих закономірностей динамічних процесів при обробці експериментальних даних, що описують сонячну активність, таких, як числа Вольфа та сонячні радіофлюкси при довжині хвилі 10,7 см. Складною задачею є побудова моделі за даними, що описують сонячну активність, оскільки фізичні процеси, що відбуваються на Сонці, є недостатньо вивченими та об'єм даних є обмеженим.

Дослідження стосовно створення нових методів для відновлення істинних закономірностей, відновлення пропущених значень та прогнозування даних про сонячну активність є актуальними задачами на сьогоднішній день, тому що це дасть можливість виконувати правильно попередню обробку даних та більш точно виконувати подальше прогнозування. Створення ефективних систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних також є актуальним, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Створення системи підтримки прийняття рішень для відновлення істинних закономірностей, пропущених значень та прогнозування сонячних радіофлюксів з використанням нових ефективних методів є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Мета роботи:

1) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень часових рядів;

2) запропонувати інтегральний критерій адекватності моделі та критерій близькості для застосування при відновленні істинних закономірностей розвитку часових рядів;

3) розробити метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів;

4) створити систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см, що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Застосувати усі розроблені методи у системі підтримки прийняття рішень;

5) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення пропущених значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом експоненційного згладжування;

6) застосувати розроблений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення істинних закономірностей сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з методом 13-місячного ковзного середнього;

7) застосувати створений метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см та порівняти з експоненційним підходом, запропонованим Хетеуєм, Уілсоном та Рейхманом.

Таким чином, реалізація наведених вище завдань дасть можливість виконувати ефективний аналіз та прогнозування сонячних радіофлюксів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідженням можливостей відновлення істинних закономірностей та прогнозування сонячних даних займалися різні групи науковців. У розглянутих роботах також можна прослідкувати розвиток наукової думки стосовно цього питання.

Хетеуей та інші у роботі [1] пропонують рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу. У більш пізній статті цих авторів [2] запропоновано метод розрахунку 13-місячного ковзного середнього для обробки даних про сонячну активність. На даний момент цей метод є широко розповсюдженим. Сальвадор у роботі [3] пропонує математичну модель для циклу чисел Вольфа з використанням припливно-обертальної теорії Ієна Вілсона. У статті [4] виконується дослідження похибок методу 13-місячного ковзного середнього та визначено умови, за яких застосування цього методу при аналізі сонячної активності викривляє значні особливості цього процесу.

Проблемою прогнозування сонячних даних також займалось багато науковців. Хетеуей та інші у роботі [1] показують, що запропоноване рівняння для опису моделі 11-річного сонячного циклу може бути застосованим для прогнозування. У роботі [2] зроблено докладний огляд багатьох існуючих методів прогнозування

сонячних даних, зокрема, всі методи прогнозування поділено на регресійні та методи, що базуються на аналізі попередніх даних. Ноблем та Вітландом у статті [5] запропоновано байєсівський підхід для прогнозування сонячних циклів з використанням рівняння Фокера-Планка. У роботі [3] показано, що запропоновану модель можна використати не тільки для опису закономірностей, але й для прогнозування чисел Вольфа.

У наведених роботах розглянуто багато методів для відновлення закономірностей та прогнозування сонячних даних. Проте також у цих роботах наведено певні критичні дослідження, що показують недоліки вже розроблених методів за певних умов. Тому задача розробки нових методів для відновлення закономірностей, пропущених даних та прогнозування сонячних даних є актуальною на сьогоднішній день. Також задача створення систем підтримки прийняття рішень для обробки сонячних даних є актуальною, оскільки це дасть можливість автоматизовано обробляти дані з використанням необхідних методів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі [6] запропоновано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування, що полягає у побудові цього методу на інтервалі 13, щоб працювати з даними у такому ж діапазоні, як і для 13-місячного ковзного середнього. Цей метод є розвитком та вдосконаленням квазіоптимальної процедури згладжування, наведеної у роботі [7].

Перша частина процедури ковзного двобічного тринадцятимісячного експоненційного згладжування полягає в отриманні оцінок за допомогою традиційного методу експоненційного згладжування [6]. При цьому початкове наближення обирається рівним першому значенню ряду з відповідного інтервалу на кожному ковзному тринадцятимісячному інтервалі. Ця процедура описується наступною формулою:

$$S_k = \alpha \cdot y(k) + (1 - \alpha) \cdot S_{k-1}, \quad (1)$$

де періоди часу $k = 1, \dots, 13, k = 2, \dots, 14, \dots, k = N - 12, \dots, N$ [6].

Для визначення оптимального значення параметра згладжування розглянемо такі статистичні характеристики, що використовуються для оцінювання якості побудованої моделі у цілому: R^2 , SSE , DW .

Характеристика R^2 обчислюється за такою формулою [8]:

$$R^2 = \frac{\text{Var}[y(k)]}{\text{Var}[\hat{y}(k)]}. \quad (2)$$

Характеристика DW обчислюється таким чином [8]:

$$DW = 2 - 2 \cdot \rho. \quad (3)$$

У формулі (3) значення ρ для $e(k)$ і $e(k-1)$ обчислюється таким чином [8]:

$$\rho = \frac{\sum_{k=2}^N e(k) \cdot e(k-1)}{\sum_{k=1}^N [e(k)]^2}.$$

Характеристика SSE обчислюється за такою формулою [8]:

$$SSE = \sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2. \quad (4)$$

У цій роботі запропоновано такий інтегральний критерій адекватності моделі:

$$I = |1 - R^2| + |2 - DW|. \quad (5)$$

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень SSE та інтегрального критерію I , що обчислюються, відповідно, за формулами (4) та (5).

Друга частина процедури ковзного двобічного експоненційного згладжування полягає у застосуванні до отриманих оцінок процедури згладжування у зворотному часі на кожному інтервалі $k = N - 1, \dots, N - 12, k = N - 2, \dots, N - 13, \dots, k = 12, \dots, 1$ [6].

Кожне уточнене значення S_k^* розраховується так [6]:

$$S_k^* = \alpha \cdot S_k + (1 - \alpha) \cdot S_{k+1}^*, \quad (6)$$

де значення $k = N - 1, \dots, N - 12, \dots, k = 12, \dots, 1$, початкові значення $S_N^* = S_N, \dots, S_{13}^* = S_{13}$.

Критерієм вибору оптимального значення параметра згладжування є мінімум значень SSE та інтегрального критерію I , що обчислюються за формулами (4) та (5), відповідно, але при цьому в якості вхідних значень при обчисленні цих характеристик використовуються значення S_k . При обчисленні уточненої оцінки S_k^* ваги оцінок S_k надходять на вхід алгоритму у зворотному часі.

Після цього в якості оцінки значення вибірки даних використовується отримане значення у середній точці з кожного інтервалу, тобто на інтервалі $k = 1, \dots, 13$ взято

значення S_7^* , на інтервалі $k = 2, \dots, 14$ взято значення S_8^* і т. д. Оцінки для перших шести та останніх шести значень вибірки даних взято як відповідні значення експоненційного середнього у зворотному часі на першому та останньому інтервалах оцінювання відповідно, тобто $S_1^*, \dots, S_6^*$ на інтервалі $k = 1, \dots, 13$ та $S_{N-5}^*, \dots, S_N^*$ на інтервалі $k = N - 12, \dots, N$.

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування запропоновано застосовувати для прогнозування значень часових рядів таким чином: необхідно використовувати повну описану процедуру і розрахунки проводяться за формулами (1) та (6), при цьому значення параметра згладжування використовується таке ж, як і для всіх відомих значень, в якості початкового значення використовується останнє відоме значення.

Відновлення пропущених значень часових рядів з отриманням максимально точних значень замість пропущених є важливим для виконання подальшої обробки ряду, наприклад, для прогнозування. У статті з викорис-

танням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень ряду.

Алгоритм №1

Якщо перед пропуском знаходиться від 1 до 7 значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться після пропущеного значення. Розглядається в якості граничного кількісного значення 7, тому що при застосуванні методу ковзного двобічного середнього на першому інтервалі обирається сьома оцінка. Після цього зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

Алгоритм №2

Якщо перед пропуском знаходиться більше семи значень ряду, то для знаходження параметра згладжування на кожному з етапів ковзного двобічного експоненційного згладжування за критерієм мінімізації значень, що описуються рівняннями (4) та (5), запропоновано брати значення ряду, що знаходяться перед пропущеним значенням. Потім зі значенням початкового наближення, рівним середньому арифметичному серед усіх відомих значень, та з використанням в якості відомого значення виміру останнього значення перед пропущеним значенням запропоновано застосовувати процедуру ковзного двобічного експоненційного згладжування, що описується рівняннями (1) та (6) відповідно.

Таким чином, метод ковзного двобічного експоненційного згладжування може бути ефективно застосованим для відновлення пропущених значень часових рядів.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9], що складається з чотирьох блоків: попереднього аналізу даних, відновлення закономірностей розвитку часових рядів, прогнозування часових рядів та графічного відображення отриманих результатів. Її архітектуру наведено на рис. 1.

Блок попереднього аналізу даних містить можливість завантаження даних з бази даних, з текстового файлу та безпосереднього введення даних. Також цей блок містить можливість запису отриманих результатів до бази даних та текстового файлу. У блоці попереднього аналізу даних реалізовані процедури відновлення пропущених даних за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5).

Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються такі статистичні характеристики: R^2 , SSE , DW за формулами (2), (3), (4) відповідно.

Метод 13-місячного ковзного середнього традиційно використовується для аналізу варіацій сонячної активності [2]. Проте цей метод може викривляти величини тривалості сонячного циклу, максимуму та мінімуму, що показано у роботі [2], оскільки він не відфільтровує високочастотні коливання з періодом менше одного року. За цим методом 13-місячне ковзне середнє з центром у k -ому місяці розраховується таким чином [2]:

$$\hat{y}(k) = \frac{1}{24} \sum_{i=-6}^5 y(k+i) + \frac{1}{24} \sum_{i=-5}^6 y(k+i). \quad (7)$$

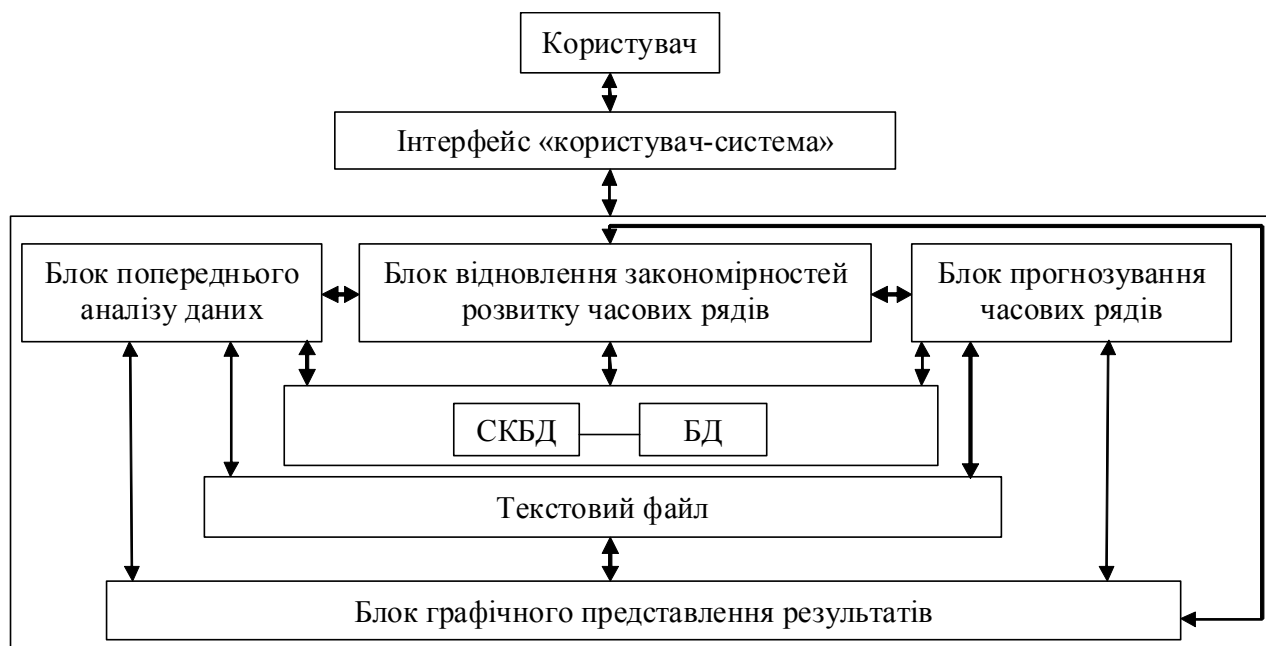


Рисунок 1 – Архітектура системи підтримки прийняття рішень

Блок відновлення закономірностей розвитку часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4)–(6) та моделі 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для перевірки ефективності побудованих моделей використовується критерій близькості. Критерій близькості полягає у мінімізації значення SSE , що обчислюється за формулою (4). У системі реалізовано процедуру вибору кращого методу відновлення закономірностей за значеннями цього критерію, результати можна записати до бази даних та до текстового файлу.

Блок прогнозування часових рядів містить можливість побудови моделі ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) з використанням останнього відомого значення ряду в якості початкового значення для прогнозування. Також цей блок містить можливість побудови моделі, запропонованої у роботі [1]:

$$f(i) = \frac{a \cdot (i - i_0)^3}{\exp((i - i_0)^2 / b^2) - c}, \quad (8)$$

$$b(a) = 27,12 + 25,15 / (a \cdot 10^3)^{1/4}, \quad (9)$$

$$a(n) = 9,2 \times 10^{-4} + 8,0 \times 10^{-5} n. \quad (10)$$

Обчислюються значення прогнозних характеристик для побудованих моделей: $RMSE$, $MAPE$ та U . Характеристика $RMSE$ обчислюється так [10]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}. \quad (11)$$

Значення $MAPE$ розраховується наступним чином [10]:

$$MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|y(i) - \hat{y}(i)|}{|y(i)|} \cdot 100\%. \quad (12)$$

Значення U обчислюється за наступною формулою [10]:

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i) - \hat{y}(i)]^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [y(i)]^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N [\hat{y}(i)]^2}}. \quad (13)$$

Отримані результати прогнозування можуть бути записані до БД або до текстового файлу.

Блок графічного представлення результатів містить форми для побудови графіків оцінок значень ряду, отриманих за моделями, та вхідних даних, які були завантажені з певного джерела або введені ручним способом. Цей блок дає можливість наочного представлення отриманих результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

Таким чином, розроблена система підтримки прийняття рішень надає можливість виконувати відновлення істинних закономірностей, пропущених значень часових рядів, прогнозування часових рядів та отримувати графічне представлення результатів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до березня 2016 року (39 значень) за даними офіційного сайту Центру прогнозування космічної погоди Національного управління океанічних і атмосферних досліджень США [9] виконується дослідження стосовно штучного створення пропусків та відновлення пропущених значень.

Відновлення пропущених значень індексу F10.7 виконується за допомогою таких методів: методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) за алгоритмами № 1 та № 2; методу експоненційного згладжування за формулами (1) та (4)–(5). Для оцінювання якості побудованих моделей у цілому при відновленні пропущених значень обчислюються статистичні характеристики за формулами (2), (3), (4).

Випадок № 1

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами $N = 7, 8, 9$ та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

Випадок № 2

У вибірці даних щодо індексу F10.7 зробимо штучний пропуск 3 значень з номерами $N = 30, 31, 32$ та виконаємо відновлення за двома описаними вище методами.

На основі цієї ж вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см відновлюються істинні значення ряду. До цих даних застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та метод 13-місячного ковзного середнього за формулою (7). Для порівняння отриманих результатів використано критерій близькості, що полягає у пошуку мінімуму для виразу (4).

На основі вибірки даних про місячні значення сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см в одиницях виміру SFU з січня 2013 року до грудня 2015 року (36 значень) [9] виконується прогнозування значень на наступні 3 місяці. Прогнозування виконується за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування за формулами (1), (4), (5), (6) та методу, що описується формулами (8)–(10).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У табл. 1 наведено статистичні характеристики, що показують якість побудованих моделей у цілому для випадку №1 при відновленні значень індексу F10.7, розраховані за формулами (2), (3), (4) на проміжку $N = 1, \dots, 39$ для моделей ЕЗ, КДЕЗ. У табл. 2 наведено статистичні характеристики моделей ЕЗ, КДЕЗ для випадку №2 при відновленні значень індексу F10.7.

На рис. 2 показано виміряні значення індексу F10.7 та результати, отримані за кожною з моделей при відновленні істинних значень ряду.

У табл. 3 наведено значення критерію близькості, що розраховується за формулою (4), для КДЕЗ, ТКС. У табл. 4 наведено прогнозні характеристики, розраховані за формулами (11), (12), (13) відповідно на проміжку $N = 37, \dots, 39$ для КДЕЗ та для ЕП, що описується формулами (8)–(10).

Таблиця 1 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
R^2	0,9477	0,9565
SSE	103,3539	100,1215
DW	1,3125	1,3372

Таблиця 2 – Статистичні характеристики моделей

Статистична характеристика	ЕЗ	КДЕЗ
R^2	0,9451	0,9975
SSE	274,1465	95,3291
DW	1,2370	1,9452

Таблиця 3 – Значення критеріїв близькості для моделей

Назва критерію	КДЕЗ	ТКС
SSE	2441,2	6115,3

Таблиця 4 – Значення прогнозних характеристик для моделей

Прогнозна характеристика	ЕП	КДЕЗ
$RMSE$	20,1355	18,1569
$MAPE$	8,8084	7,6241
U	0,0065	0,0051

6 ОБГОВОРЕННЯ

У статті виконано відновлення пропущених значень часових рядів, відновлення істинних закономірностей та прогнозування часових рядів. На кожному етапі відбувається порівняння з вже відомими методами, що застосовуються для сонячних даних.

За значеннями статистичних характеристик, наведених у табл. 1 та табл. 2, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно з методом експоненційного згладжування при відновленні пропущених значень індексу F10.7. Тому можна стверджувати, що запропонований метод є ефективним для відновлення пропущених значень часових рядів за різних початкових умов.

Дж. М. Херст у роботі [11] розглянув вплив ширини вікна на зміну характеристик точності ковзного середнього і показав, що ковзне середнє може значно викривити процес, знизити короткочасні коливання, у той час, як коливання, період яких значно перевищує ширину вікна, відновлюються майже без викривлень. На рис. 2 показано, що на часовому інтервалі [10, 25] для моделі, побудованої за методом 13-місячного ковзного середнього, відбувається суттєве викривлення процесу: на часових інтервалах [10, 15] та [20, 25] коливання обнуляються, на інтервалі [15, 20] відбувається обернення коливань індексу F10.7. У той же час, ковзне двобічне експоненційне

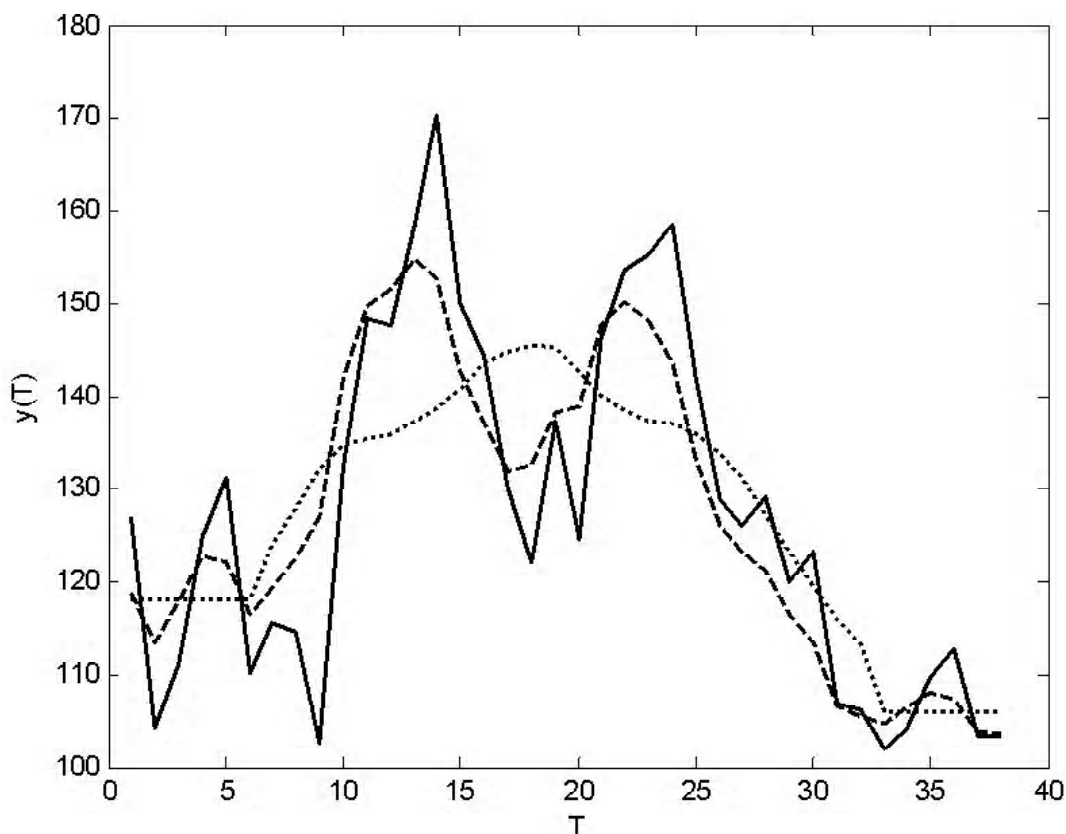


Рисунок 2 – Значення $y(i)$ та $y(i)$ для вибірки значень індексу F10.7: — виміряні значення $y(i)$; — — оцінки $y(i)$, отримані за методом ковзного двобічного експоненційного згладжування; ... — оцінки $y(i)$, отримані за методом 13-місячного ковзного середнього

згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей індексу F10.7.

Застосовуючи критерій близькості до значень, наведених у табл. 3, можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього при відновленні істинних закономірностей індексу F10.7.

За значеннями прогнозних характеристик у табл. 4 можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу порівняно із традиційним експоненційним підходом при прогнозуванні.

ВИСНОВКИ

У статті з використанням методу ковзного двобічного експоненційного згладжування розроблено два алгоритми для відновлення пропущених значень часового ряду за різних початкових умов. Ці алгоритми застосовано для відновлення значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом експоненційного згладжування. Отримані результати показують перевагу розробленого методу над методом експоненційного згладжування.

Запропоновано інтегральний критерій для оцінювання адекватності побудованих моделей при відновленні істинних закономірностей часових рядів. Створено критерій близькості для оцінювання ефективності відновлення істинних закономірностей часових рядів. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для відновлення істинних закономірностей значень індексу F10.7 та виконано порівняння з методом 13-місячного ковзного середнього. Показано, що ковзне двобічне експоненційне згладжування не викривляє коливання під час відновлення істинних закономірностей часового ряду. Застосовуючи критерій близькості до отриманих значень можна зробити висновок, що метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу у порівнянні з методом 13-місячного ковзного середнього.

Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування застосовано для прогнозування значень індексу F10.7 та виконано порівняння з традиційним експоненційним підходом. За значеннями прогнозних характеристик метод ковзного двобічного експоненційного згладжування показує перевагу при прогнозуванні.

У процесі виконання дослідження розроблено систему підтримки прийняття рішень для аналізу та прогнозування значень сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. У цій системі підтримки прийняття рішень застосовано розроблені алгоритми відновлення пропущених значень часових рядів за допомогою методу ковзного двобічного експоненційного згладжування, є можливість відновлення істинних закономірностей часових рядів за допомогою цього методу та застосовано метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для прогнозування часових рядів.

Таким чином, у роботі розроблено новий метод для аналізу та прогнозування сонячних радіофлюксів при довжині хвилі 10,7 см. Запропоновано систему підтримки прийняття рішень, в якій реалізовано створені методи

та яка дає можливість виконувати автоматизований аналіз і прогнозування сонячних даних.

Перспективами подальших досліджень є створення нових вдосконалених методів для аналізу та прогнозування сонячних даних, створення сучасних ефективних систем підтримки прийняття рішень для забезпечення ще більш швидкої та точної обробки часових рядів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано у межах зареєстрованої наукової тематики кафедри Математичних методів системного аналізу Навчально-наукового комплексу «Інститут прикладного системного аналізу» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», зокрема «Розробка методології системного аналізу, моделювання та оцінювання фінансових ризиків» (номер держреєстрації 0115U000356).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hathaway D. H. The shape of the sunspot cycle / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Solar Physics*. – 1994. – Vol. 151, No. 1. – P. 177-190. DOI: 10.1007/BF00654090.
2. Hathaway D. H. A synthesis of solar cycle prediction techniques / D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann // *Journal of Geophysical Research*. – 1999. – Vol. 104, No. A10. – P. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
3. Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr / R. J. Salvador // *Pattern recognition in physics*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 117–122. DOI:10.5194/prp-1-117-2013.
4. Киян М. А. Применения алгоритмов сглаживания для предварительной обработки статистических солнечных данных / М. А. Киян, Е. В. Фабричева, В. Н. Подладчиков // *Системні дослідження та інформаційні технології*. – 2014. – № 2. – С. 68–76.
5. Noble P. L. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation / P. L. Noble, M. S. Wheatland // *Solar Physics*. – 2012. – Vol. 276, No. 1. – P. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
6. Братусь О. В. Метод ковзного двобічного експоненційного згладжування для відновлення закономірностей динамічних процесів / О. В. Братусь, В. М. Подладчиков, Т. В. Подладчикова // *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2016: Одинадцята міжнародна науково-практична конференція, Жукин, 27 червня–1 липня 2016 р.: тези доповідей*. – Чернівці: ЧНТУ, 2016. – С. 28-31.
7. Pankratova N. D. Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes / N. D. Pankratova, T. V. Podladchikova, D. G. Strelkov // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2009. – Vol. 45, No. 6. – P. 916-923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
8. Tsay R. S. Analysis of Financial Time Series / R. S. Tsay. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 715 p.
9. Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource] – Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
10. Бідюк П. І. Проектування комп'ютерних інформаційних систем підтримки прийняття рішень / П. І. Бідюк, Л. О. Коршевнюк. – Київ : ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2010. – 340 с.
11. Hurst J. M. The Profit Magic of Stock Transaction Timing / J. M. Hurst. – Englewood Cliffs : Prentice-Hall, Inc., 1970 – 224 p.

Стаття надійшла до редакції 19.12.2016.

Після доробки 10.02.2017.

Братусь Е. В.

Соискатель научной степени кандидата технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ С АДАПТИВНЫМИ БЛОКАМИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ РАДИОФЛЮКСОВ

Актуальность. Создание новых методов для восстановления и прогнозирования солнечных данных, новых систем поддержки принятия решений для обработки солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см являются актуальными задачами, потому что это даст возможность выполнять правильно и автоматизировано предварительную обработку данных и дальнейшее прогнозирование.

Цель. Разработать метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений и прогнозирования временных рядов; создать интегральный критерий адекватности модели и критерий близости для применения при восстановлении истинных закономерностей развития временных рядов; создать систему поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных радиофлюксов при длине волны 10,7 см с использованием разработанных методов; применить разработанные методы для реальных данных и сравнить с традиционными методами.

Метод. Для достижения поставленной цели использованы такие методы: разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания; метод экспоненциального сглаживания; метод 13-месячного скользящего среднего; экспоненциальный подход, предложенный Хетеузем, Уилсоном и Рейхманом.

Результаты. Разработан метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания для восстановления пропущенных значений временных рядов и для прогнозирования временных рядов. Созданы интегральный критерий адекватности модели и критерий близости. Разработана система поддержки принятия решений для анализа и прогнозирования солнечных данных. Выполнено практическое применение разработанных методов для реальных данных и сравнение с традиционными методами.

Выводы. Разработанный метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания показывает преимущество в сравнении со всеми традиционными методами при восстановлении пропущенных значений, истинных закономерностей и прогнозировании солнечных радиофлюксов.

Ключевые слова: метод скользящего двустороннего экспоненциального сглаживания, восстановление пропущенных значений временных рядов, восстановление истинных закономерностей временных рядов, система поддержки принятия решений, интегральный критерий адекватности модели, критерий близости, солнечные радиофлюксы при длине волны 10,7 см.

Bratus O. V.

Applicant for PhD degree of technical sciences, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

DECISION MAKING SUPPORT SYSTEM WITH ADAPTIVE UNITS OF RESTORING AND FORECASTING OF SOLAR RADIO FLUXES

Context. Creation of new methods for solar data restoring and forecasting, new decision making support systems for processing of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm are topical problems, because it will give an opportunity to perform preliminary data processing and further forecasting correctly and automated.

Objective. To develop moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values and forecasting of time series; to create integral criterion of model adequacy and the proximity criterion for using for restoring of the true regularities of time series evolution; to develop decision making support system for analysis and forecasting of solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm with using of developed methods; to apply developed methods for real data and to compare with traditional methods.

Method. For achieving of formulated goal the following methods were used: developed moving two-sided exponential smoothing method; exponential smoothing method; 13-month running mean method; exponential approach, which was suggested by Hathaway, Wilson and Reichmann.

Results. Moving two-sided exponential smoothing method for restoring of missed values of time series and for forecasting of time series was developed. The integral criterion of model adequacy and the proximity criterion were created. Decision making support system for analysis and forecasting of solar data was developed. Practical application of developed methods for real data and comparison with traditional methods were performed.

Conclusions. Developed moving two-sided exponential smoothing method is shown superiority in comparison with all traditional methods in the restoring of missed values, true regularities and forecasting of solar radio fluxes.

Keywords: moving two-sided exponential smoothing method, restoring of missed time series values, restoring of the true regularities of time series, decision making support system, integral criterion of model adequacy, proximity criterion, solar radio fluxes at a wavelength of 10.7 cm.

REFERENCES

1. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. The shape of the sunspot cycle, *Solar Physics*, 1994, Vol. 151, No. 1, pp. 177–190. DOI: 10.1007/BF00654090.
2. Hathaway D. H., Wilson R. M., Reichmann E. J. A synthesis of solar cycle prediction techniques, *Journal of Geophysical Research*, 1999, Vol. 104, No. A10, pp. 22375–22388. DOI: 10.1029/1999JA900313.
3. Salvador R. J. A mathematical model of the sunspot cycle for the past 1000 yr, *Pattern recognition in physics*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 117–122. DOI: 10.5194/prp-1-117-2013.
4. Kiyani M. A., Fabrichева O. V., Podladchikov V. M. Primeneniya algoritmov sglazhivaniya dlja predvaritel'noj obrabotki statisticheskikh solnechnykh dannyh, *Systemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii*, No. 2, Kyiv, 2014, pp. 68–76 [in Russian].
5. Noble P. L., Wheatland M. S. A Bayesian Approach to Forecasting Solar Cycles Using a Fokker–Planck Equation, *Solar Physics*, 2012, Vol. 276, No. 1, pp. 363–381. DOI: 10.1007/s11207-011-9884-5.
6. Bratus O. V., Podladchikov V. M., Podladchikova T. V. Metod kovznogo dvobichnogo eksponencijnogo zgladzhuvannja dlja vidnovlennja zakonmironostej dynamichnyh procesiv, *Matematychni ta imitacijne modeljuvannja system. MODS 2016: Odynadcjata mizhnarodna naukovopraktychna konferencija: tezy dopovidej*. Chernihiv, Ukraine: CNUT, 2016, pp. 28–31 [in Ukrainian].
7. Pankratova N. D., Podladchikova T. V., Strelkov D. G., Quasioptimal smoothing as a tool for the analysis of complex semistructured dynamic processes, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2009, Vol. 45, No. 6, pp. 916–923. DOI: 10.1007/s10559-009-9176-3.
8. Tsay R. S. Analysis of Financial Time Series. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010, 715 p.
9. Official site of the Space Weather Prediction Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration of the USA [Electronic resource]. Available at: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/weekly/RecentIndices.txt>
10. Biduyk P. I., Korshevnyuk L. O. Proektuvannja komp'juternyh informacijnyh system pidtrymky pryjnattja rishen'. Kyiv, Ukraine: ESC "IASA" NTUU "KPI", 2010, 340 p. [in Ukrainian].
11. Hurst J. M. The Profit Magic of Stock Transaction Timing. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1970, 224 p.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО ДИФФЕРЕНЦИРОВАНИЯ ЗАШУМЛЕННЫХ ДАННЫХ С ВЫБРОСАМИ

Актуальность. Применение традиционных методов численного дифференцирования к зашумленным данным с выбросами приводит к значительным ошибкам. Объектом данного исследования является процесс численного дифференцирования таких данных.

Цель работы – разработка метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами, который позволяет получить гладкую аппроксимацию их первой производной и, соответственно, гладкую аппроксимацию самих данных.

Метод. Предложенный метод численного дифференцирования основан на решении задачи минимизации сглаживающего функционала, который построен на критерии минимума протяженности невязки решения и ограничении энергии первой производной решения. Критерий минимума протяженности задает основную часть функционала и обеспечивает его устойчивое поведение по отношению к аддитивному шуму и выбросам. Ограничение задает стабилизирующую часть функционала и обеспечивает гладкость решения задачи. Вклад указанных частей регулируется с помощью параметра регуляризации. Поскольку основная часть сглаживающего функционала не является выпуклой, то задача его минимизации является задачей нелинейного невыпуклого программирования. Для численного решения этой задачи используется метод сопряженных градиентов, в котором величина шага вдоль направления спуска определяется на множестве пробных шагов. Эти шаги минимизируют отдельные компоненты основной и стабилизирующей частей сглаживающего функционала, что позволяет переходить из одного локального минимума функционала в другой более глубокий локальный минимум.

Результаты. Моделирование задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами и обработка экспериментальных данных, которые представляли собой спектры фотолуминесценции при наличии в их составе узких линейчатых спектральных составляющих, подтвердили эффективность предложенного метода.

Выводы. Предложенный метод может быть использован для численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами. При этом он позволяет получить гладкую аппроксимацию первой производной исходных данных и гладкую аппроксимацию самих исходных данных. Данный метод можно обобщить на случай негладкого решения путем построения стабилизирующей части функционала на основе ограничения полной вариации решения.

Ключевые слова: численное дифференцирование, гладкая аппроксимация, критерий минимума протяженности.

НОМЕНКЛАТУРА

A – оператор (матрица) антидифференцирования;
D – оператор (матрица) дифференцирования;
E – функционал;
N – количество дискретных отсчетов;
 a_{jn} – элемент матрицы **A**;
 a_{kj}^T – элемент матрицы $\mathbf{A}^T$, которая получена транспонированием матрицы **A**;
e – вспомогательный вектор;
 e_j – элемент вектора **e**;
 d_{jn} – элемент матрицы **D**;
 $\text{grad}^{(t)}$ – вектор градиента на t -ой итерации;
 $h^{(t)}$ – шаг вдоль направления спуска на t -ой итерации;
 $\mathbf{p}^{(t)}$ – вектор направления спуска на t -ой итерации;
 q – свободный параметр, который отвечает за степень сглаживания значений;
 t – номер итерации;
u – вектор искомого решения;
 $\mathbf{u}^{(t)}$ – вектор решения на t -ой итерации;
 $\mathbf{u}'$ – вектор первой производной искомого решения;
 u_n – элемент вектора **u**;
 x – независимая переменная;
 $\hat{x}$ – точка нормировки функции $\psi^{(\alpha, \beta, q)}(x)$ на единицу;

y – вектор исходных зашумленных данных с выбросами;

α – свободный параметр, который отвечает за величину сглаживания значений;

β – свободный параметр, который отвечает за форму закона распределения

γ – параметр регуляризации;

Φ – одномерная целевая функция;

Ψ – неквадратичный функционал, который реализует понятие «протяженность»;

ψ – стоимостная функция для построения функционала Ψ ;

$\|\dots\|^2$ – квадрат евклидовой нормы;

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Операция дифференцирования является мощным математическим инструментом анализа данных. Она составляет основу многих современных методов спектроскопии [1], астрофизики [2], обработки изображений [3] и мониторинга движения объектов [4]. Поскольку операция дифференцирования является неустойчивой и, следовательно, напрямую не применимой на практике из-за наличия шума и дискретности данных, то были разработаны различные методы численного дифференцирования [5]. При этом одни из них (полиномиальная аппроксимация методом наименьших квадратов, регуляризация Тихонова, сглаживание сплайнами) предполагают гладкое решение [5], а другие (метод регуляриза-

ции на основе ограничения полной вариации решения) предполагают даже разрывное решение [6]. Однако указанные методы плохо работают в случае, когда исходные данные искажены не только шумом, но и выбросами [7]. Это проявляется в виде ошибочных осцилляций решения из-за расплывания выбросов и является следствием того, что функционал невязки решения формируется на основе квадратичной метрики в условиях равноправности вкладов зашумленных элементов данных и выбросов. Для устранения этого недостатка такое равноправие должно быть нарушено.

Целью данной работы является разработка метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами для получения гладкой аппроксимации их первой производной и, соответственно, гладкой аппроксимации самих данных. Предложенная постановка задачи заключается в минимизации сглаживающего функционала, который состоит из основной и стабилизирующей частей, а вклад этих частей регулируется с помощью параметра регуляризации. При этом основная часть функционала построена на базе критерия минимума протяженности [8]–[10], который применяется к невязке решения соответствующего интегрального уравнения Вольтерры и который обеспечивает уменьшение вклада выбросов. Стабилизирующая часть функционала построена на основе ограничения квадрата евклидовой нормы первой производной решения и обеспечивает получение гладкого решения задачи. Далее в работе приводится математическая постановка решаемой задачи как в общем, так и в развернутом виде, а также численный метод ее решения на основе метода сопряженных градиентов. В заключительной части работы приводятся результаты численного моделирования и обработки экспериментальных данных.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть функция $g(x)$ непрерывна в интервале $[a, b]$ и имеет производную

$$u(x) = g'(x) = \frac{dg(x)}{dx}; \quad x \in [a, b], \quad (1)$$

причем $g(a)$ задано. Тогда задачу определения производной (1) можно сформулировать как задачу решения линейного интегрального уравнения Вольтерры первого рода [5]

$$Au(x) = \int_a^x u(z) dz = \hat{g}(x); \quad x \in [a, b], \quad (2)$$

где $\hat{g}(x) = g(x) - g(a)$ [6]. Если $u(x)$ является непрерывной функцией, то $g(x)$ является гладкой функцией. Далее будем считать, что $u(x)$ также является гладкой функцией, полагая существование производной $u'(x)$.

Пусть гладкая функция $f(x)$ аппроксимирует функцию $g(x)$. Тогда, если $u(x)$ найдено, то $f(x)$ можно получить с помощью формулы: $f(x) = g(a) + \int_a^x u(z) dz$.

Пусть значения функции $g(x)$ в N дискретных точках $a \leq x_1 \leq \dots \leq x_N \leq b$ искажены значениями ξ_i адди-

тивного шума с выбросами, образуя числовой вектор исходных данных y с элементами

$$y_i = g(x_i) + \xi_i; \quad i = 1, \dots, N. \quad (3)$$

Тогда предлагаемая постановка задачи численного дифференцирования имеет следующий общий вид:

$$\arg \min_u \{ \Psi[Au - y] + \gamma \|u'\|^2 \}, \quad (4)$$

где $u' = Du$, а неквадратичный функционал Ψ реализует концепцию «протяженность» на основе стоимостной функции [10]

$$\psi^{(\alpha, \beta, q)}(x) = k^{(\alpha, \beta, q)} [(1 + |x|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]; \quad |x| < \infty, \quad (5)$$

где $\alpha > 0$; $-\infty < \beta \leq 1$; $0 < q < \infty$; $\beta < q$;

$$k^{(\alpha, \beta, q)} = 1 / [(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]; \quad \psi^{(\alpha, \beta, q)}(\hat{x}) = 1;$$

$\hat{x} \neq 0$. Для дискретного случая $\Psi[e] = \sum_{j=1}^N \psi^{(\alpha, \beta, q)}(e_j)$.

Подставляя это выражение вместе с (5) в (4) и задавая линейные операторы A и D с помощью соответствующих матриц, получим постановку задачи (4) в развернутом виде:

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ k^{(\alpha, \beta, q)} \sum_{j=1}^N [(1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n - y_j|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1] + \gamma \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn} u_n|^2 \right\}. \quad (6)$$

Подчеркнем, что для $0 < \beta \leq 1$ имеем $k^{(\alpha, \beta, q)} > 0$, а для $-\infty < \beta < 0$ имеем $k^{(\alpha, \beta, q)} < 0$. Однако для $\beta = 0$ запись задачи (6) и коэффициента $k^{(\alpha, \beta, q)}$ преобразуется в запись на основе логарифмов [10]. Поэтому для практического использования задачу (6) следует переписать в виде двух задач оптимизации. Так, отбрасывая несущественные коэффициенты, для случая $\beta \neq 0$ из (6) имеем задачу

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ \text{sgn}(\beta) \sum_{j=1}^N [(1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n - y_j|^q / \alpha^q)^{\beta/q}] + \gamma_1 \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn} u_n|^2 \right\}, \quad (7)$$

где $\gamma_1 = \gamma [(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]$ и где $\text{sgn}(\beta) = 1$ для $0 < \beta \leq 1$ и $\text{sgn}(\beta) = -1$ для $-\infty < \beta < 0$. Для случая $\beta = 0$ из (6) путем предельного перехода по $\beta \rightarrow 0$ получаем задачу

$$\arg \min_{u_1, \dots, u_N} \left\{ \sum_{j=1}^N \ln [1 + |\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n - y_j|^q / \alpha^q] + \gamma_2 \sum_{j=1}^N |\sum_{n=1}^N d_{jn} u_n|^2 \right\}, \quad (8)$$

где $\gamma_2 = \gamma \ln(1 + |\hat{x}|^q / \alpha^q)$. Таким образом, (7) и (8) есть частные случаи (6).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Основу численного дифференцирования составляют методы аппроксимации [5]. Так, если в окрестности точки x функция $g(x)$ приближается некоторой другой функцией $f(x)$, для которой производная $f'(x)$ в точке x легко вычисляется, то полагают $g'(x) \approx f'(x)$. Наиболее просто такое приближение реализуется с помощью полиномиальной интерполяции. Однако при малой величине шага соответствующие формулы численного дифференцирования становятся плохо обусловленными и при наличии шума в исходных данных приводят к некорректным результатам [5]. Хотя выбор оптимального значения шага решает проблему устойчивости этих вычислений [4], однако при этом остаются следующие недостатки: 1) значения исходной функции могут быть не доступны для всех желаемых значений шага; 2) реализуется кусочно-полиномиальная интерполяция, которая не обеспечивает гладкость решения в точках стыковки полиномов.

Современными методами численного дифференцирования зашумленных данных являются [5]: 1) полиномиальная аппроксимация на базе метода наименьших квадратов; 2) регуляризация Тихонова; 3) сглаживание сплайнами; 4) свертка со сглаживающим ядром Фридриха (Friedrichs mollifier); 5) вариационный метод Ноулеса и Уоллеса (Knowles and Wallace); 6) регуляризация на основе ограничения полной вариации решения (total variation regularization). Сравнение первых пяти методов показало преимущество метода регуляризации Тихонова, который заключается в минимизации выпуклого функционала [5]

$$E(\mathbf{u}) = \|\mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}\|^2 + \gamma \|\mathbf{D}_k \mathbf{u}\|^2, \quad (9)$$

с дифференциальным оператором $\mathbf{D}_k$ порядка k [5]. Важным является то, что задача (9) имеет аналитическое решение [5]

$$\mathbf{u} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \gamma \mathbf{D}_k^T \mathbf{D}_k)^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y}. \quad (10)$$

Метод регуляризации на основе ограничения полной вариации решения предназначен для случаев, когда искомая производная имеет разрывы. Данный метод заключается в минимизации функционала [5]

$$E(\mathbf{u}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}\|^2 + \gamma \sum_{j=1}^{n-1} \sqrt{(u_{j+1} - u_j)^2 + \varepsilon}, \quad (11)$$

в котором малая положительная величина ε необходима для дифференцируемости (11) при $\mathbf{u}' = 0$ [6]. Задача (11) также сформулирована в [2], где указано, что путем изменения ε стабилизирующая часть функционала (11) меняется от L_1 -нормы производной решения $\mathbf{u}'$, что заставляет решение $\mathbf{u}$, быть кусочно-постоянным, до L_2 -нормы $\mathbf{u}'$, что заставляет $\mathbf{u}$ быть гладким. С геометрической точки зрения, стабилизирующая часть функционала (11) задает длину кривой, которая описывает график функции $u(x)/\sqrt{\varepsilon}$. Минимизация длины этой кривой приводит к ее спрямлению и уменьшает осцилляции в решении.

Однако методы, которые основаны на решении задачи (2) в рамках квадратичных метрик, дают плохие результаты для случая, когда исходные данные искажены выбросами. Это обусловлено распылением выбросов из-за их сглаживания, причем чем больше количество выбросов и чем больше их амплитуды, тем хуже результат численного дифференцирования. Для подавления выбросов обычно применяют метод медианной фильтрации [4]. Однако более эффективными методами обработки зашумленных данных с выбросами являются методы «мириадной» [11] и «меридианной» [12] фильтрации. Эти методы разработаны для фильтрации шумов импульсного типа с «тяжелыми» хвостами их закона распределения, а именно шума с законом распределения Коши и шума с «меридианным» законом распределения. В [10] дано обобщение этих методов и предложен общий подход к построению методов фильтрации, который основан на требовании минимизировать временную протяженность (длительность) получаемого решения. Эффективность этого подхода достигается путем настройки его трех свободных параметров, которые связаны с масштабом (дисперсией) шума, величиной «тяжести» хвостов и формой закона распределения. При этом возможна настройка как на обычный шум с законом распределения Гаусса или Лапласа, так и на шум импульсного типа с законом обобщенного распределения Коши, а также на комбинацию этих шумов. Данный подход является основой предлагаемого метода численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Далее рассмотрим только задачу (8) по следующим причинам: 1) простота записи из-за отсутствия свободного параметра β ; 2) рассмотрение задачи (7) выполняется аналогично.

В общем случае задача (8) имеет только численное решение. Чтобы получить его, используем метод сопряженных градиентов, который задан с помощью следующей вычислительной схемы:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^{(t+1)} &= \mathbf{u}^{(t)} + h^{(t)} \mathbf{p}^{(t)}, \quad t \geq 0; \\ \mathbf{p}^{(0)} &= -\mathbf{grad}^{(0)}; \quad t = 0; \\ \mathbf{p}^{(t)} &= -\mathbf{grad}^{(t)} + b^{(t-1)} \mathbf{p}^{(t-1)}; \quad t \geq 1; \\ b^{(t-1)} &= \|\mathbf{grad}^{(t)}\|^2 / \|\mathbf{grad}^{(t-1)}\|^2; \\ h^{(t)} &= \arg \min_{h \geq 0} \Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)}). \end{aligned} \quad (12)$$

В (12) одномерная целевая функция $\Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)})$ зависит от h и получается подстановкой элементов вектора $\mathbf{u}^{(t)} + h \mathbf{p}^{(t)}$ в выражение, записанное в фигурных скобках задачи (8). Далее рассмотрим вопросы построения вектора градиента и минимизации одномерной целевой функции для случая $q = 2$, который обеспечивает оптимальную (в смысле критерия максимального правдоподобия) обработку данных, искаженных шумом Коши [10].

Из необходимого условия минимума (8) для случая $q = 2$ получаем систему из N нелинейных уравнений

$$\sum_{j=1}^N a_{kj}^T \frac{v_j}{v_j^2 + \alpha^2} + \gamma_2 \sum_{n=1}^N \hat{d}_{kn} u_n = 0; \quad k = 1, \dots, N, \quad (13)$$

где $v_j = (\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n - y_j)$ задает элемент вектора невязки

$$\mathbf{v} = \mathbf{A}\mathbf{u} - \mathbf{y}, \quad \hat{d}_{kj} = \sum_{n=1}^N d_{kn}^T d_{nj}$$
 задает элемент матрицы

$\mathbf{D}^T \mathbf{D}$. Левая часть (13) представляет собой k -ый элемент вектора градиента.

Решение одномерной задачи:

$$h^{(t)} = \arg \min_h \Phi(\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)})$$
 заключается в выборе вели-

чины шага h вдоль направления спуска $\mathbf{p}^{(t)}$. Так как Φ не является унимодальной функцией, то для решения этой задачи используем метод оптимального пассивного поиска на множестве «пробных шагов». Это множество включает шаги с такими условными названиями: «шаги, которые обнуляют компоненты невязки решения», «шаги, которые обнуляют компоненты стабилизирующей части функционала» и «шаг по методу Ньютона».

Шаги, которые обнуляют компоненты невязки решения, определяются формулой

$$h_j^{[1]} = -(\sum_{n=1}^N a_{jn} u_n^{(t)} - y_j) / (\sum_{n=1}^N a_{jn} p_n^{(t)}); \quad j = 1, \dots, N, \quad (14)$$

т.е. на каждой итерации существует N таких шагов.

Шаги, которые обнуляют компоненты стабилизирующей части функционала, получаются из условия равенства нулю этих компонент. Рассматривая стабилизирующую часть функционала в (8) как скалярное произведение: $\|\mathbf{u}'\|^2 = (\mathbf{D}\mathbf{u}, \mathbf{D}\mathbf{u}) = (\mathbf{D}^T \mathbf{D}\mathbf{u}, \mathbf{u})$, из условия равенства нулю каждой из компонент скалярного произведения $(\mathbf{D}^T \mathbf{D}(\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)}), (\mathbf{u}^{(t)} + h\mathbf{p}^{(t)}))$ получаем два набора из N шагов:

$$h_n^{[2]} = -u_n^{(t)} / p_n^{(t)}; \quad n = 1, \dots, N, \quad (15)$$

$$h_n^{[3]} = -\sum_{j=1}^N \hat{d}_{nj} u_j^{(t)} / \sum_{j=1}^N \hat{d}_{nj} p_j^{(t)}; \quad n = 1, \dots, N. \quad (16)$$

Шаг, который отвечает методу Ньютона, используется при условии, что решение находится в окрестности некоторого локального минимума. Этот шаг задается формулой

$$h^{[4]} = -(\mathbf{g}^{(t)}, \mathbf{p}^{(t)}) / ([\mathbf{A}^T \mathbf{Q} \mathbf{A} + \gamma_2 \mathbf{D}^T \mathbf{D}] \mathbf{p}^{(t)}, \mathbf{p}^{(t)}), \quad (17)$$

где $\mathbf{Q} = \text{diag} \left(\dots, \frac{(\alpha^2 - [v_j^{(t)}]^2)}{(\alpha^2 + [v_j^{(t)}]^2)^2}, \dots \right)$ есть $N \times N$ диаго-

нальная матрица, зависящая от α^2 и от вектора невязки

$\mathbf{v}^{(t)}$ на t -ой итерации. Всего существует один такой шаг на t -ой итерации.

Пробные шаги не являются оптимальными, но они являются квазиоптимальными, так как приводят к уменьшению значения функции Φ . Алгоритм поиска на множестве пробных шагов следующий. Сначала по формулам (14)–(17) генерируются значения пробных шагов.

Затем в качестве $h^{(t)}$ выбирается тот шаг, для которого

Φ принимает наименьшее значение. Но если шаг $h^{[4]}$, который отвечает методу Ньютона, оказывается наилучшим N раз подряд, то выполняется обновление направ-

ления спуска по формуле: $\mathbf{p}^{(t)} = -\mathbf{grad}^{(t)}$. Если число выполненных итераций равно N , то также выполняется обновление направление спуска. Если ни один из пробных шагов не приводит к уменьшению значения Φ , то $h^{(t)}$ полагается равным нулю и выполняется обновление направление спуска. Если $h^{(t)}$ равно нулю дважды подряд, то итерационный процесс метода сопряженных градиентов завершается.

Матрицы $\mathbf{A}$ и $\mathbf{D}$ имеют следующее строение:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \dots \\ 1 & 1 & 0 & 0 \dots \\ 1 & 1 & 1 & 0 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}.$$

Матрица $\mathbf{A}$ имеет размер $N \times N$, а матрица $\mathbf{D}$ имеет размер $N \times (N-1)$. Матрицы $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ и $\mathbf{D}^T \mathbf{D}$ имеют размер $N \times N$. Когда решение $\mathbf{u}$ получено, то возможно

построить вектор $\mathbf{f}$ с элементами $f_i = g(a) + \sum_{k=1}^i u_k$, ко-

торый аппроксимирует вектор исходных данных $\mathbf{y}$.

Решение задачи численного дифференцирования чувствительно к выбору значения $g(a)$. Если $g(a)$ априорно не задано, то часто полагают $g(a) = y_1$ [6]. Однако такой выбор даст плохой результат для случая, когда первый отсчет y_1 содержит выброс. Для устранения этого недостатка можно решить задачу в «обратном направлении» следования дискретных отсчетов y_i , предполагая отсутствие выброса в последнем отсчете y_N . Тогда в полученном решении $\mathbf{u}$ потребуется обратить направление следования элементов и умножить их на -1 . Но если выбросы есть и в первом, и в последнем отсчетах, то следует сделать два подобных прохода. При этом сначала задача решается в «обратном направлении». В результате выброс в y_N будет размыт, но выброс в y_1 будет подавлен. Далее получаем вектор $\mathbf{f}$ (его элементы будут следовать в «обратном направлении»), полагаем $y_1 = f_N$ и решаем задачу в «прямом направлении». Такой алгоритм условно назовем двухпроходовым алгоритмом.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для демонстрации возможностей предложенного метода были выполнены моделирование задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами и обработка экспериментальных данных со спектрами фотолюминесценции (ФЛ). Важная цель моделирования состояла в том, чтобы имитировать шумовую обстановку, характерную для измерений спектра ФЛ, и настроить параметры метода на нее. При этом параметры $\beta = 0$ и $q = 2$ были фиксированы, а настройке подлежали только параметры α и γ_2 .

Спектр ФЛ моделировался в диапазоне длин волн 380–720 нм с шагом $\Delta\lambda = 0,5$ нм, что отвечало $N = 681$ дискретным отсчетам $x_i = i \cdot \Delta\lambda$; $i = 1, \dots, N$, причем $a = x_1$ и $b = x_N$. Модель спектра задавалась суммой пяти гауссовых функций с параметрами: $A_1 = 3000$, $m_1 = 410\Delta\lambda$, $\sigma_1 = 40\Delta\lambda$; $A_2 = 700$, $m_2 = 310\Delta\lambda$, $\sigma_2 = 40\Delta\lambda$; $A_3 = 250$, $m_3 = 210\Delta\lambda$, $\sigma_3 = 40\Delta\lambda$; $A_4 = 350$, $m_4 = 500\Delta\lambda$, $\sigma_4 = 40\Delta\lambda$; $A_5 = 100$, $m_5 = 580\Delta\lambda$, $\sigma_5 = 40\Delta\lambda$, где A_i , m_i и σ_i есть амплитуда, местоположение и полуширина i -ой гауссовой функции. Амплитуды задавались в условных единицах в пределах диапазона значений 16-разрядного АЦП, а привязка местоположения гауссовых функций к шкале длин волн выполнялась по формуле: $m_i^{[\lambda]} = 380 + m_i - \Delta\lambda$; $i = 1, \dots, N$. Так, если $m_1 = 410\Delta\lambda$, то $m_1^{[\lambda]} = 584,5$ нм. К сумме гауссовых функций добавлялся постоянный фон амплитуды $A_0 = 50$ и шум.

При измерениях спектров ФЛ с помощью фотоэлектронного умножителя шум можно считать аддитивным, а его модель задавать суммой шума, который зависит от сигнала, и теплового шума. В результате оценивания значений параметров этой модели на основе экспериментальных данных для нескольких спектров ФЛ, шум был описан соотношением: $\xi_i = |g(x_i)|^{1/2} \eta_i + 15\zeta_i$, где η_i и ζ_i есть значения гауссовых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией, а число 15 указывает на величину стандартного отклонения теплового шума (что составляет 4 двоичных разряда из допустимых 16 разрядов). Однако далее шумовая обстановка дополнительно ухудшалась за счет добавления положительных выбросов с вероятностью их появления 0,03 и равномерным распределением их амплитуды в интервале $[0, 2000]$.

Непосредственно для обработки экспериментальных данных использовались те зависимости спектров ФЛ, которые помимо широких «гладких» составляющих спектра содержали очень узкие и достаточно большие по амплитуде составляющие линейчатого спектра, которые интерпретировались как выбросы значений. Задача обработки состояла в получении гладких зависимостей как для исходного спектра ФЛ, так и для его первой производной.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования задачи численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами при имитации шумовой обстановки, характерной для измерений спектра ФЛ, представлены на рис. 1.

На рис. 1а приведена исходная последовательность зашумленных данных с выбросами, а на рис. 1б – результат ее численного дифференцирования обычным методом вычисления правой разностной производной (например, это выполняет функция `diff()` среды Matlab). Видно, что результат такого дифференцирования является неудовлетворительным.

На рис. 1в и рис. 1г приведен результат применения метода регуляризации Тихонова (9) для $k = 1$ с оптимальным значением параметра регуляризации, где пунктирная линия отвечает истинной зависимости, а сплошная линия отвечает полученной зависимости. Видно, что выбросы исказили искомое решение (рис. 1г), вызывая неверное поведение хвостов полученной зависимости. При этом относительная ошибка решения и относительная ошибка аппроксимации составили 11,2% и 4,1%, соответственно. Набор статистики по 100 реализациям шума дал усредненные значения этих показателей величиной в 12,7% и 4,2%, соответственно.

На рис. 1д и рис. 1е приведены результаты применения предложенного метода после использования двухпроходового алгоритма (242 итерации на первом проходе и 188 итераций на втором проходе) для $\alpha^2 = 10000$ и $\gamma_2 = 10000$, где пунктирная линия отвечает истинной зависимости, а сплошная линия отвечает полученной зависимости. Видно, что на обоих графиках сплошная линия практически полностью накрыла пунктирную линию. При этом относительная ошибка решения и относительная ошибка аппроксимации составили 4,9% и 1,2%, соответственно. Набор статистики по 100 реализациям шума дал усредненные значения этих показателей величиной в 5,7% и 1,4%, соответственно.

На рис. 2 приведено три экспериментальных зависимости спектров ФЛ кристаллов ZnS:Mn, а также результаты их сглаживания и численного дифференцирования предложенным методом для $\alpha^2 = 10000$ и $\gamma_2 = 10000$. При этом использовался двухпроходовой алгоритм, причем для обработки первой экспериментальной зависимости потребовалась 251 итерация на первом проходе и 293 итерации на втором проходе, для обработки второй экспериментальной зависимости – соответственно 133 и 127 итераций, а для третьей экспериментальной зависимости – 254 и 227 итераций, соответственно.

Видно, что выбросы на экспериментальных кривых расположены не случайно, а их ширина у основания составляет примерно 2,5 нм. По этой причине их следует рассматривать как детерминированные линейчатые составляющие спектра ФЛ, получая последние путем вычитания сглаженной зависимости из исходной зависимости данных. Также следует отметить, что применение метода регуляризации Тихонова превращало такие выбросы на экспериментальных кривых в достаточно широкие «холмы», что приводило к появлению нефизических осцилляций в результатах численного дифференцирования.

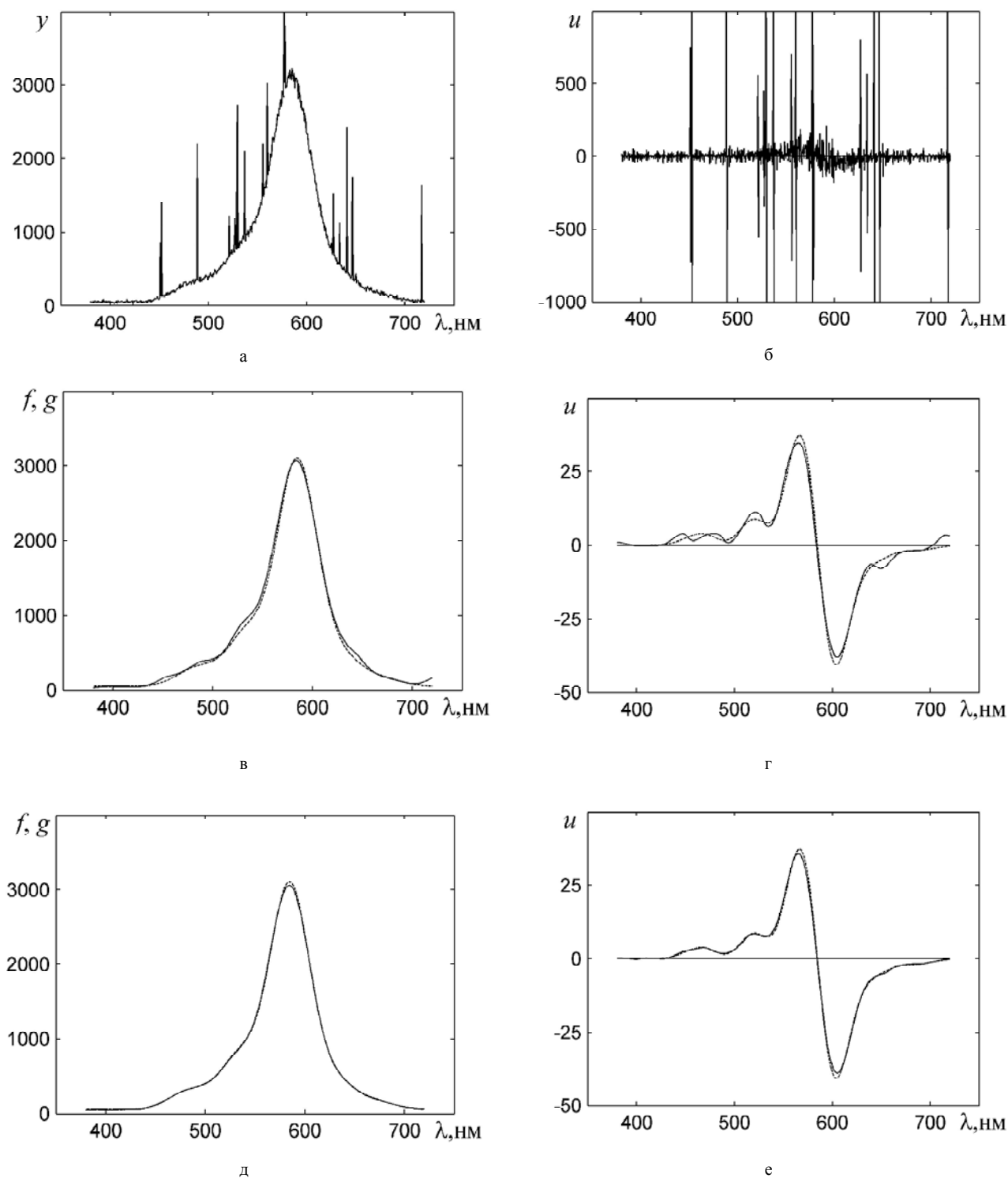


Рисунок 1 – Результаты моделирования:

а, б – данные и их численное дифференцирование обычным методом; в, г – сглаживание данных и численное дифференцирование методом Тихонова; д, е – сглаживание и численное дифференцирование предложенным методом

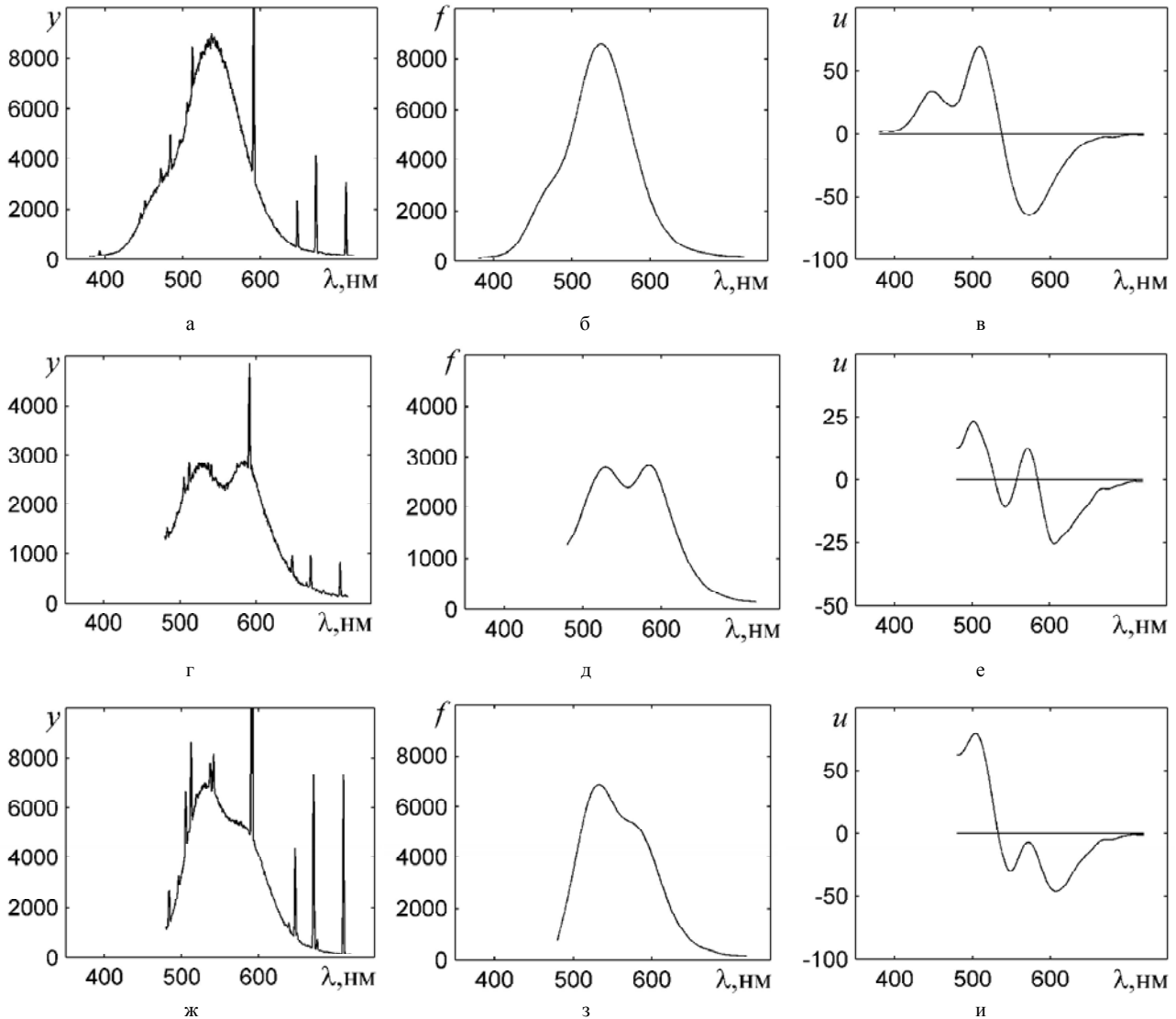


Рисунок 2 – Обработка экспериментальных данных:
а, г, ж – исходные данные; б, д, з – сглаженные данные; в, е, и – первая производная

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования и обработки экспериментальных данных демонстрируют эффективность предложенного метода. Это во многом определяется хорошим качеством настройки его свободных параметров α , β , q и параметра регуляризации γ_2 . Поскольку для заданной шумовой обстановки была типична некоторая шумовая полоса с выбросами значений, то для грубой настройки на эту шумовую обстановку в качестве прототипа был выбран шум импульсного типа с законом распределения Коши [11]. Для этого шума $\beta = 0$, $q = 2$, а α должно настраиваться на полуширину шумовой полосы (т.е. на масштаб шума Коши) [10]. Вторым настраиваемым параметром был параметр регуляризации γ_2 , который имеет смысл отношения величины протяженности невязки решения к величине энергии производной решения. На практике настройка параметров α и γ_2 выполнялась на этапе численного моделирования типовых за-

дач данного класса путем минимизации абсолютной ошибки решения. Затем полученные значения этих параметров применялись к другим задачам этого класса, в том числе, к задачам с экспериментальными данными. Хотя более точная настройка β и q позволяет улучшить результаты [10], однако здесь она не выполнялась.

При решении задачи одномерной оптимизации наилучшими шагами более часто оказывались пробные шаги, которые обнуляли компоненты стабилизирующей части функционала, а менее часто – шаги, которые обнуляли невязку решения. Шаги, которые отвечали методу Ньютона, при вычислениях практически не использовались, что указывает на их низкую эффективность для решения подобных задач.

ВЫВОДЫ

Предложенный метод может быть использован для численного дифференцирования зашумленных данных с выбросами. При этом он позволяет получить гладкую

аппроксимацию первой производной от исходных данных и, соответственно, гладкую аппроксимацию самих исходных данных.

Результаты моделирования и обработки экспериментальных данных, которые представляли собой спектры фотолюминесценции при наличии в их составе узких линейчатых спектральных составляющих, подтвердили эффективность предложенного метода.

Метод можно обобщить на случай негладкого решения путем построения стабилизирующей части функционала на основе ограничения полной вариации решения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Днепропетровского национального университета «Методы и информационные технологии цифровой обработки многоканальных данных» (номер государственной регистрации 0116U001297). Автор выражает благодарность проф. Коваленко А. В. и инж. Плахтию Е. Г. за предоставленные экспериментальные данные и полезное обсуждение результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Derivative spectroscopy and the continuous relaxation spectrum / [A. R. Davies, R. S. Anderssen, F. R. de Hoog, N. J. Goulding] // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. – 2016. – Vol. 233, July. – P. 107–118. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2016.01.018.
2. Autonomous Gaussian decomposition / [R. R. Lindner, C. Vera-Ciro, C. E. Murray and other] // *The Astronomical Journal*. – 2015. – Vol. 149, No. 4. – P. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
3. Maitra I. K. Adaptive Edge Detection Method towards Features Extraction from Diverse Medical Imaging Technologies / I. K. Maitra, S. K. Bandhyopadhyay // *Intelligent Multidimensional Data Clustering and Analysis*. – 2016. – Chapter 7. – P. 159–192. DOI: 10.4018/978-1-5225-1776-4
4. Selected algorithms for measurement data processing in impulse-radar-based system for monitoring of human movements /

[A. Mikkina, J. Wagner, P. Mazurek, R. Z. Morawski] // *Journal of Physics*. – 2016. – Vol. Conference Series 772. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1742-6596/772/1/012057.

5. Knowles I. Methods for numerical differentiation of noisy data / I. Knowles, R. J. Renka // *Electronic Journal of Differential Equations*. – 2014. – Vol. Conference 21. – P. 235–246.
6. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data / R. Chartrand // *ISRN Applied Mathematics*. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–11. DOI: 10.5402/2011/164564.
7. Liao H. Outlier Impact and Accommodation Methods: Multiple Comparisons of Type I Error Rates / H. Liao, Y. Li, G. Brooks // *Journal of Modern Applied Statistical Methods*. – 2016. – Vol. 15, May. – No. 1. – P. 452–471.
8. Borulko V. F. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources / V. F. Borulko, S. M. Vovk // *Telecommunications and Radio Engineering*. – 2013. – Vol. 72, No. 7. – P. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
9. Вовк С. М. Двойственный метод минимума пространственной протяженности для робастного оценивания параметров дипольных источников излучения / С. М. Вовк, В. Ф. Борулько // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2014. – № 2. – С. 8–17. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-1.
10. Vovk S. M. General approach to building the methods of filtering based on the minimum duration principle / S. M. Vovk // *Radioelectronics and Communications Systems*. – 2016. – Vol. 59. – № 7. – P. 281–292. DOI: 10.3103/S0735272716070013.
11. Gonzalez J. G. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments / J. G. Gonzalez, G. R. Arce // *IEEE Trans. on Signal Processing*. – 2001. – Vol. 49, No. 2. – P. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
12. Aysal T. C. Meridian filtering for robust signal processing / T. C. Aysal, K. E. Barner // *IEEE Trans. on Signal Processing*. – 2007. – Vol. 55, No. 8. – P. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.

Статья поступила в редакцию 01.02.2017.

После доработки 22.04.2017.

Вовк С. М.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих систем обробки інформації Дніпропетровського національного університету, Дніпро, Україна

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ЗАШУМЛЕНИХ ДАНИХ З ВИКИДАМИ

Актуальність. Застосування традиційних методів чисельного диференціювання до зашумлених даних з викидами призводить до значних похибок. Об'єктом цього дослідження є процес чисельного диференціювання таких даних.

Мета роботи – розробка методу чисельного диференціювання зашумлених даних з викидами, який дозволяє отримати гладку аппроксимацию їх першої похідної та, відповідно, гладку аппроксимацию самих даних.

Метод. Запропонований метод чисельного диференціювання заснований на рішенні задачі мінімізації згладжувального функціонала, який побудований на критерії мінімуму протяжності відхилення та обмеженні енергії першої похідної рішення. Критерій мінімуму протяжності формує основну частину функціонала й забезпечує його стійку поведінку у відношенні до адитивного шуму й викидів. Обмеження формує стабілізуювальну частину функціонала й забезпечує гладкість рішення задачі. Внесок зазначених частин регулюється за допомогою параметра регуляризації. Оскільки основна частина згладжувального функціонала не є опуклою, то задача його мінімізації є задачею нелінійного неопуклого програмування. Для чисельного рішення цієї задачі використовується метод спряжених градієнтів, в якому величина кроку вздовж напрямку спуска визначається на множині випробувальних кроків. Ці кроки мінімізують окремі компоненти основної та стабілізуювальної частин функціонала, що дозволяє переходити з одного локального мінімуму функціонала в інший більш глибокий локальний мінімум.

Результати. Моделювання задачі чисельного диференціювання зашумлених даних з викидами та обробка експериментальних даних, які являли собою спектри фотолюмінесценції з присутністю в їх складі вузьких лінійчатих спектральних складових, засвідчили ефективність запропонованого методу.

Висновки. Запропонований метод може бути використаний для чисельного диференціювання зашумлених зашумлених даних з викидами. При цьому він дозволяє отримати гладку аппроксимацию першої похідної початкових даних, а також гладку аппроксимацию самих початкових даних. Поданий метод можна узагальнити на випадок негладкого рішення шляхом побудови стабілізуювальної частини функціонала на основі обмеження повної варіації рішення.

Ключові слова: чисельне диференціювання, гладка аппроксимация, критерій мінімуму протяжності.

Vovk S. M.

PhD, Associate professor, Associate professor of Department of Automated Systems of Information Processing, Dnipropetrovsk National University, Dnipro, Ukraine

METHOD FOR NUMERICAL DIFFERENTIATION OF NOISY DATA WITH OUTLIERS

Context. Using of conventional methods of numerical differentiation to the noisy data with outliers leads to significant errors. The object of this study is the process of numerical differentiation of such data.

Objective. The goal of this work is the development of a method of numerical differentiation of the noisy data with outliers to obtain a smooth approximation of the first derivative of original data as well as a smooth approximation of the original data themselves.

Method. The proposed method of numerical differentiation is based on solving the problem of minimizing the smoothing functional, which is built on the criteria of a minimum of extent of the solution residual and of an energy constraint of the first derivative of solution. The minimum-extent criterion defines the main part of functional and ensures its stable behavior with respect to the additive noise and outliers. The energy constraint defines the stabilizing part of the functional and provides a smooth solution of the problem. The contribution of these parts is controlled by a regularization parameter. Since the main part of smoothing functional is not convex, then the minimization problem is the non-convex nonlinear programming problem. For the numerical solution of this problem the conjugate gradient method is used. In this method the step size along the descent direction is defined on the set of test steps. These steps minimize the individual components of the main and stabilizing parts of the smoothing functional that allows to move from the one local minimum of the functional to another deeper local minimum.

Results. Simulation of the problem of numerical differentiation of noisy data with outliers and processing of the experimental data, which are photoluminescence spectra with narrow line components in their compositions, confirmed the performance of the proposed method.

Conclusions. The proposed method can be used for numerical differentiation of noisy data with outliers. It provides a smooth approximation of the first derivative of the original data, as well as a smooth approximation of the original data themselves. This method can be generalized to the case of non-smooth solutions by constructing a stabilizing part of the functional based on the criterion of minimum total variation.

Keywords: numerical differentiation, smooth approximation, minimum-extent criteria.

REFERENCES

1. Davies A. R., Anderssen R. S., de Hoog F. R., Goulding N. J. Derivative spectroscopy and the continuous relaxation spectrum, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 2016, Vol. 233, pp. 107–118. DOI: 10.1016/j.jnnfm.2016.01.018.
2. Lindner R. R., Vera-Ciro C., Murray C. E., Stanimirovic S., Babler B. L., Heiles C., Hennebelle P., Goss W. M., Dickey J. Autonomous Gaussian decomposition, *The Astronomical Journal*, 2015, Vol. 149, No. 4, pp. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
3. Maitra I. K., Bandhyopadhyay S. K. Adaptive Edge Detection Method towards Features Extraction from Diverse Medical Imaging Technologies, *Intelligent Multidimensional Data Clustering and Analysis*, 2016, Chapter 7, pp. 159–192. DOI: 10.4018/978-1-5225-1776-4
4. Mikina A., Wagner J., Mazurek P., Morawski R. Z. Selected algorithms for measurement data processing in impulse-radar-based system for monitoring of human movements, *Journal of Physics*, 2016, Vol. Conference Series 772, pp. 1–6. DOI:10.1088/1742-6596/772/1/012057.
5. Knowles I., Renka R. J. Methods for numerical differentiation of noisy data, *Electronic Journal of Differential Equations*, 2014, Vol. Conference 21, pp. 235–246.
6. Chartrand R. Numerical differentiation of noisy, nonsmooth data, *ISRN Applied Mathematics*, 2011, Vol. 2011, pp. 1–11. DOI: 10.5402/2011/164564.
7. Liao H., Li Y., Brooks G. Outlier Impact and Accommodation Methods: Multiple Comparisons of Type I Error Rates, *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, 2016, Vol. 15, No. 1, pp. 452–471.
8. Borulko V. F., Vovk S. M. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 7, pp. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
9. Vovk S. M., Borulko V. F. Dvoystvennyy metod minimuma prostranstvennoy protyazhennosti dlya robastnogo otsenivaniya parametrov dipolnykh istochnikov izlucheniya, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2014, No. 2, pp. 8–17. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-2-1.
10. Vovk S. M. General approach to building the methods of filtering based on the minimum duration principle, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2016, Vol. 59, No. 7, pp. 281–292. DOI: 10.3103/S0735272716070013.
11. Gonzalez J. G., Arce G. R. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, Vol. 49, No. 2, pp. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
12. Aysal T. C., Barner K. E. Meridian filtering for robust signal processing, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, Vol. 55, No. 8, pp. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.

ПОСТРОЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ СОВЕРШЕННОЙ ФОРМЫ СИСТЕМЫ ОСТАТОЧНЫХ КЛАССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФАКТОРИЗАЦИИ

Актуальность. Решена актуальная задача нахождения модулей системы остаточных классов, в которой повышается скорость перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Цель работы – разработка метода построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю при переводе чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Метод. Предложен метод определения набора модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации произведения чисел. Использование данного метода позволяет существенно уменьшить вычислительную сложность при выполнении арифметических операций над многоразрядными числами путем распараллеливания процесса вычислений и перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления за счет исключения процедуры поиска обратного элемента по модулю и умножения на базисные числа. Определены условия для нахождения любого количества модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, два из которых являются неизвестными. Приведен пример использования предложенного метода для четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в котором получены все возможные наборы модулей при заданном наименьшем модуле. Представлены табличные значения и проанализированы графические зависимости полученных модулей.

Результаты. Использование предложенного метода подбора модулей, которые образуют модифицированную совершенную форму, позволит увеличить быстродействие вычислительных систем, работающих в системе остаточных классов.

Выводы. Впервые предложен метод построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации, в которой отсутствует сложная процедура поиска обратного элемента по модулю. Это позволяет упростить процессы вычислений над многоразрядными числами и перевода чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Ключевые слова: система остаточных классов, базисные числа, система модулей, модифицированная совершенная форма, разрядность чисел, факторизация.

НОМЕНКЛАТУРА

МСФ – модифицированная совершенная форма;

СОК – система остаточных классов;

СФ – совершенная форма;

$b_1, b_2, \dots, b_n$ – запись числа в системе остаточных классов;

k_1 – ряд натуральных чисел;

k_2 – ряд целых чисел;

n – количество модулей;

N – запись числа в десятичной системе исчисления;

$p_1, p_2, \dots, p_n$ – модули;

P – произведение модулей.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время непозиционные системы исчисления привлекают все больше внимания с целью использования их в современных вычислительных системах [1]. Это объясняется тем, что в связи со значительным ростом объемов вычислений и увеличением разрядности используемых чисел [2] существенно проявляются недостатки двоичной системы (например, ее многоразрядность, последовательная структура, наличие междуразрядных переносов [3]), которые в большой степени замедляют быстродействие вычислительных систем. Перечисленные недостатки отсутствуют в некоторых непозиционных системах исчисления, например, в системе остаточных классов (СОК) [4], что делает ее исполь-

зование весьма перспективным. В частности, СОК можно эффективно использовать при выполнении целочисленных операций модулярной арифметики над многоразрядными числами: сложения, вычитания, умножения, возведения в степень [5] и т.д. Это особенно актуально для современной асимметричной криптографии (алгоритмы RSA, Эль-Гамала, Рабина, электронной цифровой подписи [6]), больших матричных вычислений, разработки методов помехозащищенного кодирования [7], других задач дискретной и прикладной математики [8]. Кроме того, очень важным положительным свойством СОК является возможность распараллеливания процесса вычислений согласно модулярной арифметике с низкой разрядностью модулей [4].

К отрицательным сторонам СОК относятся целочисленность операндов, трудности выполнения арифметических операций деления и сравнения [9], а также определения переполнения разрядной сетки. Еще одним недостатком, который существенно замедлил развитие СОК, является сложность перевода в позиционные системы исчисления [4], что связано с необходимостью поиска обратного элемента по модулю.

Объект исследования – процесс перевода чисел из СОК в десятичную систему исчисления. Предметом исследования выступают модули СОК, для которых отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю.

Целью данной работы являлась разработка метода построения четырехмодульной модифицированной со-

вершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю при переводе чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Теоретической основой СОК является теория чисел [10]. Любое целое десятичное число N представляется в СОК в виде набора $(b_1, b_2, \dots, b_n)$ наименьших положительных остатков от деления этого числа на фиксированные натуральные попарно взаимно простые числа $p_1, p_2, \dots, p_n$ ($b_i = N \bmod p_i$), которые называются модулями (n – количество модулей). При этом должно выполняться

неравенство $0 \leq N < P-1$, где $P = \prod_{i=1}^n p_i$ – число, которое оп-

ределяет условие переполнения разрядности вычислений.

При обратном преобразовании из СОК в десятичную систему исчисления используется китайская теорема об остатках:

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i B_i \right) \bmod P, \quad (1)$$

где $B_i = M_i m_i$, $M_i = \frac{P}{p_i}$, $m_i = M_i^{-1} \bmod p_i$ – базисные числа.

Нахождение обратных элементов по модулю характеризуется значительной вычислительной сложностью и в теории чисел реализуется полным перебором возможных вариантов, с помощью алгоритма Евклида или теоремы Эйлера [11]. Поэтому разработка метода построения СОК, в которой отсутствует данная процедура, является актуальной задачей.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [12] описана совершенная форма (СФ) СОК, в которой выполняется условие $M_i \bmod p_i = 1$, что позволяет избежать процедуры поиска обратного элемента и умножения в (1) на базисные числа m_i . Выражение (1) в этом случае упрощается:

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i M_i \right) \bmod P. \quad (2)$$

В [13], [14] путем решения систем конгруэнций получено выражение для поиска набора модулей СФ СОК:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = k_1 + \frac{1}{\prod_{i=1}^n p_i}, \quad (3)$$

где $k_1 = 1, 2, 3, \dots$

В [15] решена задача и определены условия для аналитического нахождения m_i . Однако у всех этих случаев значения p_i быстро увеличиваются, что неприемлемо при необходимости использования модулей одинаковой разрядности.

В [12] предложена модифицированная совершенная

форма (МСФ) СОК, в которой $M_i \bmod p_i = \pm 1$, что также исключает выполнение операции поиска обратного элемента. Вычисления (1) происходят согласно формулы

$$N = \left(\sum_{i=1}^n b_i m_i M_i \right) \bmod P, m_i = \pm 1. \quad (4)$$

В [16] разработан метод построения МСФ СОК из трех модулей на примере $p_2 - p_1 = 5$. В [17] представлены теоретические основы построения трехмодульной МСФ СОК в общем случае. Однако в настоящее время отсутствуют универсальные методы нахождения любого количества модулей, которые удовлетворяют условиям МСФ СОК.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассуждения, аналогичные представленным в [13], [14] для СФ СОК (выражение (3)), приводят к условию, которое должно выполняться для МСФ СОК:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{p_i} = k_2 \pm \frac{1}{\prod_{i=1}^n p_i}, \quad (5)$$

где $k_2 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

В отличие от СФ СОК, где все модули положительные и поэтому $k_1 > 0$, в МСФ СОК модули имеют разные знаки и для упрощения задачи можно принять $k_2 = 0$, что соответствует наибольшему диапазону вычислений при заданном количестве модулей. Таким образом, уравнение (5) представим следующим выражением:

$$\frac{1}{p_1} + \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_3} + \dots + \frac{1}{p_{n-1}} + \frac{1}{p_n} = \pm \frac{1}{p_1 p_2 p_3 \dots p_{n-1} p_n}. \quad (6)$$

Следует отметить, что условию $m_i = 1$ отвечают положительные значения модулей p_i , а условию $m_i = -1$ – отрицательные. Кроме того, если в СФ СОК наименьшие модули строго определены ($p_1 = 2, p_2 = 3$) [14], то в МСФ СОК они могут изменяться произвольным образом.

Пусть неизвестными будут два последних модуля p_{n-1} и p_n . Тогда (6) представим в виде диофантового уравнения второй степени:

$$p_{n-1} p_n (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) + p_1 p_2 \dots p_{n-2} (p_{n-1} + p_{n-2}) = \pm 1. \quad (7)$$

Введем обозначение:

$$p_{n-1, n} = \frac{a, b - p_1 p_2 \dots p_{n-2}}{p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}}. \quad (8)$$

После подстановки (8) в (7) и соответствующих математических преобразований получаем выражение для целочисленного решения (7):

$$\pm (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) + (p_1 p_2 p_{n-2})^2 = ab. \quad (9)$$

Это означает, что левую часть (9) надо факторизировать, на основании чего определяются параметры a и b . Кроме этого, модули p_n и p_{n-1} должны быть целыми числами. Поэтому из (8) следует:

$$(a, b - p_1 p_2 \dots p_{n-2}) \bmod (p_2 p_3 \dots p_{n-2} + p_1 p_3 \dots p_{n-2} + \dots + p_1 p_2 \dots p_{n-3}) = 0. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) определяют условия для нахождения любого количества модулей МСФ СОК, два из которых неизвестны.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве примера предложенного метода рассмотрим МСФ СОК, состоящую из четырех модулей. Условия (8)–(10) трансформируются таким образом:

$$p_{3,4} = \frac{a, b - p_1 p_2}{p_1 + p_2}; \pm(p_1 + p_2) + (p_1 p_2)^2 = ab; \\ (a, b - p_1 p_2) \bmod (p_1 + p_2) = 0. \quad (11)$$

Из (6) видно, что при $n=4$ значения p_1 и p_2 должны иметь разные знаки. Считая модуль p_1 положительным, наибольшее количество вариантов будет при условии $p_2 = -(p_1 + 1)$, так как в этом случае третье условие (11) выполняется всегда. Первые два приобретут такой вид:

$$p_{3,4} = -(a, b + p_1^2 + p_1); \pm 1 + (p_1(p_1 + 1))^2 = ab. \quad (12)$$

Примем $p_1 = 7$, тогда $p_2 = -8$ и из (12) получаем:

$$p_{3,4} = -(a, b + 56) \text{ и } ab = \pm 1 + 3136 = \begin{cases} 3135 = 3 \cdot 5 \cdot 11 \cdot 19 \\ 3137 \end{cases}.$$

Численные расчеты показывают, что для $p_1 = 7$ в других случаях, кроме $p_2 = -8$, наибольшее количество вариантов наборов модулей будет при $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$. Тогда уравнения (11) приобретут соответственно такой вид:

$$p_{3,4} = -\frac{a, b + 63}{2}; \pm 2 + 63^2 = ab; (a, b - 63) \bmod 2 = 0. \quad (13)$$

Таблица 1 – Возможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1 = 7$, $p_2 = -8$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

№	p_1, p_2	ab	a	b	p_3	p_4	P
1	7 (3), -8 (4)	3135	1	3135	-57 (6)	-3191 (12)	10185672 (24)
2			-1	-3135	-55 (6)	3079 (12)	9483320 (24)
3			3	1045	-59 (6)	-1101 (11)	3637704 (22)
4			-3	-1045	-53 (6)	989 (10)	2935352 (22)
5			5	627	-61 (6)	-683 (10)	2333128 (22)
6			-5	-627	-51 (6)	571 (10)	1630776 (21)
7			11	285	-67 (7)	-341 (9)	1279432 (21)
8			-11	-285	-45 (6)	229 (8)	577080 (20)
9			15	209	-71 (7)	-265 (9)	1053640 (21)
10			-15	-209	-41 (6)	153 (8)	351288 (19)
11			19	165	-75 (7)	-221 (8)	928200 (20)
12			-19	-165	-37 (6)	109 (7)	225848 (18)
13			33	95	-89 (7)	-151 (8)	752584 (20)
14			-33	-95	-23 (5)	39 (6)	50232 (16)
15			55	57	-111 (7)	-113 (7)	702408 (20)
16			-55	-57	-1 (1)	1 (1)	56 (6)
17		3137	1	3137	-57 (6)	-3193 (12)	10192056 (24)
18			-1	-3137	-55 (6)	3081 (12)	9489480 (24)

Таблица 2 – Упорядочение модулей

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_3	1	23	37	41	45	51	53	55	55
p_4	1	39	109	153	229	571	989	3079	3081
№	10	11	12	13	14	15	16	17	18
p_3	57	57	59	61	67	71	75	89	111
p_4	3191	3193	1101	683	341	265	221	151	113

$$p_{3,4} = -\frac{a, b + 77}{4}; \pm 4 + 77^2 = ab; (a, b - 77) \bmod 4 = 0. \quad (14)$$

Отсюда следует, что

$$ab = \pm 2 + 3969 = \begin{cases} 3967 \\ 3971 = 11 \cdot 19 \cdot 19 \end{cases} \text{ для } p_2 = -9 \text{ и}$$

$$ab = \pm 4 + 5929 = \begin{cases} 5925 = 3 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 79 \\ 5933 = 17 \cdot 349 \end{cases} \text{ для } p_2 = -11.$$

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

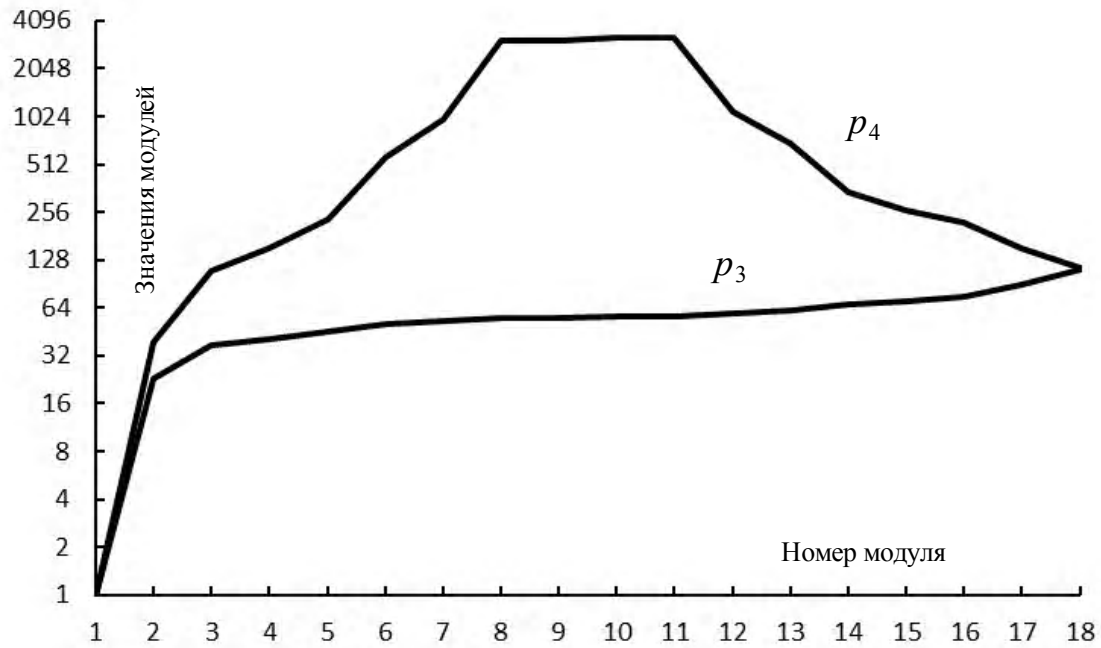
В таблице 1 представлены всевозможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1 = 7$, $p_2 = -8$ согласно (10) (в скобках указана разрядность модулей и диапазона вычислений в двоичной системе исчисления).

Для построения графика зависимости модулей их необходимо перенумеровать в порядке увеличения абсолютной величины p_3 , что представлено в таблице 2.

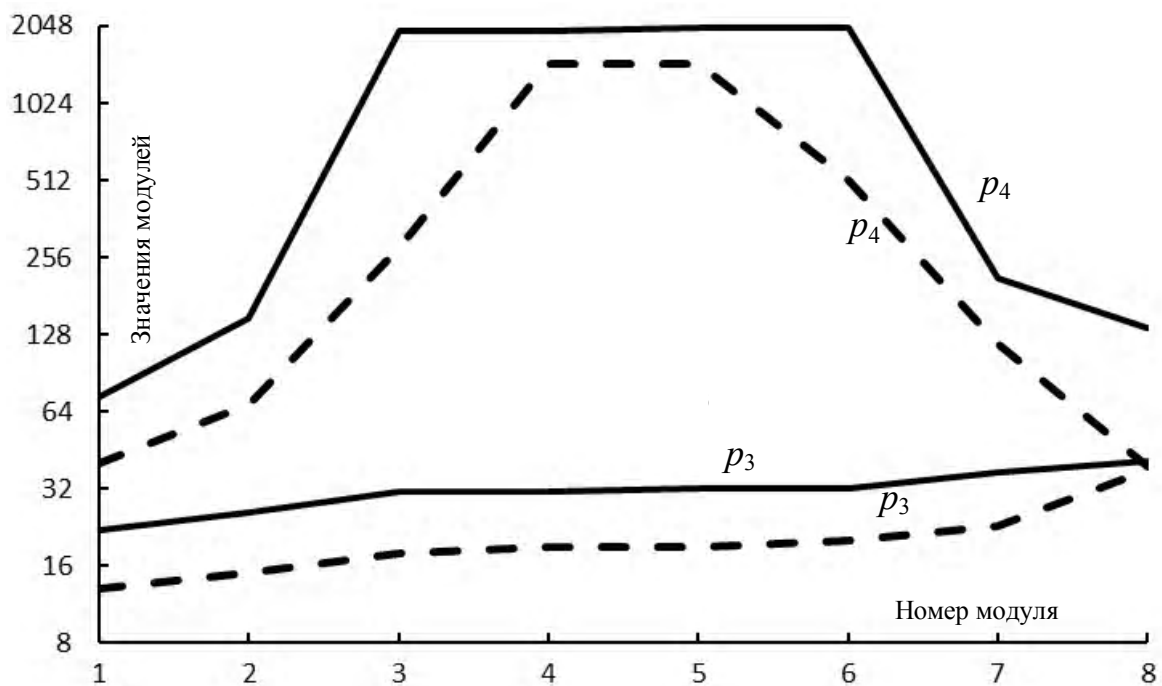
На рисунке 1 показан характер изменения значений модулей p_3 и p_4 в зависимости от номера модуля согласно таблицы 2 в логарифмической шкале с основанием 2.

В таблице 3 приведены упорядоченные значения абсолютных величин модулей, полученные из (12) аналогично таблице 2, при $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$, а также граница диапазона вычислений P (в скобках указана разрядность представленных чисел).

На рисунке 2 показаны графики зависимости значений модулей p_3 и p_4 (сплошной линией – для $p_2 = -9$, пунктирной – для $p_2 = -11$) в зависимости от номера модуля согласно таблицы 3 в логарифмической шкале с основанием 2.

Рисунок 1 – Характер изменения значений модулей p_3 и p_4 при $p_1=7$, $p_2=-8$ в зависимости от номера модуля согласно таблицы 2Таблица 3 – Упорядоченные значения абсолютных величин модулей p_3 и p_4 при $p_2=-9$ и $p_2=-11$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

p_2	p_3, p_4	1	2	3	4	5	6	7	8
9 (4)	p_3	22(5)	26(5)	31(5)	31(5)	32(6)	32(6)	37(6)	41(6)
	p_4	73(7)	149(8)	1952(11)	1954(11)	2015(11)	2017(11)	212(8)	136(8)
	P	101178 (17)	244062 (18)	3812256 (22)	3816162 (22)	4062240 (22)	4066272 (22)	494172 (19)	351288 (19)
11 (4)	p_3	13(4)	15(4)	18(5)	19(5)	19(5)	20(5)	23(5)	38(6)
	p_4	40(6)	68(7)	277(9)	1462(11)	1464(11)	513(10)	118(7)	39(6)
	P	40040 (16)	78540 (17)	383922 (19)	2138906 (22)	2141832 (22)	790020 (20)	208978 (18)	114114 (17)

Рисунок 2 – Характер изменения значений модулей p_3 и p_4 при $p_1=7$, $p_2=-9$ (сплошная линия) и $p_2=-11$ (пунктирная линия) в зависимости от номера модуля согласно таблицы 3

В таблице 4 представлены остальные возможные варианты наборов модулей МСФ СОК при $p_1=7$, полученные согласно условиям (11).

Таблица 4 – Возможные варианты систем из четырех модулей для МСФ СОК при $p_1=7$, $p_2=-10, -12, -13, -15$ (в скобках – разрядность модулей и диапазона вычислений)

p_2	p_3	p_4	P
-10 (4)	-23 (5)	1609 (11)	2590490 (22)
	-23 (5)	1611 (11)	2593710 (22)
	-43 (6)	-51 (6)	153510 (18)
-12 (4)	-17 (5)	-1427 (11)	2037756 (22)
	-17 (5)	-1429 (11)	2040612 (22)
	-19 (5)	-145 (8)	231420 (18)
-13 (4)	-15 (4)	1364 (11)	1861860 (21)
	-15 (4)	1366 (11)	1864590 (21)
	-16 (5)	-291 (9)	423696 (19)
-15 (4)	-16 (5)	-73 (7)	122640 (17)

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Из таблицы 1 следует, что наибольший диапазон вычислений будет в том случае, когда каждый следующий модуль на единицу больше от произведения абсолютных величин предыдущих. Строка 16 таблицы 1 показывает, что числа 7 и -8 образуют МСФ СОК, поскольку $7 \bmod 8 = -1 \bmod 8$ и $8 \bmod 7 = 1$. Модулям $p_3 = -55$ и $p_3 = -57$ ($p_3 = p_1 \cdot p_2 \pm 1$) соответствуют по два разных значения p_4 .

Из рисунка 1 видно, что модуль p_3 относительно медленно увеличивается. В то же время, график для модуля p_4 увеличивается интенсивнее, приходит к плоскому максимуму посередине номерного диапазона модулей, а потом убывает к значению модуля p_3 .

При $p_2 = -9$ и $p_2 = -11$ из (13) и (14) следует, что параметры a и b есть нечетными числами, поэтому третье условие из (13) выполняется при всех возможных значениях a и b , а третье условие (12) – только для половины возможных вариантов параметров a и b .

Графики на рисунке 2 ведут себя аналогично рисунку 1, но при $p_2 = -9$ максимум становится шире.

Из таблицы 4 видно, что большинство вариантов получены при $a = \pm 1$, когда четвертый модуль на единицу отличается от произведения трех предыдущих, что соответствует наибольшей границе диапазона вычислений.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, в которой отсутствует процедура поиска обратного элемента по модулю.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые предложен метод построения четырехмодульной модифицированной совершенной формы системы остаточных классов на основе факторизации, в которой отсутствуют обладающие большой вычислительной сложностью процедуры поиска обратного элемента по модулю и умножения на базисные числа, что позволяет упростить выполнение арифмети-

ческих операций над многоразрядными числами путем распараллеливания процесса вычислений и перевод чисел из системы остаточных классов в десятичную систему исчисления.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что использование предложенного метода подбора модулей, которые образуют модифицированную совершенную форму, позволит увеличить быстродействие вычислительных систем, работающих в системе остаточных классов.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы определить условия для нахождения модулей модифицированной совершенной формы системы остаточных классов, три и больше из которых являются неизвестными, а также программная и аппаратная реализация предложенного и запланированных методов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской работы «Обработка многоразрядных чисел в системе остаточных классов» кафедры компьютерной инженерии Тернопольского национального экономического университета, государственный регистрационный номер 0115U001607.

Автор выражает благодарность кандидатам технических наук, доцентам кафедры компьютерной инженерии Тернопольского национального экономического университета Якименко Игорю Зиновьевичу и Ивасьеву Степану Владимировичу за моральную поддержку при написании работы и полезное обсуждение полученных результатов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николайчук Я. М. Теорія джерел інформації / Я. М. Николайчук. – Тернопіль : ТзОВ «Терно-граф», 2010. – 536 с.
2. Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes / [M. Karpinski, S. Ivasiev, I. Yakymenko et al.] // Control, Automation and Systems : 16th International Conference, Gyeongju, 16–19 October 2016 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2016. – P. 1484–1486. DOI: 10.1109/ICCAS.2016.7832500.
3. Рабинович З. Л. Типовые операции в вычислительных машинах / З. Л. Рабинович, В. А. Раманаскас. – К. : Техника, 1980. – 264 с.
4. Акушский И. Я. Машинная арифметика в остаточных классах / И. Я. Акушский, Д. И. Юдицкий. – М. : Сов. радио, 1968. – 440 с.
5. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System / [Kozaczko D., Ivasiev S., Yakymenko I. et al.] // Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications : IEEE 8th International Conference, Warsaw, 24–26 September 2015 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2015. – P. 161–163.
6. Теорія алгоритмів RSA та Ель-Гамала в розмежованій системі числення Радемахера-Крестенсона / [М. М. Касянчук, І. З. Якименко, О. І. Волинський та ін.] // Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки. – 2011. – № 3. – С. 265–273.
7. Jun S. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System / S. Jun, V. Yatskiv // Journal Sensors & Transducers. – 2013. – Vol. 148, №1. – P. 60–65.
8. Krasnobayev V. Method of Increasing the Reliability of Verification of Data Represented in a Residue Number System / V. Krasnobayev, S. Koshman, M. Mavrina // Cybernetics and Systems Analysis. – 2014. – Vol. 50, № 6. – P. 969–976. DOI: 10.1007/s10559-014-9688-3.

9. Krasnobayev V. A. A Method for Arithmetic Comparison of Data Represented in a Residue Number System / V. A. Krasnobayev, A. S. Yanko, S. A. Koshman // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – Vol. 52, № 1. – P. 145–150. DOI: 10.1007/s10559-016-9809-2.
10. Бухштаб А. А. Теория чисел / А. А. Бухштаб. – М.: Просвещение, 1966. – 384 с.
11. Вербіцький О. В. Вступ до криптології / О. В. Вербіцький. – Львів: ВНТЛ, 1998. – 248 с.
12. Касянчук М. М. Теорія та математичні закономірності досконалої форми системи залишкових класів / М. М. Касянчук // Питання оптимізації обчислень: XXXV Міжнародний симпозиум, Кацивели, 24–29 вересня 2009 р.: тези доповідей. – Київ: Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова, 2009. – С. 306–310.
13. Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system / [M. Kasianchuk, I. Yakymenko, I. Pazdriy et al.] // *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics: XIII International Conference, Polyana-Svalyava, 23–25 February 2015: Proceedings*. – L'viv: Lviv Polytechnic National University, 2015. – P. 168–171.
14. Аналітичний пошук модулів досконалої форми системи залишкових класів та їх використання в китайській теоремі про залишки / [М. М. Касянчук, І. З. Якименко, І. Р. Паздрій та ін.] // *Вісник Хмельницького національного університету: технічні науки*. – 2015. – №1. – С. 170–176.
15. Nikolaychuk Ya. M. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation / Ya. M. Nikolaychuk, M. M. Kasianchuk, I. Z. Yakymenko // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2014. – Vol. 50, № 5. – P. 649–654. DOI: 10.1007/s10559-014-9654-0.
16. Nikolaychuk Ya. M. Theoretical Foundations of the Modified Perfect Form of Residue Number System / Ya. M. Nikolaychuk, M. M. Kasianchuk, I. Z. Yakymenko // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2016. – Vol. 52, № 2. – P. 219–223. DOI: 10.1007/s10559-016-9817-2.
17. Kasianchuk M. N. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes / M. N. Kasianchuk, Y. N. Nikolaychuk, I. Z. Yakymenko // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2016. – Vol. 48, № 8. – P. 56–63. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.60.

Статья поступила в редакцию 22.12.2016.
После доработки 13.03.2017.

Касянчук М. М.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна

ПОБУДОВА МОДИФІКОВАНОЇ ДОСКОНОЛОЇ ФОРМИ СИСТЕМИ ЗАЛИШКОВИХ КЛАСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФАКТОРИЗАЦІЇ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання знаходження модулів системи залишкових класів, в якій підвищується швидкість переведення чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Мета роботи – розробка методу побудови чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, в якій відсутня процедура пошуку оберненого елемента за модулем при переведенні чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Метод. Запропоновано метод визначення набору модулів модифікованої досконалої форми системи залишкових класів на основі факторизації добутку чисел. Використання даного методу дозволяє істотно зменшити обчислювальну складність при виконанні арифметичних операцій над багаторозрядними числами шляхом розпаралелювання процесу обчислень та переведенні чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення за рахунок уникнення процедури пошуку оберненого елемента за модулем і множення на базисні числа. Визначено умови для знаходження будь-якої кількості модулів модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, два з яких є невідомими. Наведено приклад використання запропонованого методу для чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів, в якому отримані всі можливі набори модулів при заданому найменшому модулі. Представлено табличні значення та проаналізовані графічні залежності отриманих модулів.

Результати. Використання запропонованого методу підбору модулів, що утворюють модифіковану досконалу форму, дозволить збільшити швидкість обчислювальних систем, які працюють у системі залишкових класів.

Висновки. Вперше запропоновано метод побудови чотирьохмодульної модифікованої досконалої форми системи залишкових класів на основі факторизації, в якій відсутня складна процедура пошуку оберненого елемента за модулем. Це дозволяє спростити процеси обчислень над багаторозрядними числами і переведення чисел із системи залишкових класів у десяткову систему числення.

Ключові слова: система залишкових класів, базисні числа, система модулів, модифікована досконала форма, розрядність чисел, факторизація.

Kasianchuk M. M.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Engineering, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

THE CONSTRUCTION OF THE MODIFIED PERFECT FORM OF RESIDUAL CLASSES SYSTEM USING FACTORIZATION

Context. The urgent task of finding modules of the system of residue classes, which characterize by increasing the speed of transition of numbers from the system of residue classes into decimal number system.

Objective is to develop a method of constructing modified fourth-module perfect form of the system of residue classes without procedure of finding of the absolute value for inverse element under number transition from residue number system to decimal number system.

Method. The method of determining a set of modules if modified perfect form of system's of residue number was proposed which was based on factorization of numbers product. Usage of this form significantly reduced the computational complexity when arithmetic operations were performing on multi-digital numbers and transferring of numbers from the system of residual classes in the decimal system of calculation by eliminating of the searching procedure of the inverse element in absolute value and multiplying by the basic numbers. The conditions of discovering of any absolute number of modified perfect form of system of residual classes and two of them are unknown. An example of the proposed method for forth-module with modified perfect form system, which received all possible sets of modules with given smallest module. Tabular amounts are presented and analyzed according to the received image of modules.

Results. Utilization of the proposed method of modules selection which has constructed modified perfect form allows to increase the performance of computing systems operating in the system residual classes.

Conclusions. It's the first time of discover of the method which allows to construct modified fourth-module perfect form of the system of residue classes based on factorization without complicated procedure of finding of the absolute value for inverse element. Present work helps to simplify the process of calculating digit number and transfer numbers from the system of residual classes into decimal system.

Keywords: system of residual classes, basic number, system of modules, modified perfect form, bit numbers, factorization.

REFERENCES

1. Nykolajchuk Ja. M. Teorija dzherel informacii'. Ternopil', TzOV „Terno-graf”, 2010, 536 p.
2. Karpinski M., Ivasiev S., Yakymenko I. et al.] Advanced method of factorization of multi-bit numbers based on Fermat's theorem in the system of residual classes, *Control, Automation and Systems : 16th International Conference, Gyeongju, 16–19 October 2016 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2016, pp. 1484–1486. DOI: 10.1109/ICCAS.2016.7832500.
3. Rabinovich Z. L., Ramanauskas V. A. Tipove operacii v vychislitel'nyh mashinah. Kiev, Tehnika, 1980, 264 p.
4. Akushskij I. Ja., Judickij D. I. Mashinnaja arifmetika v ostatochnykh klassah. Moscow, Sov.radio, 1968, 440 p.
5. Kozaczko D., Ivasiev S., Yakymenko I. et al. Vector Module Exponential in the Remaining Classes System, *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications : IEEE 8th International Conference, Warsaw, 24–26 September 2015 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2015, pp. 161–163.
6. Kasjanchuk M. M., Jakymenko I. Z., Volyns'kyj O. I. ta in. Teorija algorytmiv RSA ta El'– Gamalja v rozmezhanij systemi chyslennja Rademahera-Krestensona, *Visnyk Hmel'nyk'ogo nacional'nogo universytetu. Tehnichni nauky*, 2011, No. 3, pp. 265–273.
7. Jun S., Yatskiv V. Method and Device for Image Coding & Transferring Based on Residue Number System, *Journal Sensors & Transducers*, 2013, Vol. 148, No. 1, pp. 60–65.
8. Krasnobayev V., Koshman S., Mavrina M. Method of Increasing the Reliability of Verification of Data Represented in a Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, Vol. 50, No. 6, pp. 969–976. DOI:10.1007/s10559-014-9688-3.
9. Krasnobayev V. A., Yanko A. S., Koshman S. A. A Method for Arithmetic Comparison of Data Represented in a Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 145–150. DOI: 10.1007/s10559-016-9809-2.
10. Buhstah A. A. Teorija chisel. Moscow, Prosveshhenie, 1966, 384 p.
11. Verbič'kyj O. V. Vstup do kryptologii'. L'viv, VNTL, 1998, 248 p.
12. Kasjanchuk M. M. Teorija ta matematychni zakonomirnosti doskonaloj formy systemy zalyshkovykh klasiv, *Pytannja optymizacii' obchyslen': HHHV Mizhnarodnyj symposium, Kacyveli, 24–29 veresnja 2009 r. : tezy dopovidej*. Kyi'v, Instytut kibernetiky im. V. M. Glushkova, 2009, pp. 306–310.
13. Kasianchuk M., Yakymenko I., Pazdriy I. et al. Algorithms of findings of perfect shape modules of remaining classes system, *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics : XIII International Conference, Polyana-Svalyava, 23–25 February 2015 : Proceedings*. L'viv, Lviv Polytechnic National University, 2015, pp. 168–171.
14. Kasjanchuk M. M., Jakymenko I. Z., Pazdriy I. R. ta in. Analitychnyj poshuk moduliv doskonaloj formy systemy zalyshkovykh klasiv ta i'h vykorystannja v kytajskij teoremi pro zalyshky, *Visnyk Hmel'nyk'ogo nacional'nogo universytetu : tehnichni nauky*, 2015, No. 1, pp. 170–176.
15. Nykolajchuk Ya. M., Kasianchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations for the Analytical Computation of Coefficients of Basic Numbers of Krestenson's Transformation, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2014, Vol. 50, No. 5, pp. 649–654. DOI: 10.1007/s10559-014-9654-0.
16. Nykolajchuk Ya. M., Kasianchuk M. M., Yakymenko I. Z. Theoretical Foundations of the Modified Perfect Form of Residue Number System, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2016, Vol. 52, No. 2, pp. 219–223. DOI: 10.1007/s10559-016-9817-2.
17. Kasianchuk M. N., Nykolajchuk Y. N., Yakymenko I. Z. Theory and Methods of Constructing of Modules System of the Perfect Modified Form of the System of Residual Classes, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2016, Vol. 48, No. 8, pp. 56–63. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i8.60.

ГИБРИДНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЛОШНЫХ ТЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЯВНЫХ И ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ

Актуальность. Рассмотрена проблема представления сплошных тел в системах автоматизации проектных работ. Объектом исследования является процесс представления сплошных тел в системах автоматизации проектных работ.

Цель работы – разработка гибридной схемы представления сплошных тел, использующей неявные функции, R-операций и параметрические функции.

Метод. Для моделирования сплошных тел в статье предложено гибридное представление. Под абстрактным понятием «сплошное тело» в работе понимаются ограниченные и замкнутые подмножества евклидова пространства, которые моделируют физические тела; под схемой представления – синтаксически и семантически корректное отношение между множеством формальных описаний математических моделей и множеством сплошных тел. В основе гибридного представления идея одновременного использования граничного и функционального представлений. Предполагается, что при граничном представлении, области определяются своими границами, описанными при помощи параметрических функций, а при функциональном представлении – при помощи неявных функций с использованием положений теории R-функций. Для гибридного представления используются функции расстояния со знаком, которые позволяют рассматривать подобласти, описанные параметрическими функциями, как аргументы R-операций (конъюнкции, дизъюнкции или отрицания) при построении единой неявной функции, соответствующей сложному телу. Чтобы в произвольной точке вычислить расстояние со знаком до границы области, ограниченной параметрическими функциями, предложено использовать вспомогательное построение адаптивных дискретных моделей контуров. Расстояние от точки до границы аппроксимируется расстоянием от этой точки до ближайшего дискретного элемента. Для определения знака функции используется тест четности.

Результаты. Разработанная гибридная схема представления реализована в программном продукте, на основе которого решены задачи построения моделей сложных тел.

Выводы. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили корректность и работоспособность предложенного математического обеспечения. Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы оптимизировать вычисление функций расстояния со знаком, например, при помощи технологий параллельных вычислений.

Ключевые слова: сплошное тело, неявная функция, R функция, параметрическая функция, дискретная модель, функция расстояния, тест четности, автоматизированное проектирование.

НОМЕНКЛАТУРА

$B_i^n(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i}$ – полином Бернштейна;

$e_i = (p_{i0}; p_{i1})$ – ребро плоского графа;

$\{i, j\}$ – ортонормированный базис декартовой системы координат двумерного пространства;

$\{i, j, k\}$ – ортонормированный базис декартовой системы координат трехмерного пространства;

$p = (x_p; y_p)$ – радиус-вектор произвольной точки двумерного пространства;

p_{i0} – радиус-вектор начала ребра e_i ;

p_{i1} – координата конца ребра e_i ;

$q = (x_q; y_q; z_q)$ – радиус-вектор произвольной точки трехмерного пространства;

R^n – n -мерное координатное пространство;

t – скалярный аргумент;

$tr = (q_{i0}; q_{i1}; q_{i2})$ – треугольник, заданный радиус-векторами вершин (упорядоченной тройкой);

$x(t)$ – непрерывная функция параметра t ;

$y(t)$ – непрерывная функция параметра t ;

$[]^T$ – операция транспонирования;

$\|a\|$ – евклидова норма вектора a ;

$\langle a, b \rangle$ – операция вычисления скалярного произведения векторов a и b ;

$[a, b]$ – операция вычисления векторного произведения векторов a и b ;

$[t]$ – операция нахождения наибольшего целого, меньшего чем t .

ВВЕДЕНИЕ

Важной частью проектирования сложных технических объектов является исследование их эксплуатационных характеристик. Многие технические объекты и конструкции обладают сложной формой и математические модели, используемые для их исследования, как правило, требуют адекватного описания соответствующей геометрической информации. В современных системах автоматизированного проектирования для описания формы объектов разработаны специальные подсистемы. Основой таких подсистем являются схемы представления (representation schemes) сплошных тел (solids). Под абстрактным понятием «сплошное тело» понимаются ограниченные замкнутые подмножества евклидова пространства, которые моделируют физические тела. Схема представления – это синтаксически и семантически корректное отношение между множеством формальных описаний математических моделей и множеством сплошных тел.

В исследованиях по компьютерному моделированию сплошных тел, выполненных в работах А. G. Requicha [1–3], выделены восемь основных схем представления: 1) инженерные чертежи; 2) каркасное представление; 3) представление экземплярами примитивов; 4) воксельное представление; 5) дискретные модели; 6) конструктивная сплошная (блочная) геометрия (Constructive Solid Geometry, CSG); 7) схемы представления разверткой; 8) граничное представление (Brep);

Анализ приведенных выше «классических» представлений показал, что их практическое применение ограничено или требует значительных усилий для построения моделей сложных геометрических объектов. С точки зрения универсальности одним из наиболее перспективных выглядит функциональное представление, в основе которого использование языка неявных математических функций с конструктивными возможностями теории R-функций, разработанной академиком Рвачевым В. Л. [4–6]. Однако, его использование инженерами весьма затруднительно с точки зрения построения и верификации модели.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Функциональное представление с использованием неявных функций весьма универсально, однако в авиа-, авто- и судостроении весьма распространено использование параметрических кривых или поверхностей (например, поверхностей Безье, β -сплайнов и т. п.), ограничивающих элементы объекта. При этом, построение системы границ (граничного представления) нестандартного объекта (например, с разветвленной структурой технологических отверстий) достаточно трудное. Возможный способ упрощения процесса моделирования геометрических объектов – комбинирование элементов функционального и граничного представлений (гибридное представление), например, путем преобразования граничных моделей в функциональные. Переход от граничного представления примитива (системы параметрических кривых или поверхностей) к эквивалентному функциональному (неявному уравнению) при помощи разрешения соответствующей системы возможен лишь в относительно простых случаях и, следовательно, актуальной является разработка методов решения этой задачи.

В основе граничного представления лежит теорема Жордана-Брауера (обобщение теоремы Жордана для n -мерного пространства), которая гарантирует, что любое $(n-1)$ -мерное подмногообразие в $\mathbf{R}^n$, гомеоморфное сфере, разбивает пространство на две связные компоненты и является их общей границей. То есть, в двумерном случае плоская простая (не имеющая самопересечений) замкнутая кривая разбивает плоскость на две связные компоненты, одну из которых можно считать внутренней, другую внешней. Аналогично в трехмерном пространстве простая замкнутая поверхность разбивает пространство на две связные компоненты: внутреннюю и внешнюю. Таким образом, можно говорить, что простое ограниченное замкнутое множество $L \subset \mathbf{R}^n$ представляет некоторый геометрический

объект Ω (при этом L является границей Ω). При этом справедливо утверждение, что для всякого замкнутого множества L может быть построено непрерывное неявное уравнение [4], простейший вариант которого – нормальное уравнение

$$\inf_{Y \in L} \|X - Y\| = 0, \quad X \in \mathbf{R}^n.$$

Функция

$$\text{dist}(X, L) = \inf_{Y \in L} \|X - Y\| \quad (1)$$

является расстоянием от точки X до самой ближайшей к ней точки множества L . Данная функция в произвольной взятой точке X принимает значение, равное радиусу наибольшей гиперболы с центром в X , полностью заключенной (вписанной) в L , если X – внутренняя точка L , и равное радиусу наименьшей гиперболы с центром в X , касающейся L , если X – внешняя точка L .

Предположим, что также дана функция

$$\text{sign}(X, L) = \begin{cases} +1, & X \in \Omega, \\ -1, & X \notin \Omega, \end{cases} \quad (2)$$

которая равна $+1$ во внутренних точках L и равна -1 во внешних точках L . Соответственно функция

$$\text{distance}(X, L) = \text{sign}(X, L) \text{dist}(X, L) \quad (3)$$

будет больше нуля во внутренних точках L , равна нулю, если $X \in L$, и меньше нуля во внешних точках L . Такая функция неявно определяет геометрический объект Ω . Таким образом, задача состоит в построении функций (1) и (2) при условии, что L – представленная параметрически замкнутая граница.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Говорят, что некоторое множество точек Ω задано неявно, если для каждой точки P определен логический предикат $S(P)$ такой, что

$$\Omega = \{P: S(P) = \text{true}\}.$$

Простейшей формой такого предиката является ограничение на знак некоторой действительной функции в виде неравенства $F(P) \geq 0$. Например, функция $\text{usphere}(x, y, z) = 1 - x^2 - y^2 - z^2$ больше нуля в области, ограниченной единичной сферой, равна нулю на границе этой области и меньше нуля во внешних точках. Функциональное представление на базе неявных функций для более сложных областей можно строить в конструктивной манере, используя логические операции дизъюнкции, конъюнкции или отрицания, которые получили развитие в работах академика Рвачева В. Л. [4–6] и его научной школы. В частности, детальный анализ преобразований координат и суперпозиций с периодическими функциями для функционального представления геометрических объектов с различными типами симметрий выполнен в работах [7–10].

При граничном представлении сплошное тело представляется совокупностью ограничивающих его границ. В двумерном случае область ограничивается кривыми, в трехмерном – поверхностями. Сложные объекты могут быть описаны с использованием фрагментов ориентированных параметрических кривых или поверхностей, а также при помощи логических эйлеровых операций [11–13]. Актуальные научные исследования [14–17] посвящены оптимизации рендеринга поверхностей сплошных тел при использовании граничных моделей в качестве примитивов конструктивной блочной геометрии.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

1. Двумерные области

Пусть простая замкнутая граница некоторой двумерной области представлена параметрической кривой (которая может быть также составной или сплайном)

$$\text{curve}(t) = \mathbf{p} + x(t)\mathbf{i} + y(t)\mathbf{j}, \quad t_0 \leq t \leq t_1, \quad (4)$$

Нахождение расстояния от произвольной точки пространства до ближайшей точки кривой – задача весьма экстенсивная, поэтому заменим кривую $\text{curve}(t)$ ее дискретной моделью для приблизительного вычисления функции (1).

Пусть дискретная модель кривой – это плоский граф, представленный списком n ребер

$$\mathbf{E}_2 = \{e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1})\}, \quad i = \overline{1, n},$$

тогда функция (1) примет вид

$$\begin{aligned} \text{dist}(x, y, \text{curve}(t)) &= \text{dist}(\mathbf{p}, \text{curve}(t)) \approx \text{dist}_2(\mathbf{p}, \mathbf{E}_2) = \\ &= \min_{e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1}) \in \mathbf{E}_2} d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1}), \end{aligned} \quad (5)$$

В формуле (5) для определения расстояния от точки $\mathbf{p}$ до отрезка, заданного точками $\mathbf{p}_{i0}$ и $\mathbf{p}_{i1}$ (вершины ребра $e_i = (\mathbf{p}_{i0}; \mathbf{p}_{i1})$), использована функция $d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1})$, которая может быть представлена формулой

$$d_2(\mathbf{p}, \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1}) = \begin{cases} \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}\|, & \text{если } \langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle \leq 0, \\ \|\mathbf{p} - \mathbf{p}_{i1}\|, & \text{если } \langle \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle \leq \langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle, \\ \left\| \mathbf{p} - \left(\mathbf{p}_{i0} + \frac{\langle \mathbf{p} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle}{\langle \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}, \mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0} \rangle} (\mathbf{p}_{i1} - \mathbf{p}_{i0}) \right) \right\|, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (6)$$

Стоит отметить, что функцию (6) можно использовать для нахождения расстояния от точки до отрезка в трехмерном случае [18].

Очевидно, что с увеличением числа ребер в графе $\mathbf{E}_2$ точность формулы (5) будет увеличиваться. Однако кривизна кривой $\text{curve}(t)$ может быть переменной, следовательно, для достижения наилучшей аппроксимации необходимо обеспечить сгущение ребер в области наибольшей кривизны. В таком случае можно воспользоваться следующим алгоритмом.

Алгоритм nonuniform-curve-mesh

Входные данные:

$\text{curve}(t)$, $t_0 \leq t \leq t_1$, – формула кривой, описывающая границу; $n \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура;

Инициализация:

Построим $\mathbf{E}_t = \{e_i = (t_{i0}; t_{i1})\}$, $t_{i0} = t_0 + ih$,

$$t_{i1} = t_0 + (i+1)h, \quad h = \frac{t_1 - t_0}{n-1}, \quad i = \overline{0, n-2} \quad \text{– равномерную}$$

дискретную модель кривой $\text{curve}(t)$ в параметрическом пространстве;

Повторять:

Для каждого $e_i = (t_{i0}; t_{i1}) \in \mathbf{E}_t$:

Если отклонение ребра от границы $> \delta$ то удалить

ребро e_i и добавить два новых ребра: $\left(t_{i0}; \frac{t_{i0} + t_{i1}}{2}\right)$ и

$$\left(\frac{t_{i0} + t_{i1}}{2}; t_{i1}\right);$$

До тех пор пока были вставки новых ребер;

Вернуть $\mathbf{E}_2 = \{e_i = (\text{curve}(t_{i0}); \text{curve}(t_{i1}))\}$, $i = \overline{1, |\mathbf{E}_t|}$;

В результате будет построена адаптивная дискретная модель, которую можно использовать для аппроксимации по формуле (5).

Например, область, ограниченная замкнутой кривой

$$\text{Безье } \text{cbezier}(t) = \sum_{i=0}^9 B_i^9(t) P_i, \quad 0 \leq t \leq 1, \quad \text{построенной на}$$

последовательности из 10 контрольных точек: $\mathbf{p}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{p}_1 = (0; 3)$, $\mathbf{p}_2 = (1; 3)$, $\mathbf{p}_3 = (1; 1)$, $\mathbf{p}_4 = (4; 1)$, $\mathbf{p}_5 = (4; -1)$, $\mathbf{p}_6 = (1; -1)$, $\mathbf{p}_7 = (1; -3)$, $\mathbf{p}_8 = (0; -3)$ и $\mathbf{p}_9 = (0; 0)$, при $t_0 = 0$ и $t_1 = 1$, $n = 41$ и $\delta = 0,02$ будет представлена дискретной моделью, изображенной на рис. 1.

Граф $\mathbf{E}_2$, по сути, является замкнутым многоугольником, аппроксимирующим кривую. В соответствии с теоремой Жордана для построения функции (2) можно воспользоваться тестом четности, возможно, первая реализация которого рассмотрена в работе [19]. Он состоит в том, что из точки P выпускается луч, например, в положительном направлении оси Ox , тогда для определения принадлежности точки многоугольнику достаточно подсчитать число c – количество пересечений луча и ребер графа. Единственный вырожденный случай будет, если луч пересекает ребра в вершине. В таком случае используется такой прием: ребро считается пересеченным, если одна его вершина строго ниже луча, а вторая выше или лежит на луче. В результате функция (2) примет вид

$$\begin{aligned} \text{sign}(x, y, \text{curve}(t)) &= \text{sign}(\mathbf{p}, \text{curve}(t)) \approx \text{sign}_2(\mathbf{p}, \mathbf{E}_2) = \\ &= \begin{cases} +1, & \text{если } c \text{ нечетное,} \\ -1, & \text{иначе.} \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

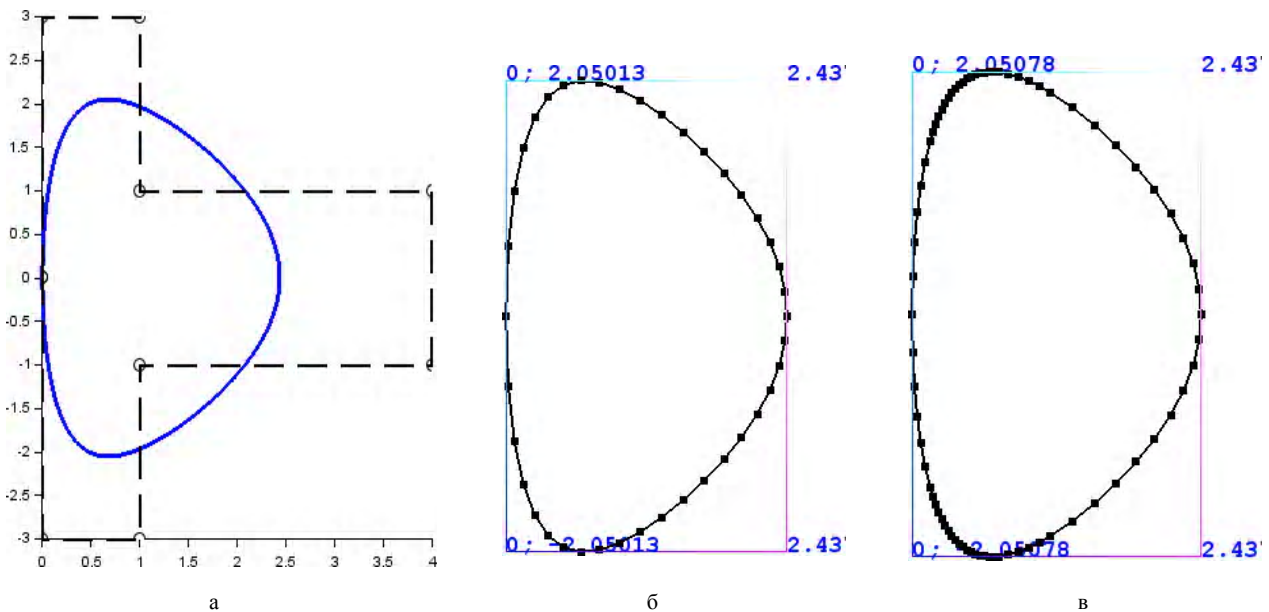


Рисунок 1 – Замкнутая кривая Безье:

а – исходная кривая и ее контрольные точки; б – начальная дискретная модель контура; в – адаптивная дискретная модель контура

Таким образом, абсолютное значение функции (3) может быть определено при помощи формул (5) и (6) с некоторой точностью, определяемой параметрами метода: количеством точек в начальной дискретной модели контура n и параметром точности аппроксимации δ . При этом знак этой функции может быть определен при помощи теста четности (7). Например, для приведенной выше кривой Безье (рис. 1) распределение значений аппроксимации функции (3) при $n = 41$ и $\delta = 0,02$ примет вид, представленный на рис. 2.

2. Трехмерные области

Пусть простая замкнутая граница некоторой трехмерной области задана M лоскутами (патчами, англ. patches), являющимися параметрическими поверхностями вида:

$$\text{surface}_l(u, v) = \mathbf{q} + x(u, v)\mathbf{i} + y(u, v)\mathbf{j} + z(u, v)\mathbf{k}, \\ u_{l0} \leq u \leq u_{l1}, \quad v_{l0} \leq v \leq v_{l1} \quad l = \overline{1, m}.$$

Как и в двумерном случае, лоскуты $\text{surface}_j(u, v)$, в том числе, могут быть сплайнами или составными поверхностями.

Для нахождения расстояния от произвольной точки пространства до ближайшей точки поверхности построим дискретную модель границы области, используя треугольные элементы. К такой дискретной модели предъявляется только требование согласованности узлов (и ребер в порядке их обхода) элементов.

Пусть дискретная модель поверхности – это множество из n треугольных элементов, нормаль к которым (в порядке обхода узлов) направлена наружу геометрического объекта:

$$\mathbf{E}_3 = \{tr_i = (\mathbf{q}_{i0}; \mathbf{q}_{i1}; \mathbf{q}_{i2})\}, \quad i = \overline{1, n}.$$

В таком случае в формуле (1) для приближенного ее вычисления граница $\mathbf{L}$ может быть заменена дискретной моделью $\mathbf{E}_3$:

$$\text{dist}(x, y, z, \mathbf{L}) = \text{dist}(\mathbf{q}, \mathbf{L}) \approx \text{dist}_3(\mathbf{q}, \mathbf{E}_2) = \\ = \min_{t_i = (\mathbf{q}_{i0}; \mathbf{q}_{i1}; \mathbf{q}_{i2})} d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}) \quad (8)$$

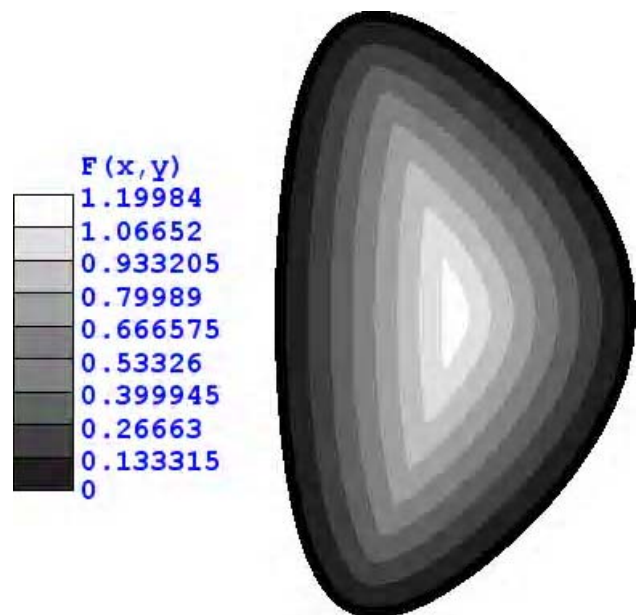


Рисунок 2 – Распределение значений функции (3) в области, ограниченной кривой Безье

В формуле (8) $d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2})$ – функция для определения расстояния от точки $\mathbf{q}$ до треугольника, заданного точками $\mathbf{q}_{i0}$, $\mathbf{q}_{i1}$ и $\mathbf{q}_{i2}$, которая может быть представлена формулой

$$d_3(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}) = \begin{cases} |l|, & v_0 \geq 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i0}, & v_0 < 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 < 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i1}, & v_0 < 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i2}, & v_0 \geq 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 < 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{q}_{i1}), & v_0 < 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i1}, \mathbf{q}_{i2}), & v_0 \geq 0 \wedge v_1 < 0 \wedge v_2 \geq 0, \\ d_2(\mathbf{q}, \mathbf{q}_{i2}, \mathbf{q}_{i0}), & v_0 \geq 0 \wedge v_1 \geq 0 \wedge v_2 < 0. \end{cases} \quad (9)$$

В формуле (9): $v_0 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{01}, \mathbf{c}_0] \rangle$, $v_1 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{12}, \mathbf{c}_1] \rangle$ и $v_2 = \langle \mathbf{n}, [\mathbf{e}_{20}, \mathbf{c}_2] \rangle$ – значения, используемые для определения взаимного расположения точки и вершин треугольника; $\mathbf{e}_{01} = \mathbf{q}_{i1} - \mathbf{q}_{i0}$, $\mathbf{e}_{12} = \mathbf{q}_{i2} - \mathbf{q}_{i1}$ и $\mathbf{e}_{20} = \mathbf{q}_{i0} - \mathbf{q}_{i2}$ – векторы, образованные сторонами треугольника; $\mathbf{n} = [\mathbf{e}_{01}, -\mathbf{e}_{20}]$ – внешняя нормаль к плоскости треугольника; $l = \frac{\langle \mathbf{q} - \mathbf{q}_{i0}, \mathbf{n} \rangle}{\|\mathbf{n}\|}$ – кратчайшее расстояние от вершины $\mathbf{q}$ до плоскости треугольника; $\mathbf{b} = \mathbf{q} - \frac{l}{\|\mathbf{n}\|} \mathbf{n}$ – радиус-вектор проекции точки $\mathbf{q}$ на плоскость треугольника; $\mathbf{c}_0 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i0}$, $\mathbf{c}_1 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i1}$ и $\mathbf{c}_2 = \mathbf{b} - \mathbf{q}_{i2}$ – векторы, направленные из вершин треугольника в $\mathbf{b}$.

С точки зрения рациональности использования необходимых для вычисления формулы (8) компьютерных ресурсов, как и в двумерном случае, граф E_3 должен быть адаптивным к кривизне границы. Построение такого графа для множества параметрических лоскутов можно выполнить при помощи следующего алгоритма.

Алгоритм nonuniform-surface-mesh

Входные данные:

M – количество лоскутов;
 $\text{surface}_l(u, v)$, $u_{l0} \leq u \leq u_{l1}$, $v_{l0} \leq v \leq v_{l1}$, $l = \overline{1, M}$ – формула поверхности каждого лоскута; $n_l \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура вдоль абсциссы параметрических координат; $m_l \geq 2$ – количество узлов в начальной дискретной модели контура вдоль ординаты параметрических координат

Инициализация:

$E_3 = \emptyset$;

Для $l = 1, \dots, M$:

Для $i = 0, \dots, n_l$:

Для $j = 0, \dots, m_l$:

$$\mathbf{p}_{ij} = \left(u_{l0} + i \frac{u_{l1} - u_{l0}}{n_l - 1}; v_{l0} + j \frac{v_{l1} - v_{l0}}{m_l - 1} \right);$$

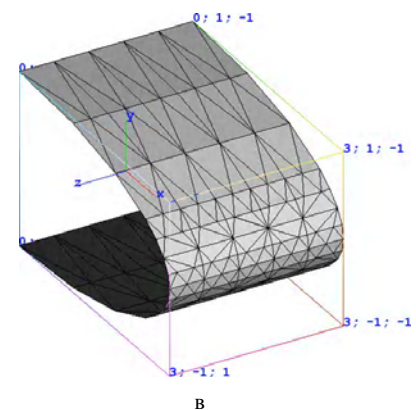
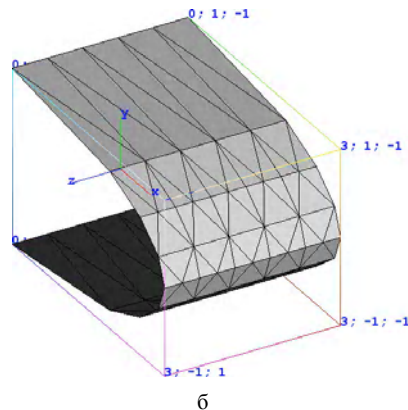
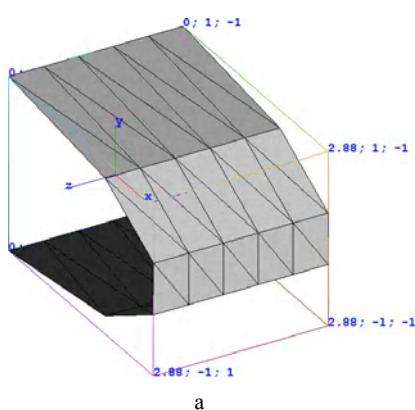


Рисунок 3 – Дискретизация лоскута при $n_l = 6$, $m_l = 6$: а – без адаптации к кривизне; б – адаптация к кривизне при $\delta = 0,1$; в – адаптация к кривизне при $\delta = 0,05$

$E_{3l} = \emptyset$;

для $i = 0, \dots, n_l - 1$:

для $j = 0, \dots, m_l - 1$:

Если $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j}$ и $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j}$ и $\mathbf{p}_{i+1j} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$, тогда:

$$E_{3l} = E_{3l} \cup (\mathbf{p}_{ij}; \mathbf{p}_{i+1j}; \mathbf{p}_{i+1j+1});$$

Если $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$ и $\mathbf{p}_{ij} \neq \mathbf{p}_{ij+1}$ и $\mathbf{p}_{ij+1} \neq \mathbf{p}_{i+1j+1}$, тогда:

$$E_{3l} = E_{3l} \cup (\mathbf{p}_{ij}; \mathbf{p}_{i+1j+1}; \mathbf{p}_{ij+1});$$

Повторять:

Для каждого $tr = (\mathbf{p}_0; \mathbf{p}_1; \mathbf{p}_2) \in E_{3l}$:

Если отклонение ребра $\mathbf{p}_0 \mathbf{p}_1$ от границы $> \delta$, тогда в

множество E_{3l} вставить узел с координатами $\frac{\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_1}{2}$ и обновить триангуляцию

Иначе если отклонение ребра $\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2$ от границы $> \delta$ тогда в множество E_{3l} вставить узел с координатами

$$\frac{\mathbf{p}_0 + \mathbf{p}_1}{2} \text{ и обновить триангуляцию}$$

Иначе если отклонение ребра $\mathbf{p}_2 \mathbf{p}_0$ от границы $> \delta$, тогда в множество E_{3l} вставить узел с координатами

$$\frac{\mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_0}{2} \text{ и обновить триангуляцию;}$$

До тех пор, пока были вставки новых ребер;

$$E_{tl} = \{tr_i = (\text{surface}(\mathbf{p}_{i0}); \text{surface}(\mathbf{p}_{i1}); \text{surface}(\mathbf{p}_{i2}))\},$$

$$i = \overline{1, |E_{3l}|};$$

$$E_3 = E_3 \cup E_{tl};$$

Вернуть E_3 ;

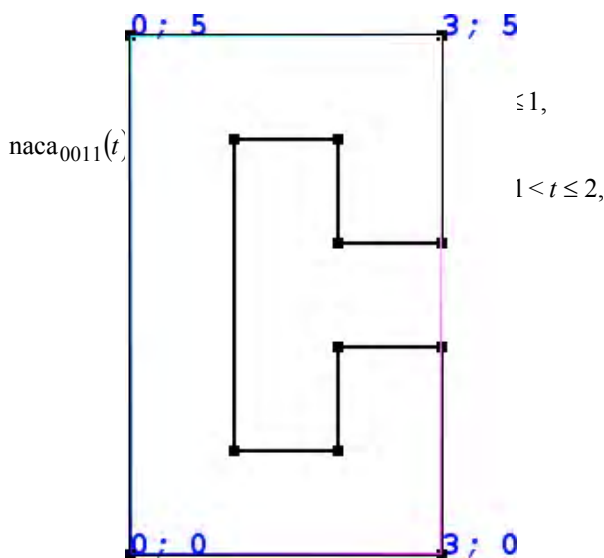
Операция вставки узла и обновления триангуляции в простейшем случае предполагает удаление треугольников, соседних в обрабатываемом ребре, и добавление новых соединением вершин образовавшегося многоугольника со вставляемым в середину ребра узлом. В результате выполнения алгоритма будет построена адаптивная к кривизне поверхности дискретная модель (некоторые примеры адаптации приведены рис. 3), которую можно использовать для аппроксимации по формуле (8)

Результатом работы алгоритма nonuniform-surface-mesh, входными данными которого являются лоскуты ограниченной замкнутой поверхности, будет замкнутый многогранник с треугольными гранями. Для определения знака функции расстояния в точке $\mathbf{q} = (x_q; y_q; z_q)$ на первом шаге строятся многоугольники, образованные сечением многогранника плоскостью $z = z_q$ (аналогично двумерному случаю для устранения возможных вырожденных случаев, определенных касанием плоскостью треугольника, считается, что треугольник пересекается плоскостью, если хотя бы один узел строго глубже и хотя бы один ближе или в плоскости $z = z_q$). Затем используется процедура подсчета числа c – пересечений луча и многоугольника, полностью эквивалентная двумерному случаю. В результате функция определения знака примет вид (7).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Если исходной кривой будет, например, многоугольник, определенный замкнутой ломанной $\text{segments}(t) = (1-w)\mathbf{p}_i + w\mathbf{p}_{i+1}$, $w = t - i$, $i = \lfloor t \rfloor$, $0 \leq t \leq 12$ с последовательностью вершин $\mathbf{p}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{p}_1 = (3; 0)$, $\mathbf{p}_2 = (3; 2)$, $\mathbf{p}_3 = (2; 2)$, $\mathbf{p}_4 = (2; 1)$, $\mathbf{p}_5 = (1; 1)$, $\mathbf{p}_6 = (1; 4)$, $\mathbf{p}_7 = (2; 4)$, $\mathbf{p}_8 = (2; 3)$, $\mathbf{p}_9 = (3; 3)$, $\mathbf{p}_{10} = (3; 5)$, $\mathbf{p}_{11} = (0; 5)$, $\mathbf{p}_{12} = (0; 0)$, при $t_0 = 0$, $t_1 = 12$ и $n = 13$ (значение параметра δ в данном случае не влияет на результат), то распределение значений функции (3) примет вид, представленный на рис. 4.

В работах [20, 21] рассмотрены особенности моделирования профилей крыльев с использованием кривых Безье. Полученные в этих работах результаты позволяют исследовать аэродинамические свойства, но в задачах исследования прочности необходимо учитывать также технологические отверстия. Например, симметричный профиль NACA 0011 (рис. 5) может быть представлен составной кривой [20]



$$\text{naca}_{0011}(t) = \begin{cases} \sum_{i=0}^5 \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \mathbf{t}_i, & 0 \leq t \leq 1, \\ \sum_{i=0}^n \frac{n!}{i!(n-i)!} (t-1)^i (2-t)^{n-i} \mathbf{b}_i, & 1 < t \leq 2, \end{cases}$$

с контрольными точками: $\mathbf{t}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{t}_1 = (1, 14034; 2, 44284)$, $\mathbf{t}_2 = (11, 1025; 3, 65375)$, $\mathbf{t}_3 = (30, 8809; 1, 13309)$, $\mathbf{t}_4 = (39, 9276; 0, 09712)$, $\mathbf{t}_5 = (40; 0)$ (верхний изгиб крыла) и $\mathbf{b}_0 = (0; 0)$, $\mathbf{b}_1 = (1, 14034; -2, 44284)$, $\mathbf{b}_2 = (11, 1025; -3, 65375)$, $\mathbf{b}_3 = (30, 8809; -1, 13309)$, $\mathbf{b}_4 = (39, 9276; -0, 09712)$, $\mathbf{b}_5 = (40; 0)$ (нижний изгиб крыла).

Стоит отметить, что функции вида (3), построенные для контуров двумерных областей, могут быть использованы в качестве операндов (примитивов) R-операций вместе с рассмотренными выше неявными функциями. Например, профиль крыла с тремя технологическими отверстиями (рис. 6) можно представить функцией

$$f_{\text{naca}}(x, y) = \text{distance}(x, y, \text{naca}_{0011}(t)) \wedge \neg \text{rectangle}(x - x_1, y, w_1, h_1) \wedge \neg \text{circle}(x - x_2, y, r_2) \wedge \neg \text{rectangle}(x - x_3, y, w_3, w_3),$$

$$\text{где функция } \text{rectangle}(x; y; w; h) = \left[1 - \left(\frac{2}{w} x \right)^2 \right] \wedge \left[1 - \left(\frac{2}{h} y \right)^2 \right],$$

$w > 0$, $h > 0$ соответствует области, ограниченной прямоугольником шириной w и высотой h с центром в начале координат; функция $\text{circle}(x; y; r) = 1 - \frac{x^2 + y^2}{r^2}$

представляет область, ограниченную окружностью радиуса r с центром в начале координат; $x_1, x_2, x_3, w_1, h_1, r_2, w_3$ – параметры положения и размеров отверстий.

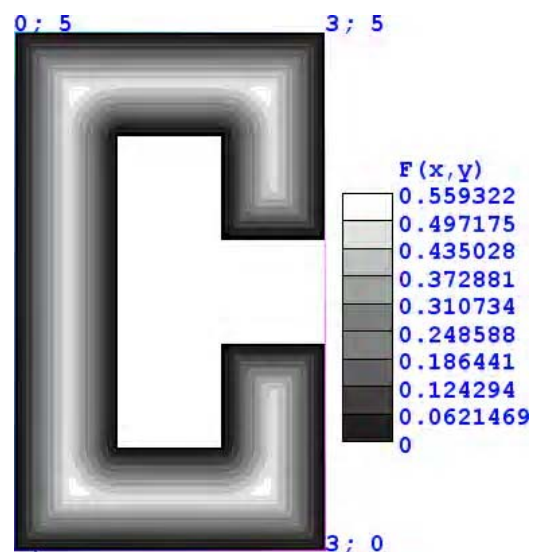


Рисунок 4 – Распределение значений функции (3) для многоугольника

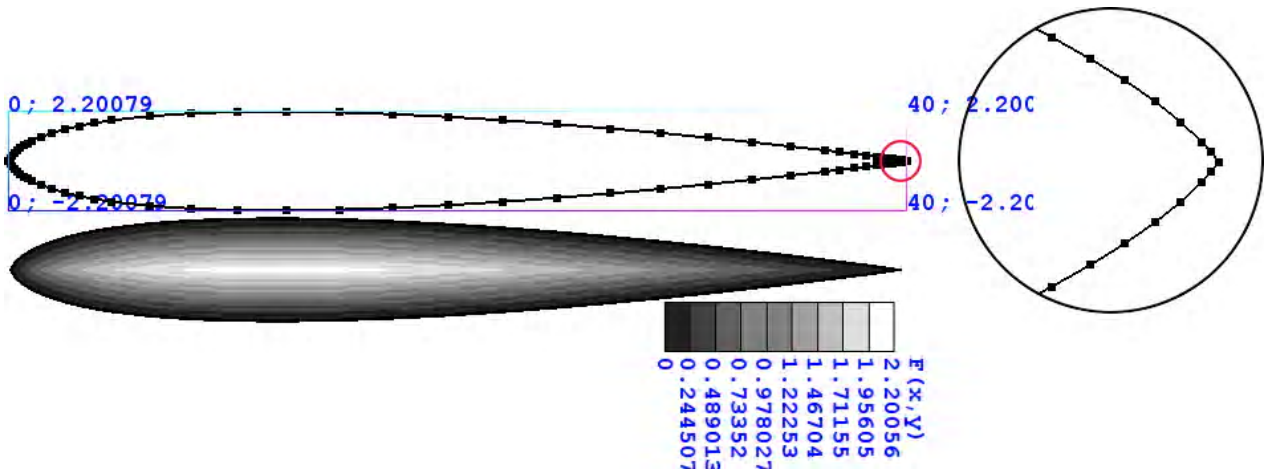
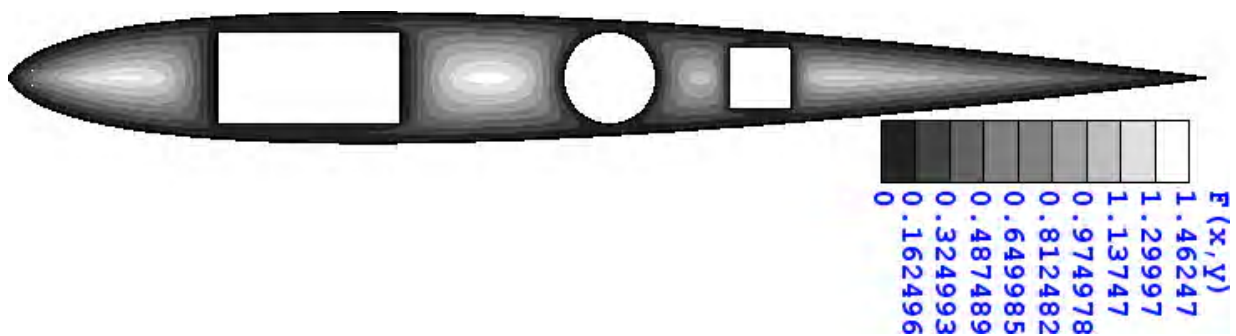


Рисунок 5 – Профиль NASA 0011: дискретная модель контура и распределение значений функции (3)

Рисунок 6 – Профиль NASA 0011 с технологическими отверстиями: $x_1 = 10$, $x_2 = 20$, $x_3 = 25$, $w_1 = 6$,

$$h_1 = 3, r_2 = 1,5, w_3 = 2$$

Рассмотрим поверхность модели летательного (рис. 7), определенного шестью лоскутами (поверхностями Безье) с контрольными точками, заданными матрицами:

$$A = \begin{bmatrix} (0; -4; 0) & (0; -3,9; 0,01) & (0; -1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \\ (4; -2; 0) & (4; -1,9; 0,01) & (4; -0,1; 0,4) & (4; 0; 3) \\ (7; -3; 0) & (7; -2,9; 0,01) & (7; -0,1; 0,4) & (2; 0; 1) \\ (8; -1; 0) & (8; -0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} (8; 1; 0) & (8; 0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \\ (7; 3; 0) & (7; 2,9; 0,01) & (7; 0,1; 0,4) & (2; 0; 1) \\ (4; 2; 0) & (4; 1,9; 0,01) & (4; 0,1; 0,4) & (4; 0; 3) \\ (0; 4; 0) & (0; 3,9; 0,01) & (0; 1,1; 0,4) & (4; 0; 3) \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} (8; -1; 0) & (8; -0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \\ (7; -3; 0) & (7; -2,9; -0,01) & (7; -0,1; -0,4) & (7; 0; -0,4) \\ (4; -2; 0) & (4; -1,9; -0,01) & (4; -0,1; -0,4) & (4; 0; -0,4) \\ (0; -4; 0) & (0; -3,9; -0,01) & (0; -1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \end{bmatrix},$$

$$D = \begin{bmatrix} (0; 4; 0) & (0; 3,9; -0,01) & (0; 1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \\ (4; 2; 0) & (4; 1,9; -0,01) & (4; 0,1; -0,4) & (4; 0; -0,4) \\ (7; 3; 0) & (7; 2,9; -0,01) & (7; 0,1; -0,4) & (7; 0; -0,4) \\ (8; 1; 0) & (8; 0,9; 0) & (8; 0; 0) & (8; 0; 0) \end{bmatrix},$$

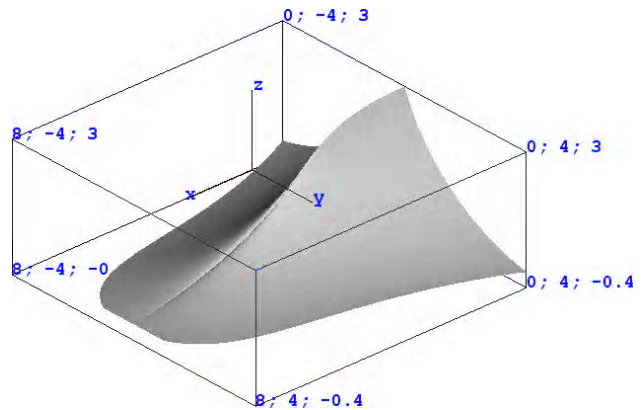


Рисунок 7 – Поверхность летательного аппарата

$$E = \begin{bmatrix} (0; -4; 0) & (0; -3,9; -0,01) & (0; -1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \\ (0; -4; 0) & (0; -3,9; 0,01) & (0; -1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \end{bmatrix},$$

$$F = \begin{bmatrix} (0; 4; 0) & (0; 3,9; 0,01) & (0; 1,1; 0,4) & (0; 0; 3) \\ (0; 4; 0) & (0; 3,9; -0,01) & (0; 1,1; -0,4) & (0; 0; -0,4) \end{bmatrix}.$$

Поверхность каждого такого лоскута, заданного матрицей контрольных точек Q (размером $n \times m$), описывается известной параметрической формулой:

$$\text{sbezier}(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_i^n(u) B_j^m(v) Q_{ij},$$

$$0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1.$$

Распределения значений функции расстояния со знаком для модели летательного аппарата в сечениях плоскостями $y = 0$ и $z = 0$, соответственно представлены на рис. 8а и 8б.

Как и в двумерном случае, трехмерные функции расстояния могут выступать в качестве операндов R-операций для определения более сложных объектов. Например, для представления модели летательного аппарата в виде, представленном на рис. 9, может быть использована формула

$$F(x, y, z) = \text{distance}(x, y, z, \text{surface}(A, B, C, D, E, F)) \wedge \text{Torp}(x, y - 1.5, z) \wedge \text{Torp}(x, y + 1.5, z), \quad (10)$$

$$\text{Torp}(x, y, z) = x \wedge (r^2(x) - y^2 - z^2) \wedge (4 - x),$$

$$r(x) = \begin{cases} 1 - 0.5x, & x \leq 1, \\ 0.5, & 1 < x \leq 3, \\ 0.5 - 0.5(x - 3), & 3 < x. \end{cases}$$

Распределение значений функции (10) в сечении плоскостью $z = 0$ изображено на рис. 10.

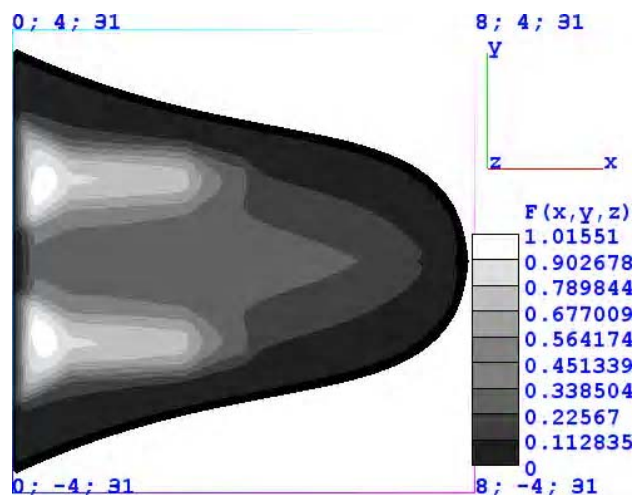
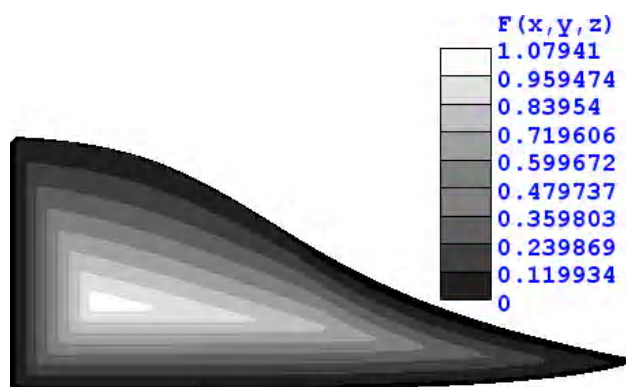
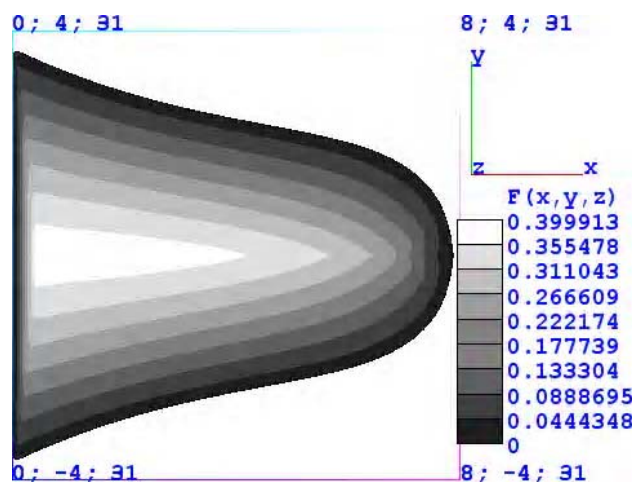


Рисунок 10 – Распределение значений функции (10) в сечении плоскостью



а



б

Рисунок 8 – Распределение значений функции расстояния со знаком в сечениях

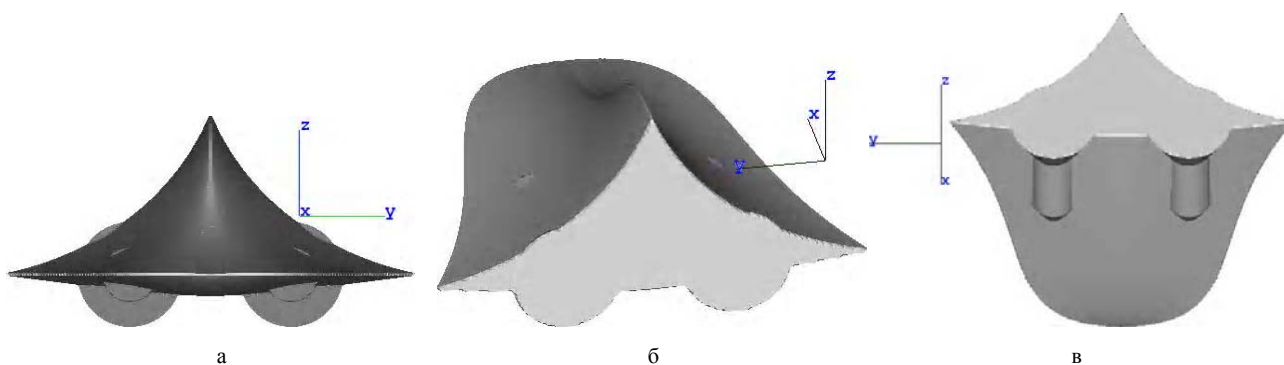


Рисунок 9 – Модель летательного аппарата

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, предложенный математический аппарат позволяет использовать области, границы которых определены при помощи параметрических функций, в качестве операндов R-операций. Полученные модели можно рассматривать как гибридные, совмещающие функциональное представление на базе неявных функций и граничное представление на базе параметрических функций.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В отличие от существующих работ [4–10], посвященных моделированию геометрических объектов с использованием теории неявных функций и R-функций, предложенный подход позволяет проще описывать области, ограниченные кривыми или поверхностями Безье, b-сплайнами или NURBS. Переход от граничного представления области к дискретному позволяет сравнительно просто автоматизировать данный математический аппарат. Недостатком такого перехода является экстенсивность необходимых вычислений.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе решена актуальная проблема повышение эффективности и адекватности математического моделирования сложных тел. Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что получил дальнейшее развитие функциональный подход, основанный на базе неявных функций и теории R-функций, в части упрощения построения моделей областей, представленных гранично на базе параметрических функций. Практическая значимость результатов заключается том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, на основе которого решены задачи построения моделей сложных тел. Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы оптимизировать вычисление функций расстояния со знаком, например, при помощи технологий параллельных вычислений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы № 3/15 «Математическое моделирование конструкций неоднородной структуры на базе современных информационных технологий» (№ гос. регистрации: 0115U000761).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Requicha A. A. G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems / A. A. G. Requicha // *Computing Surveys*. – 1980. – Volume 12, No 4. – P. 437–464. DOI: 10.1145/356827.356833
2. Requicha A. A. G. Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment / A. A. G. Requicha, H. B. Voelcker // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1982. – Volume 2, Issue 2. – P. 9–24. DOI: 10.1109/MCG.1982.1674149
3. Requicha A. A. G. Solid Modeling: Current Status and Research Directions / A. A. G. Requicha, H. Voelcker // *IEEE Computer Graphics and Applications*. – 1983. – Volume 3, Issue 7. – P. 25–37. DOI: 10.1109/MCG.1983.26327
4. Рвачев В. Л. Теория R-функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К. : Наукова Думка, 1982. – 552 с.
5. Рвачев В. Л. Применение метода R-функций к построению уравнений локусов, обладающих симметрией / В. Л. Рвачев, В. Шапиро, Т. И. Шейко // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 1999. – 4, № 4. – С. 4–20.
6. Рвачев В. Л. Введение в теорию R-функций / В. Л. Рвачев, Т. И. Шейко // *Проблемы машиностроения*. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 46–58.
7. Максименко-Шейко К. В. Автоматизация построения уравнений геометрических объектов в методе R-функций / К. В. Максименко-Шейко, А. М. Мацевитый, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2006. – № 2. – С. 148–157.
8. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов, обладающих симметрией / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2008. – № 6. – С. 75–83.
9. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Вісник Запорізького національного університету : збірник наукових праць. Фізико-математичні науки*. – 2010. – № 1. – С. 98–104.
10. Максименко-Шейко К. В. Математическое моделирование геометрических фракталов с помощью R-функций / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // *Кибернетика и системный анализ*. – 2012. – Т. 48. – № 4. – С. 155–162.
11. Stroud I. Boundary Representation Modelling Techniques / Ian Stroud. – London : Springer, 2006. – 808 p. – ISSN: 1846283124.
12. Vaněček G. Brep-index: A Multidimensional Space Partitioning Tree / George Vaněček Jr. // *International Journal of Computational Geometry & Applications*. – 1991. – Volume 1, Issue 3. – P. 243–261. DOI: 10.1142/S0218195991000189
13. Quadros W. R. Defeaturing CAD models using a geometry-based size field and facet-based reduction operators / W. R. Quadros, S. J. Owen // *Engineering with Computers*. – 2012. – Volume 28, Issue 3. – P. 211–224. DOI: 10.1007/s00366-011-0252-8
14. Hable J. Blister: GPU-based rendering of Boolean combinations of free-form triangulated shapes / J. Hable, J. Rossignac // *ACM Transactions on Graphics*. – 2005. – Volume 24, Issue 3. – P. 1024–1031. DOI: 10.1145/1073204.1073306
15. Hable J. CST: constructive solid trimming for rendering BReps and CSG / J. Hable, J. Rossignac // *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. – 2007. – Volume 13, Issue 5. – P. 1004–1014. – DOI: 10.1109/TVCG.2007.70411
16. Rossignac J. Direct rendering of Boolean combinations of self-trimmed surfaces / J. Rossignac, I. Fudos, A. Vasilakis // *Computer-Aided Design*. – 2013. – Volume 45, Issue 2. – P. 288–300. DOI: 10.1016/j.cad.2012.10.012
17. Deferred boundary evaluation of complex CSG models / [C. J. Ogayar-Anguita, Á.L. García-Fernández, F. R. Feito-Higuera, R. J. Segura-Sánchez] // *Advances in Engineering Software*. – 2015. – Volume 85, Issue C. – P. 51–60. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.003
18. Schneider Ph. Geometric Tools for Computer Graphics (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics) / Philip Schneider, David H. Eberly. – San Francisco : Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Science, 2003. – 1056 p.
19. Shimrat M. Algorithm 112: Position of Point Relative to Polygon / M. Shimrat // *Communications of the ACM*. – 1962. – Volume 5, Issue 8. – P. 434. DOI: 10.1145/368637.368653
20. Fazil J. Investigation of Airfoil Profile Design using Reverse Engineering Bezier Curve / J. Fazil, V. Jayakumar // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2011. – Volume 6, No 7. – P. 43–52.
21. Parasaram R. K. N. Airfoil Profile Design by Reverse Engineering Bezier Curve / R. Kr. N. Parasaram, T. N. Charyulu // *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. – 2012. – Volume 1, No 3. – P. 410–420.

Статья поступила в редакцию 09.03.2017.

После доработки 29.05.2017.

Чопоров С. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна

ГІБРИДНЕ ПОДАННЯ СУЦІЛЬНИХ ТІЛ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЯВНИХ І ПАРАМЕТРИЧНИХ ФУНКЦІЙ

Актуальність. Розглянута проблема подання суцільних тіл у системах автоматизації проектних робіт. Об'єктом дослідження є процес подання суцільних тіл у системах автоматизації проектних робіт.

Мета роботи – розробка гібридної схеми подання геометричних об'єктів, що використовує неявні функції R-операції та параметричні функції.

Метод. Для моделювання суцільних тіл у статті запропоновано гібридне подання. Під абстрактним поняттям «суцільне тіло» у роботі розуміються обмежені замкнені підмножини евклідова простору, які моделюють фізичні тіла, а під схемою подання – синтаксично та семантично коректне відношення між множиною формальних описів математичних моделей та множиною суцільних тіл. В основі гібридного подання покладено ідею одночасного використання граничного і функціонального подань. Вважається, що при граничному поданні, області визначаються власними границями, описаними за допомогою параметричних функцій, а при функціональному поданні – за допомогою неявних функцій з використанням положень теорії R-функцій. Для гібридного подання використовуються функції відстані зі знаком, які дозволяють розглядати області, описані параметричними функціями, як аргументи R-операцій (кон'юнкції, диз'юнкції або заперечення) у процесі побудови єдиної формули для складного тіла. Щоб у довільній точці обчислити відстань зі знаком до границі області, обмеженої параметричними функціями, запропоновано використовувати допоміжну побудову адаптивних дискретних моделей контурів. Відстань від точки до границі апроксимується відстанню від цієї точки до найближчого дискретного елементу. Для визначення знаку функції використовується тест парності.

Результати. Розроблена гібридна схема подання реалізована у програмному продукті, на основі якого вирішенні задачі побудови моделей складних тіл.

Висновки. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили коректність і працездатність запропонованого математичного забезпечення. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в оптимізації обчислення функції відстані зі знаком, наприклад, за допомогою технологій паралельних обчислень.

Ключові слова: суцільне тіло, неявна функція, R функція, параметрична функція, дискретна модель, функція відстані, тест парності, автоматизоване проектування.

Choporov S. V.

PhD, Associate Professor of Software Engineering Department, Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhya, Ukraine

HYBRID REPRESENTATION OF SOLIDS USING IMPLICIT AND PARAMETRIC FUNCTIONS

Context. The present article deals with the problem of representation of solids in computer-aided design. The object of the study is a process of representation of solids in computer-aided design.

Objective. The objective of the study is the development of a hybrid representation scheme which uses implicit functions, R-operations and parametric functions.

Method. In the article, a hybrid representation scheme has been suggested to model solids. An abstract notion “solid” denotes bounded and closed subsets of Euclidean space, which model physical bodies. A representation scheme is a syntactically and semantically correct relation between a set of formal models and a set of solids. It is supposed that boundary represented regions are defined by parametric functions. On the other hand, functionally represented regions are defined by implicit functions. The hybrid representation scheme is based on an idea of combining the boundary representation scheme with the functional representation scheme. The hybrid representation scheme uses a signed distance function to transform regions with parametric boundaries into implicitly defined regions. Adaptive discrete models are used to evaluate a signed distance from some point to a boundary of a region which boundaries are defined by parametric functions. A distance from a point to the closest discrete element approximates a distance from a point to a boundary of a region. The parity test has been used to define a sign of a distance.

Results. The developed hybrid representation scheme has been implemented in software and investigated for solving the problems of solid modeling.

Conclusions. Carried out numerical experiments have confirmed the proposed software operability. The prospects for further research may include the development of parallel methods for calculation of a signed distance function.

Keywords: solid, implicit function, R-function, parametric function, discrete model, distance function, parity test, computer-aided design.

REFERENCES

1. Requicha A. A. G. Representations for Rigid Solids: Theory, Methods, and Systems, *Computing Surveys*, 1980, Volume 12, No. 4, pp. 437–464. DOI: 10.1145/356827.356833
2. Requicha A. A. G., Voelcker H. B. Solid Modeling: A Historical Summary and Contemporary Assessment, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1982, Volume 2, Issue 2, pp. 9–24. DOI: 10.1109/MCG.1982.1674149
3. Requicha A. A. G., Voelcker H. Solid Modeling: Current Status and Research Directions, *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1983, Volume 3, Issue 7, pp. 25–37. DOI: 10.1109/MCG.1983.26327
4. Rvachev V. L. Teoriya R-funkcij i nekotorye ee prilozheniya. Kiev, Naukova Dumka, 1982, 552 p.
5. Rvachev V. L., Shapiro V., Shejko T. I. Primenenie metoda R-funkcij k postroeniyu uravnenij lokusov, obladayushhix simmetriey, *E'lektromagnitnye volny i e'lektronnye sistemy*, 1999, 4, No. 4, pp. 4–20.
6. Rvachev V. L., Shejko T. I. Vvedenie v teoriyu R-funkcij, *Problemy mashinostroeniya*, 2001, Vol. 4, No. 1–2, pp. 46–58.
7. Maksimenko-Shejko K. V., Macevityj A. M., Shejko T. I. Avtomatizaciya postroeniya uravnenij geometricheskix ob'ektov v metode R-funkcij, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2006, No. 2, pp. 148–157.

8. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskix ob"ektov, obladayushhix simmetriey, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2008, No. 6, pp. 75–83.
9. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskix ob"ektov v 3D po informacii v 2D, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovykh prac'. Fizyko-matematychni nauky*, 2010, No. 1, pp. 98–104.
10. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. Matematicheskoe modelirovanie geometricheskix fraktalov s pomoshh'yu R-funkcij, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2012, Vol. 48, No. 4, pp. 155–162.
11. Stroud I. Boundary Representation Modelling Techniques. London, Springer, 2006, 808 p. ISSN: 1846283124.
12. Vaněček G. Brep-index: A Multidimensional Space Partitioning Tree, *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 1991, Volume 1, Issue 3, pp. 243–261. DOI: 10.1142/S0218195991000189
13. Quadros W. R., Owen S. J. Defeaturing CAD models using a geometry-based size field and facet-based reduction operators, *Engineering with Computers*, 2012, Volume 28, Issue 3, pp. 211–224. DOI: 10.1007/s00366-011-0252-8
14. Hable J., Rossignac J. Blister: GPU-based rendering of Boolean combinations of free-form triangulated shapes, *ACM Transactions on Graphics*, 2005, Volume 24, Issue 3, pp. 1024–1031. DOI: 10.1145/1073204.1073306
15. Hable J., Rossignac J. CST: constructive solid trimming for rendering BReps and CSG, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2007, Volume 13, Issue 5, pp. 1004–1014. DOI: 10.1109/TVCG.2007.70411
16. Rossignac J., Fudos I., Vasilakis A. Direct rendering of Boolean combinations of self-trimmed surfaces, *Computer-Aided Design*, 2013, Volume 45, Issue 2, pp. 288–300. DOI: 10.1016/j.cad.2012.10.012
17. Ogayar-Anguita C. J., García-Fernández Á. L., Feito-Higueruela F. R., Segura-Sánchez R. J. Deferred boundary evaluation of complex CSG models, *Advances in Engineering Software*, 2015, Volume 85, Issue C, pp. 51–60. DOI: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.003
18. Schneider Ph. Eberly David H. Geometric Tools for Computer Graphics (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics). San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier Science, 2003, 1056 p.
19. Shimrat M. Algorithm 112: Position of Point Relative to Polygon, *Communications of the ACM*, 1962, Volume 5, Issue 8, P. 434. DOI: 10.1145/368637.368653
20. Fazil J., Jayakumar V. Investigation of Airfoil Profile Design using Reverse Engineering Bezier Curve, *ARPJ Journal of Engineering and Applied Science*, 2011, Volume 6, No. 7, pp. 43–52.
21. Parasaram R. K. N., Charyulu T. N. Airfoil Profile Design by Reverse Engineering Bezier Curve, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2012, Volume 1, No. 3, pp. 410–420.

МОДЕЛЮВАННЯ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ З ВИБУХОМ ХМАРИ ГАЗОПОВІТРЯНОЇ СУМІШІ

Актуальність. Науково обґрунтоване ранжування рівнів потенційної небезпеки технологічних установок газонафтопереробних підприємств є необхідним для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях їх життєвого циклу. Діяча в Україні нормативна та методична база є недостатньою щодо розв'язання задач забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки в сучасних умовах господарювання.

Мета. Побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці газонафтопереробного підприємства як інструментального засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

Метод. Проведено структурну та параметричну ідентифікацію інтегрального критерію, який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому та враховує особливості забудови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

Результати. В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку газонафтопереробного підприємства.

Висновки. Наукова новизна результатів полягає в тому, що запропонований метод становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Ключові слова: вибух, хмара газоповітряної суміші, рівень вибухонебезпеки, ймовірність виникнення надзвичайної ситуації.

НОМЕНКЛАТУРА

АГФУ – абсорбційна газофракціонуюча установка

ВНР – вибухонебезпечна речовина

ГНПП – газонафтопереробне підприємство;

ГПС – газоповітряні суміші;

ЕЛЗУ – електрознесолювальна установка;

НС – надзвичайна ситуація;

ПНО – потенційно-небезпечні об'єкти;

c_{vi} – концентрація ВНР у хмарі ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

c_{sti} – стехіометрична концентрація ВНР, що виникла при НС на i -му обладнанні, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{pi}(x, y, z, t)$ – функція розподілу концентрації ВНР в об'ємі хмари ГПС, який вибухає;

$c_{вкврпi}$ – верхня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

$c_{вкврпi}$ – нижня концентраційна межа розповсюдження полум'я, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$;

E^i – відносний енергетичний потенціал i -го технологічного обладнання;

i – номер технологічного обладнання;

I – кількість елементів технологічного обладнання в технологічному блоці;

I_i – імпульс хвилі тиску вибуху на i -ому об'єкті, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

F_2 – фактор, що входить до складу пробіт-функції Pr_2 ;

J – кількість одиниць технологічного обладнання, яке було зруйновано в результаті вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

K – коефіцієнт, що характеризує рівень руйнувань при вибухах;

k_{ij} – коефіцієнт, який залежить від ступеню пошкодження j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

L_{ij} – відстань між центром j -го технологічного обладнання та центром вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні;

M_{vi} – маса ВНР у хмарі, яка бере участь у вибуху, кг ;

n – тип обладнання технологічного блоку;

ΔP – надмірний тиск у фронті вибуху, Па ;

Pr_2 – пробіт-функція, яка визначає ймовірність руйнування споруд від вибуху;

p_{ij} – ймовірність повного руйнування j -го технологічного обладнання від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні;

Q_{HC}^{in} – ймовірність виникнення НС, яка супроводжується викидом та виникненням хмари ГПС, на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

Q_k^{in} – ймовірність розвитку НС по k -му типу;

Q_B^{in} – ймовірність вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС на i -му технологічному обладнанні n -го типу;

q_{iv} – ймовірність реалізації сценарію вибухового перетворення хмари ГПС;

q_{vi} – питома теплота згорання ВНР у викиді при НС на i -му обладнанні, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

q_T – питома енергія вибуху тринітротолуолу, $\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$;

R_i^{100} – радіус зони повних (100%) руйнувань від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, м ;

R_i^0 – радіус безпечної зони від вибуху хмари ГПС при НС на i -му обладнанні, м ;

S_{vi} – поверхня, на який досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{вкврпi}$;

S_{H_i} – поверхня, на який досягаються концентрація газоподібної ВНР, що вийшла у повітря при НС на i -му обладнанні, що дорівнює $c_{\text{норм}}^{\text{норм}}$;

t – час від початку НС (виникнення хмари ГПС) до вибуху, с;

V_{B_i} – об'єм хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, який вибухає, м^3 ;

v – сценарій розвитку НС;

$v_{\text{зв}}$ – швидкість звуку в повітрі, $\text{м}\cdot\text{с}^{-1}$;

W_i – тротиловий еквівалент вибуху при НС на i -му обладнанні;

α_{ij} – коефіцієнт, що враховує ступінь впливу ударної хвилі від вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му обладнанні, на j -е технологічне обладнання;

σ – ступінь розширення продуктів згорання;

Λ_i – частковий критерій рівня вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання;

Λ – інтегральний критерій рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в цілому;

λ_i – вагова функція i -го технологічного обладнання.

ВСТУП

Зростаюче в останні роки число техногенних НС на ГНПП свідчить про те, що існуюча структура нормативної бази в галузі техногенної безпеки не дозволяє достовірно оцінити рівень їх безпеки. Надзвичайні ситуації на цих об'єктах характеризуються великими об'ємами викидів ВНР, утворенням хмар ГПС, вибухами та пожежами, які приводять до руйнування або пошкодження будівель, споруд, установок.

Науково обгрунтоване ранжування рівнів потенційної безпеки технологічних установок ГНПП є необхідним для вирішення проблем забезпечення безпеки на всіх стадіях життєвого циклу підприємства. Діюча нормативна база в Україні містить не всі необхідні практичні рекомендації щодо визначення рівня та забезпечення вибухобезпеки об'єктів газонафтопереробки. При цьому слід відмітити складність та трудомісткість методик, відсутність статистичних даних, що дають кількісну оцінку рівню вибухонебезпеки технологічного обладнання та методики їх аналізу.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває задача підвищення точності існуючих методик та розробки нових ефективних підходів до визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки об'єктів газонафтопереробної галузі на основі комплексного аналізу кількісних характеристик надзвичайних ситуацій з вибухами хмар газоповітряних сумішей.

Основною структурною одиницею будь-якого ГНПП є технологічний блок, що являє собою групу апаратів (технологічного обладнання), які можуть бути відключені (ізолювані) від технологічної системи підприємства (виведені з технологічної схеми) без небезпечних змін режиму роботи суміжного технологічного обладнання [1]. Таким чином, рівень вибухонебезпеки підприємства в цілому є адитивною функцією від рівнів вибухонебезпеки окремих технологічних блоків.

Метою статті є побудова та аналіз математичної моделі техногенної НС з вибухом хмари газоповітряної суміші на технологічному блоці ГНПП як інструменталь-

ного засобу визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блока.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо НС з вибухом хмари ГПС, що виникла в результаті руйнування технологічної ємності, що містить горючу речовину в газоподібній фазі, в умовах технологічного блоку ГНПП.

НС характеризується повною розгерметизацією ємності, що супроводжується викидом певної кількості 8 тонн газу з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого газу.

Тоді задача визначення кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в заданих кліматичних умовах та геометричних характеристиках блоку полягає в побудові алгоритму пошуку ймовірностей p_{ij} , вагових функцій λ_i , що моделюють вплив вибуху НС на оточуючі елементи технологічного блоку та в цілому складають інтегральний критерій Λ вибухонебезпеки технологічного блоку.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналізу фізичних процесів, що відбуваються при вибухах хмар ГПС, які утворилися при руйнуванні технологічного обладнання, та їх впливу на навколишнє середовище присвячено багато робіт вітчизняних та закордонних дослідників [2–7].

Роботи [2, 3] містять результати математичного моделювання вибухів хмар газоповітряних та пароповітряних сумішей. У теорії вибуху розрізняють детонаційний та дефлаграційний механізми вибухового перетворення. Перший з них – це вибух, при якому запалення наступних шарів вибухової речовини відбувається в результаті стиснення і нагрівання ударною хвилею, такою, що ударна хвиля і зона хімічної реакції йдуть нерозривно одна за одною з постійною надзвуковою швидкістю. Дефлаграційним є вибух з енерговиділенням в об'ємі хмари горючих газоподібних сумішей і аерозолів при поширенні екзотермічної хімічної реакції з дозвуковою швидкістю.

У роботах [4–7] розглядаються питання визначення кількісних характеристик детонаційних та дефлаграційних вибухів вуглеводневих газів та їх сумішей з повітрям в умовах відкритого простору.

Питання аналізу наслідків цих вибухів ГПС у відкритому просторі досліджені меншою мірою. В Україні на даний час відсутній єдиний підхід до прогнозування можливих наслідків вибуху хмар ГПС на об'єктах газонафтопереробки. Вітчизняний нормативний документ [8] містить методику визначення параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом ВНР в результаті розгерметизації устаткування. Але дана методика не враховує склад вибухонебезпечної суміші та режим її вибуху.

Закордонні джерела [9, 10] при визначенні наслідків вибуху рекомендують розглядати детонаційний режим. Але за статистичними даними до 90% вибухів хмар ГПС відбувається за дефлаграційним механізмом. У роботі [11] розглядаються питання надійності технологічного обладнання потенційно-небезпечних об'єктів (ПНО) та дається аналіз причин виникнення НС, пов'язаних з відмовами технологічного обладнання.

Робота [12] присвячена розробці методики прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом газоповітряної хмари в умовах ГНПП. Методика містить розрахунок параметрів вибуху та оцінку ймовірності пошкодження або руйнування будівель, споруд та технологічних установок.

Аналіз рівня вибухонебезпеки технологічного блоку в умовах НС з викидами хмар ГПС та розробка методу її зниження передбачає визначення критерію Λ кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки блоку [1]. При цьому критерій Λ є інтегральним, побудова якого виконується на базі часткових критеріїв Λ_i , що кількісно характеризують рівні вибухонебезпеки технологічного обладнання (апаратів) різних типів у складі блоку. Тому при структурній та параметричній ідентифікації часткових критеріїв Λ_i є доцільним урахування особливостей за будови території, режиму вибуху, характеристик ВНР.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Проведемо визначення кількісної оцінки вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП. Покладемо, що технологічний блок, що є об'єктом дослідження, містить I одиниць технологічного обладнання (апаратів).

Приймаємо, що кожна i -а одиниця технологічного обладнання (апарату) технологічного блоку ГНПП, що розглядається у даному дослідженні, може бути n типів ($n = 1, 2, \dots, 5$) – колонне ($n=1$), ємнісне ($n=2$), насосне ($n=3$), теплообмінне ($n=4$) та пічне ($n=5$), рівень небезпеки яких є різним. Це обумовлено особливостями технології, кількістю та видом ВНР тощо.

Вважаємо також, що технологічний блок працює в штатному режимі, якщо усе обладнання справне, а режим НС настає при виході з ладу (повному руйнуванні) хоча б одного апарата, що супроводжується викидом всього вмісту ВНР.

В загальному випадку руйнування технологічного апарата супроводжується НС трьох видів: пожежа, вибух, викид.

Нехай Λ_i – частковий критерій, що кількісно характеризує рівень вибухонебезпеки i -го технологічного обладнання (апарата), $i=1, 2, \dots, I$. Для його визначення пропонується застосування енергетичного показника вибухонебезпеки за наступною формулою [12]:

$$\Lambda_i = E^i \cdot Q_{HC}^{in} \cdot Q_B^{in} \cdot q_{iv}, n \in \{1, 2, \dots, 5\}, v \in \{1, 2\}. \quad (1)$$

У цьому випадку ймовірність виникнення НС визначається в результаті обробки статистичних даних щодо розподілу аварій вказаного характеру для технологічних

апаратів одного типа, які функціонують у приблизно однакових умовах. У табл. 1 наведені усереднені дані по надійності технологічного обладнання двох блоків ГНПП: абсорбційної газофракціонуючої установки (АГФУ) та електрознесолювальної установки (ЕЛЗУ).

Основну небезпеку при НС на технологічному обладнанні ГНПП являють викиди стислих або скраплених вуглеводних газів. Як показують статистичні дослідження, при миттєвих викидах вуглеводнів горіння та вибух відбуваються практично завжди [12, 13].

У якості приклада в табл. 2 наведено оцінку ймовірності різних сценаріїв розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу ($n=1$) блоку АГФУ.

Останній стовпчик табл. 2 містить ймовірності q_{iv} виникнення при реалізації НС визначених типів того чи іншого сценарію розвитку НС на i -му обладнанні колонного типу.

Таким чином, для обладнання колонного типу блока АГФУ ймовірність Q_{HC}^1 вибухового перетворення хмари ГПС, яка виникла при НС з викидом стислого вуглеводневого газу, дорівнює $Q_{HC}^1 = 0,265$. При цьому, наприклад, ймовірності q_{1v} , які визначають ймовірність протікання вибуху за детонаційним (q_{11}) або дефлаграційним (q_{12}) механізмом, дорівнюють 0,0638 та 0,9362 відповідно.

У частині статті, що залишилася, зосередимось на першому типі НС (табл. 2), опускаючи індекс k .

Інтегральний критерій Λ , який характеризує вибухонебезпеку технологічного блоку в цілому, має вигляд [1]:

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \lambda_i \Lambda_i. \quad (2)$$

Вагові функції λ_i моделюють ступінь впливу вибуху на i -му технологічному апараті на сусіднє обладнання та визначаються як [1]

$$\lambda_i = 1 + \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j. \quad (3)$$

Таблиця 1 – Оцінка ймовірності виникнення НС з викидом ВНР на обладнанні ГНПП в залежності від типу n

Індекс обладнання, n	Тип обладнання	$Q_{HC}^{in}, \text{ рік}^{-1}$	
		АГФУ	ЕЛЗУ
1	Теплообмінне	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$1,92 \cdot 10^{-4}$
2	Ємнісне	$1,1 \cdot 10^{-4}$	$1,18 \cdot 10^{-4}$
3	Колонне	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,23 \cdot 10^{-4}$
4	Пічне	$1,8 \cdot 10^{-4}$	$1,81 \cdot 10^{-4}$
5	Насосне	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$

Таблиця 2 – Оцінка ймовірності розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу при руйнуванні обладнання колонного типу блоку АГФУ

Тип розвитку НС з викидом стислого вуглеводневого газу, k	Ймовірність розвитку НС по k -му типу, Q_k^{in}	Сценарій розвитку НС k -го типу, v	Ймовірність v -го сценарію розвитку НС по k -го типу, q_{ivk}
Вибух ($k=1$)	$Q_1^1 = Q_B^1 = 0,265$	Детонаційний вибух	0,0638
		Дефлаграційний вибух	0,9362
Пожежа ($k=2$)	0,7058	Горіння проливу	0,0407
		Вогняна куля	0,8770
		Факельне горіння	0,0823
Викид ($k=3$)	0,0292	Без горіння та вибуху	1,00

Коефіцієнти k_{ij} визначаються наступним чином:

$$k_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } L_{ij} \leq R_i^{100}, \\ p_{ij}, & \text{якщо } R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}, \\ 0, & \text{якщо } L_{ij} \geq R_i^0, \end{cases} \quad (4)$$

Відмітимо, що узагальнено ймовірність p_{ij} є оберненою нелінійною функцією відстані L_{ij} між об'єктами i та j .

Коефіцієнт α_{ij} впливу ударної хвилі на сусідні технологічні об'єкти, величина якого залежить від взаємної орієнтації об'єктів i та j , обчислюються з наступних міркувань:

1) для об'єктів у формі паралелепіпеду:

– найбільш небезпечній орієнтації стіни j -го об'єкту по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на i -му об'єкті відповідає найбільше значення $\alpha_{ij}^{\max}=1$. Таке ж значення α_{ij} буде відповідати куту $\theta = 0$, тому що при цьому суміжна стіна буде орієнтована по нормалі до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху;

– найбільш безпечній орієнтації стіни j -го об'єкту під кутом 45° до напрямку розповсюдження ударної хвилі вибуху на i -му об'єкті відповідає найменше значення $\alpha_{ij}^{\min}=0,9$;

– для інших значень кута θ величина α_{ij} має проміжні значення.

2) для об'єктів сферичної та циліндричної форми:

– значення коефіцієнту α_{ij} не залежить від кута θ та дорівнює $\alpha_{ij}=1,0$.

Для кількісного визначення величини коефіцієнтів α_{ij} у першому випадку пропонується застосування або тригонометричного залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 2,1 - (\sin \theta + \cos \theta) + 0,22 \sin(2\theta), \quad (5)$$

або поліноміальної залежності

$$\alpha_{ij}(\theta) = 0,0001 \theta^2 - 0,0078 \theta + 1,114. \quad (6)$$

У остаточному вигляді вираз (2) запишеться як

$$\Lambda = \sum_{i=1}^N \Lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J \alpha_{ij} k_{ij} \Lambda_j. \quad (7)$$

Аналіз (7) свідчить, що для визначення критеріїв Λ_i та Λ необхідно розрахувати параметри вибуху хмари ГПС, що утворилася при НС на i -му технологічному обладнанні.

Для визначення множини k_{ij} необхідно знайти радіуси R_i^{100} зони повних руйнувань та R_i^0 безпечної зони від вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні. Як свідчить (4), для j -го технологічного обладнання, що знаходиться від епіцентру вибуху хмари ГПС на відстані L_{ij} , яке задовольняє умові $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$, значення k_{ij} обчислюється на основі параметрів вибуху та відстані L_{ij} з використанням пробіт-функції:

$$k_{ij} = p_{ij} = f[Pr_2(DP, I_B, L_{ij})]. \quad (8)$$

Розрахунок основних параметрів вибуху ΔP та I_B хмари ГПС проведемо відповідно до рекомендацій [9, 10, 14]. Розрахунок виконується у наступній послідовності.

1. Визначення ефективного енергетичного запасу E_i хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні:

$$E_i = 2M_{Vi} q_{Vi}, \quad \text{якщо } c_{sti} \geq c_{Vi}, \quad (9)$$

$$E_i = 2M_{Vi} q_{Vi} c_{st}/c_{Vi}, \quad \text{якщо } c_{sti} < c_{Vi}. \quad (10)$$

Величина M_{Vi} може задаватися у якості початкового параметра, або визначається згідно з [9] як

$$M_{Vi} = \frac{1}{3} \iiint_{V_{Bi}} c_{pi}(x, y, z, t) dx dy dz. \quad (11)$$

Об'єм V_{iB} хмари, де можливе займання і горіння (вибух) горючої речовини, є область в просторі, що обмежена поверхнями S_{Bi} та S_{Hi} на яких досягаються концентрації газоподібної горючої речовини $c_{акмрpi}$ та $c_{нкмрpi}$, де $c_{акмрpi}$, $c_{нкмрpi}$ – відповідно верхня та нижня концентраційні межі розповсюдження полум'я.

2. Розрахунок швидкості фронту полум'я v_{Gi} (м/с) при вибуху хмари ГПС, що виникла при НС на i -му обладнанні, проводиться згідно рекомендацій [9, табл. 2] в залежності від класу горючої речовини та рівня забудови оточуючого простору.

3. Визначення безрозмірних відстаней R_{ji} (м) від центру хмари ГПС, що виникла при НС на i -му технологічному обладнанні, до сусідніх об'єктів:

$$R_{ji} = r_{ji} / (E_i/P_0)^{1/3}, \quad (12)$$

де r_{ji} – відстань від центру хмари ГПС, що вибухає, до j -го об'єкта, м; P_0 – нормальний атмосферний тиск, $P_0 = 1,01 \cdot 10^5$ Па.

Центр хмари ГПС (епіцентр вибуху) визначається як точка у середині відрізка, що з'єднує джерело викиду (i -те технологічне обладнання) з найбільш віддаленою точкою хмари, в якій спостерігається концентрація горючої речовини $c_{нкмрpi}$.

4. Розрахунок основних параметрів вибуху хмари ГПС, до яких відносяться параметри повітряних ударних хвиль вибуху – надмірний тиск ΔP і імпульс хвилі тиску I :

– визначення безрозмірних величин тиску P_{1ji} і імпульсу i_{1ji} для дефлаграційного вибуху для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{1ji} = \frac{v_{\Gamma}^2}{v_{3B}^2} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(\frac{0,83}{R_{ji}} - \frac{0,14}{R_{ji}^2} \right), \quad (13)$$

$$i_{1ji} = \frac{v_{\Gamma}}{v_{3B}} \cdot \frac{\sigma - 1}{\sigma} \left(1 - \frac{0,4v_{\Gamma}}{v_{3B}} - \frac{\sigma - 1}{\sigma} \right) \left(1 - \frac{0,06}{R_{ji}} + \frac{0,01}{R_{ji}^2} - \frac{0,0025}{R_{ji}^3} \right), \quad (14)$$

де $v_{3B} = 340$ м/с; для газоповітряних сумішей $\sigma = 7$.

– визначення безрозмірних величин тиску P_{2ji} і імпульсу i_{2ji} для детонаційного вибуху для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{2ji} = \exp(-1,1240 - 1,660 \cdot \ln R_{ji} + 0,2600 \cdot \ln^2 R_{ji}), \quad (15)$$

$$i_{2ji} = \exp(-3,4217 - 0,898 \cdot \ln R_{ji} - 0,0096 \cdot \ln^2 R_{ji}). \quad (16)$$

– визначення остаточної безрозмірних величин тиску P_{ji} і імпульсу I_{ji} для всіх об'єктів ($j = 1, 2, \dots, N-1; j \neq i$):

$$P_{ji} = \min(P_{1ji}, P_{2ji}); i_{ji} = \min(i_{1ji}, i_{2ji}). \quad (17)$$

– визначення розмірних величин надлишкового тиску ΔP_{ij} (Па) і імпульсу I_{ij} (Па·с) в повітряній ударній хвилі для всіх об'єктів:

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} \cdot P_0, \quad (18)$$

$$I_{ij} = \frac{i_{ij}}{v_{3B}} \cdot P_0^{2/3} E^{1/3}. \quad (19)$$

5. Розрахунок параметрів зон ураження, до яких відносяться величини радіусів R_i^{100} зони повних руйнувань та R_i^0 безпечної зони. Згідно рекомендацій [9, 10] для обчислення радіусів зон ураження можливо використання формули

$$R_i = \frac{KW_i^{1/3}}{\left(1 + \left(\frac{3180}{W_i}\right)^2\right)^{1/6}}. \quad (20)$$

Коефіцієнт K для границі зони повних руйнувань має значення $K^{100} = 3,8$, для границі безпечної зони – $K^0 = 14$.

Тротиловий еквівалент вибуху хмари ГПС визначається як

$$W_i = \frac{0,4q_{vi}}{0,9q_T} M_{vi}, \quad (21)$$

де $q_T = 1,52 \cdot 10^6$ Дж·кг⁻¹.

Для об'єктів, відстані до яких від епіцентру вибуху хмари ГПС задовольняють умовам $R_i^0 \geq L_{ij} \geq R_i^{100}$, обчислюються ймовірності p_{ij} повного руйнування промислових споруд і технологічного обладнання із застосуванням пробіт-функції (10).

Згідно [9], пробіт-функція Pr_2 , яка відповідає повному руйнуванню будівель та зовнішнього технологічного обладнання (залишки підлягають зносу) визначається як

$$Pr_2 = 5 - 0,22 \ln F_2. \quad (22)$$

Фактор F_2 розраховується за формулою:

$$F_2 = (40000/\Delta P_{ij})^{7,4} + (460/I_{ij})^{11,3}. \quad (23)$$

Після визначення пробіт-функції, згідно з [9, табл. 3] знаходиться ймовірність p_{ij} .

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для отримання кількісної оцінки рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах НС з вибу-

хом хмари ГПС проведемо розрахунки згідно запропонованої методики.

Блок має у своєму складі 4 технологічних апарата (обладнання). Розглянемо НС з повною розгерметизацією сферичної технологічної ємності E_1 , яка супроводжується викидом 8 тонн пропану з утворенням хмари ГПС. Для оцінки максимально можливих наслідків НС приймаємо, що в хмару перейшла практично вся кількість викинутого пропану. У вибуховому перетворенні приймає участь 10% маси хмари.

НС сталася влітку, в денний час, в ясну безвітряну погоду. На відстані 50 м, 80 м і 100 м від технологічної ємності розміщуються інші технологічні апарати блоку – колони K_1 , K_2 та K_3 , які мають форму прямого кругового циліндру.

Потрібно визначити кількісну оцінку рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП при умові, що НС з вибухом хмари ГПС можлива тільки при руйнуванні ємності E_1 .

Характеристики технологічного обладнання блоку наведено в табл. 3.

Дані для розв'язання задачі:

- вибухонебезпечна речовина – пропан;
- агрегатний стан суміші – газова;
- концентрація газу в суміші, кг/м³ – 0,14;
- маса газу в хмарі, кг – 8000;
- об'єм хмари, м³ – 57000;
- питома теплота згоряння газу, Дж/кг – $4,64 \cdot 10^7$;
- навколишній простір – відкритий;
- відстані до сусідніх об'єктів, м – 50, 80, 100.

Основні параметри вибуху хмари ГПС пропану з повітрям, яка утворилася у наслідок руйнування технологічної ємності були визначені за формулами (9)–(19).

Розрахунок параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари пропан-повітряної суміші було виконано за формулами (20)–(23).

Оцінка рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП визначалася за формулами (1)–(8).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати розрахунків основних параметрів вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, зводимо в табл. 4.

Результати розрахунків параметрів зон ураження та ймовірностей повного руйнування технологічного обладнання у результаті вибуху хмари ГПС, яка виникла в наслідок руйнування ємності E_1 з пропаном, наведено в табл. 5.

Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП представлено в табл. 6.

Таблиця 3 – Характеристики технологічного обладнання блоку

i	Позначення обладнання	Тип обладнання, n	Q_B^{in}	q_{i2}	Q_{HC}^{in}	E_i , Дж
1	E_1	Ємнісне, $n = 2$	0,265	0,9362	$1,21 \cdot 10^{-4}$	24,4
2	K_1	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,25 \cdot 10^{-4}$	8,6
3	K_2	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,14 \cdot 10^{-4}$	6,2
4	K_3	Колонне, $n = 3$	0	0	$1,24 \cdot 10^{-4}$	11,8

Таблиця 4 – Результати розрахунку основних параметрів вибуху хмари ГПС

i	$r_{i\text{, м}}$	R_{xi}	Режим вибуху				$\Delta P_{1i\text{, Па}}$	$I\text{, Па}\cdot\text{с}$
			Дефлаграція		Детонація			
			P_{1xi}	I_{1xi}	P_{2xi}	I_{2xi}		
2	50	0,35	0,46	0,0571	0,96	0,057	$6,2\cdot 10^4$	$3,68\cdot 10^4$
3	80	0,5	0,35	0,0496	0,85	0,052	$4,4\cdot 10^4$	$2,84\cdot 10^4$
4	100	0,63	0,29	0,0427	0,74	0,049	$2,8\cdot 10^4$	$2,04\cdot 10^4$

Таблиця 5 – Результати розрахунку ймовірностей руйнування технологічних установок блоку в наслідок вибуху хмари ГПС

i	$r_{i\text{, м}}$	$R_i^{100}\text{, м}$	$R_i^0\text{, м}$	Pr_2	$\% P_{1i\text{,}}$
2	50	87	321	–	100
3	80			–	100
4	100			4,47	28

Таблиця 6 – Результати визначення оцінки рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку

Λ_1	Λ_2	Λ_3	Λ_4	Λ
0,00073	0,00018	0,00016	0,00034	0,0014

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП дозволяє отримати більш точну в порівнянні з існуючими методиками оцінку рівня вибухонебезпеки. Цей результат досягається на основі урахування особливостей забудови території, режиму вибуху та характеристик ВНР.

Дана методика може бути застосованою до широкої множини горючих речовин та технологічного обладнання різних типів, що використовуються на ГНПП. Результати чисельних експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішена задача визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку ГНПП.

Наукова новизна результатів, отриманих в статті, полягає в тому, що запропонований метод визначення рівня вибухонебезпеки окремого технологічного обладнання та загалом технологічного блоку становить подальший розвиток методології та прикладних засобів забезпечення техногенної безпеки, зокрема вибухонебезпеки, потенційно небезпечних промислових об'єктів.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод, є основою математичного забезпечення інформаційної системи підтримки прийняття рішень при проектуванні систем безпеки газонафтопереробних підприємств.

Перспективи подальших досліджень полягають у тому, що запропонована методика уможливіє побудову та розв'язання задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки технологічного блоку ГНПП в умовах надзвичайної ситуації з викидом ВНР, утворенням хмари газоповітряної суміші та її вибуховим перетворенням за умови її зве-

дення до задачі оптимізації розміщення технологічних апаратів з урахуванням обмежень на максимально допустимі відстані між складовими блоку.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Методи оптимізації динамічних ієрархічних систем регіональної техногенної безпеки» (номер державної реєстрації 0115U002026).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чуб І. А. Модель задачі мінімізації рівня вибухонебезпеки об'єктів з вибухами хмар газоповітряних сумішей / І. А. Чуб, В. В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2016. – Вип. 24. – С. 137–142.
2. Чернай А. В. Математичне моделювання вимушеного запалювання газоповітряної суміші при розрахунку вражаючих факторів аварійних вибухів / А. В. Чернай, М. М. Налісько // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2016. – № 5. – С. 82–94.
3. Van den Berg A. C. Vapor cloud explosion blast modeling / A. C. Van den Berg, C. J. M. Van Wingerden. // ICHEME Symposium Series. – 1994. – No. 124. – P. 393–409.
4. Methods for the Calculation of the Physical Effects. – Gevaarljke Stoffen, 1996. – 870 p.
5. Brossard J. Overpressure imposed by blast wave / J. Brossard, P. Bailly, D. Desbordes // Progress in Astronautics and Aeronautics. – 1989. – Vol. 4. – P. 410.
6. Giesbrecht H. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases / H. Giesbrecht, G. Hemmer, K. Hess // Ger. Chem. Eng. – 1984. – No. 4. – P. 315–325.
7. Lee J. H. Blast effects from vapor cloud explosion / J. H. Lee, C. V. Guirao, G. G. Bach // Loss prevention. – 1989. – Vol. 11, No. 1. – P. 59–70.
8. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою. – Київ : УкрНДІПЗ, 2016. – 42 с.
9. Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 208 с.
10. РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 38 с.
11. Попов В. М. Моделирование характеристик потока отказов основных производственных фондов объектов повышенной опасности / В. М. Попов, И. А. Чуб, М. В. Новожилова // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2015. – Вип. 21. – С. 64–70.
12. Чуб І. А. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації з вибухом хмари газоповітряної суміші / І. А. Чуб, В. В. Матухно // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2016. – Вип. 23. – С. 186–191.
13. Шебеко Ю. Н. Оценка индивидуального и социального риска аварий с пожарами и взрывами для наружных технологических установок / Ю. Н. Шебеко, А. П. Шевчук, В. А. Колосов // Пожаровзрывобезопасность. – 1995. – № 1. – С. 21–29.
14. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. – М. : ЗАО НТЦ ПБ, 2012. – 46 с.

Стаття надійшла до редакції 23.12.2016.

Після доробки 18.01.2017.

Чуб І. А.¹, Новожилова М. В.², Матухно В. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри пожежної профілактики в населених пунктах Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна,

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувача кафедри економічної кібернетики та інформаційних технологій, Харківський національний університет будівництва та архітектури, г. Харків, Україна

³Ад'юнкт Національного університету громадянської захисти України, г. Харків, Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ СО ВЗРЫВОМ ОБЛАКА ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

Актуальность. Научно обоснованное ранжирование уровней потенциальной опасности технологических установок газонефтеперерабатывающих предприятий необходимо для решения проблем обеспечения безопасности на всех стадиях их жизненного цикла. Действующая в Украине нормативная и методическая база недостаточна для решения задач обеспечения взрывобезопасности объектов газонефтепереработки в современных условиях хозяйствования.

Цель. Построение и анализ математической модели техногенной чрезвычайной ситуации с взрывом облака газозвдушной смеси на технологическом блоке газонефтеперерабатывающего предприятия как инструментального средства определения количественной оценки уровня взрывоопасности блока.

Метод. Проведена структурная и параметрическая идентификация интегрального критерия, характеризующего взрывоопасность технологического блока в целом и учитывающего особенности застройки территории предприятия, режима взрыва, характеристик взрывоопасных веществ.

Результаты. В работе решена задача определения уровня взрывоопасности отдельного технологического оборудования и в целом технологического блока газонефтеперерабатывающего предприятия.

Выводы. Научная новизна заключается в том, что предложенный метод составляет дальнейшее развитие методологии и прикладных средств обеспечения техногенной безопасности, в частности взрывоопасности, потенциально опасных промышленных объектов. Результаты численных экспериментов позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике.

Ключевые слова: взрыв, облако газозвдушной смеси, уровень взрывоопасности, вероятность возникновения чрезвычайной ситуации.

Chub I. A.¹, Novozhylova M. V.², Matuhno V. V.³

¹Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Fire Prevention in the Settlements, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Economic Cybernetics and Information Technologies, Kharkov National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkov, Ukraine

³Adjunct, National University of Civil Defense of Ukraine, Kharkov, Ukraine

MODELLING OF EMERGENCY WITH THE EXPLOSION OF GAS-AIR MIXTURE CLOUD

Context. Science-based ranking of potential danger levels characterizing technological units at gas-oil reprocessing enterprises needs to address safety issues at all stages of their life cycle. Actual Ukrainian normative and methodological framework is insufficient to meet the challenges of explosion at gas-oil reprocessing enterprises in current economic conditions.

Objective. Designing and analyzing mathematical model of tehnogenic emergency with the explosion of gas-air mixture clouds on block of gas-oil reprocessing technological enterprise as the constructive tool for quantify definition of explosive unit level.

Method. Structural and parametric identification of integral criterion characterizing the unit explosiveness as a whole taking into account the peculiarities of enterprise territory development, the explosion regime, characteristics of explosive materials.

Results. The problem of explosion hazard level estimation of separate technological equipment and whole technological block of a gas and oil refinery plant is solved in the work.

Conclusions. The proposed method is a contribution to further development of the methodology and constructive means to ensure the technologic safety, in particular the explosion one, for potentially hazardous industrial objects. Numerical results allow us to recommend the proposed method to be used in practice.

Keywords: explosion, a cloud of gas-air mixture, explosion level, probability of an emergency.

REFERENCES

1. Chub I.A., Matuhno V.V. Model zadachi minimizacii rivnja vibuhonebezpeki ob'ektiv z vybuhamy hmar gazopovitrijnyh sumishej, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 24, pp. 137–142.
2. Chernaj A.V., Nalys'ko M.M. Matematychni modeljuvannja vymushenogo zapaljuvannja gazopovitrijanoi' sumishi pry rozrahunku vrazhajuchyh faktoriv avarijnyh vybuhiv, *Naukovyj visnyk Nacional'nogo girnychogo universytetu*, 2016, No. 5, pp. 82–94.
3. Van den Berg A. C., Van Wingerden C. J. M. Vapor cloud explosion blast modeling. *ICHEME Symposium Series*, 1994, No. 124, pp. 393–409.
4. Methods for the Calculation of the Physical Effects. Gevaarlijke Stoffen, 1996, 870 p.
5. Brossard J., Bailly P., Desbordes D. Overpressure imposed by blast wave, *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1989, Vol. 4, P. 410.
6. Giesbrecht H., Hemmer G., Hess K. et al. Analysis of explosion hazards on spontaneous release of inflammable cases, *Ger. Chem. Eng.*, 1984, No. 4, pp. 315–325.
7. Lee J. H., Guirao C. V., Bach G. G. Blast effects from vapor cloud explosion, *Loss prevention*, 1989, Vol. 11, No. 1, pp. 59–70.
8. DSTU B V.1.1-36:2016. Vyznachennja kategorij prymishhen', budynkiv ta zovnishnih ustanovok za vybuhopozhezhnoju ta pozhheznoju nebezpekoju. Kyi'v: UkrNDICZ, 2016, 42 p.
9. Metodiki ocenki posledstvij avarij na opasnyh proizvodstvennyh ob'ekтах: Sb. dokumentov. Serija 27. Vypusk 2 / Koll. avt. Moscow, ZAO NTC PB, 2010, 208 p.
10. RD 03-409-01. Metodika ocenki posledstvij avarijnyh vzryvov toplivno-vozdushnyh smesej. Moscow, ZAO NTC PB, 2014, 38 p.
11. Popov V. M., Chub I. A., Novozhylova M. V. Modelirovanie harakteristik potoka otkazov osnovnyh proizvodstvennyh fondov ob'ektov povyshennoj opasnosti, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2015, Vol. 21, pp. 64–70.
12. Chub I. A., Matuhno V. V. Prognozuvannja naslidkiv nadzvichainoi situacii z vibuhom xmaru gazopovitrijanoi' sumichi, *Problemi nadzvichainix situacii*, 2016, Vol. 23, pp. 186–191.
13. Shebeko U. N., Shevzhuk A. P., Kolosov V. A. Ocenka individual'nogo i social'nogo riska avarij s pozharami i vzryvami dlja naruzhnyh tehnologicheskix ustanovok, *Pozharovzryvobezopasnost'*, 1995, No. 1, pp. 21–29.
14. Metodika modelirovanija rasprostraneniya avarijnyh vybrosov opasnyh veshhestv. Moscow, ZAO NTC PB, 2012, 46 p.

НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.932.2:004.93'1

Гороховатский В. А.¹, Путятин Е. П.², Столяров В. С.³

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и высшей математики, Харьковский учебно-научный институт государственного высшего учебного заведения «Университет банковского дела», Харьков, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информатики, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

³Студент, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТИ СТРУКТУРНЫХ МЕТОДОВ КЛАССИФИКАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ ДАННЫХ

Актуальность. Повышение результативности и расширение функциональности современных систем компьютерного зрения требуют создания более эффективных методов обработки визуальной информации. Основные задачи структурного распознавания связаны с усовершенствованием информационных технологий классификации в пространстве описаний как множеств дескрипторов ключевых точек изображений, а также необходимостью оценивания действенности распознавания на прикладных образцах. Особое внимание уделяют изучению структуры данных для множества дескрипторов, что напрямую влияет на показатели функционирования систем распознавания.

Цель. Изучение особенностей кластерного представления для множества структурных признаков прикладной базы изображений и оценивание показателей эффективности применения кластерной модели в методах структурного распознавания визуальных объектов в плане получения компактного представления данных.

Метод. Предложено методы распознавания на основе трансформации пространства структурных признаков путем кластеризации и применения кластерных характеристик базы эталонных изображений. Первый метод использует интегральное представление описаний эталонов, второй метод при отнесении структурного элемента к классу опирается на значение вектора статистического распределения в матричном пространстве кластер-эталон. Итогом исследования есть создание методов распознавания и моделей обработки данных в процессе построения векторов релевантности или характеристик классов в трансформированном пространстве признаков.

Результаты. За счет кластерного преобразования пространства структурных признаков сокращается объем вычислительных затрат, и в сотни раз улучшается быстродействие распознавания при сохранении нужной эффективности. Проведено сравнение методов SURF и ORB при формировании структурных признаков, время обработки методом ORB оказалось в 60 раз меньше. С другой стороны, множество дескрипторов SURF более точно отражает особенности формы визуальных объектов.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенного метода распознавания в прикладной базе изображений. Подтверждена результативность метода в плане эффективности, получены сравнительные оценки качества распознавания в зависимости от уровня аддитивных помех для анализируемых вариантов обработки.

Выводы. В проведенном исследовании систематизированы и получены перспективные свойства систем распознавания в пространстве структурных признаков изображений. Разработанные методы классификации на основе кластерного описания обеспечивают достаточный уровень различения изображений и высокую помехоустойчивость.

Научная новизна исследования состоит в синтезе метода структурного распознавания изображений путем применения кластерной обработки и построения классифицирующих решений в пространстве кластер-эталон. Переход к векторно-кластерному виду существенно повышает быстродействие распознавания за счет упрощения обработки.

Практическая ценность работы – получение прикладных программных моделей для модификаций метода структурного распознавания и подтверждение результативности и помехоустойчивости предложенной обработки в конкретных примерах баз изображений.

Ключевые слова: компьютерное зрение, структурное распознавание изображений, множество структурных признаков, дескрипторы SURF, дескрипторы ORB, релевантность описаний, вектор характеристик классов, помехоустойчивость метода, быстрое действие распознавания.

НОМЕНКЛАТУРА

$Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$ – база эталонных описаний;

Z^j – эталон;

J – число классов;

SURF – Speeded up robust features (ускоренное выделение устойчивых особенностей);

ORB – Oriented FAST and Rotated BRIEF (ориентированный FAST и повернутый BRIEF);

СП – структурный признак;

$M = \{M_i\}_{i=1}^k$ – разбиение на множестве Z ;

k – число классов (кластеров) СП;

$h[Z^j]$ – вектор представления эталона;

$H[Z] = \{\{h_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$ – матрица кластерного описания базы изображений;

$m = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$ – множество центров кластеров;

$\{\{a_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$ – матрица весов эталонов;

$O = \{o_l\}$ – описание распознаваемого визуального объекта;

$\rho(o_l, m_d)$ – метрика на множестве СП;

δ – порог значимости для метрики ρ ;

$r_j = \beta(\alpha^i[O], \alpha^i[Z^j])$ – расстояние (степень релевантности) между кластеризованными векторными описаниями;

ε – порог значимости для минимума релевантности;

$\Sigma = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_J)$ – вектор характеристик классов;

$v = \Sigma_{\min} / \Sigma_{\max}$ – показатель эффективности различения эталонов.

ВВЕДЕНИЕ

Узловые задачи компьютерного зрения связаны с формированием полезных выводов и результативных управленческих решений относительно физических объектов реального мира на основе анализа их изображений [1–11]. Преимуществами структурных методов в анализе изображений есть представление визуальных объектов в виде множества независимых структурных элементов, что позволяет в процессе распознавания осуществлять результативные решения по подмножествам элементов и обеспечить нужную устойчивость к помехам на анализируемом изображении [1–3]. Перспективы структурного распознавания связаны с усовершенствованием информационных технологий классификации в пространстве описаний в виде множеств дескрипторов ключевых точек изображений, а также необходимостью оценивания действенности распознавания на прикладных образцах.

Объект исследования – структурное распознавание изображений в компьютерном зрении, описание которых представлено множествами характерных признаков.

Предмет исследования – кластерная модель представления структурного описания объектов с учетом пара-

метров числа кластеров и порогов подобия структурных элементов.

Цель работы – изучение свойств и особенностей кластерного представления для множества структурных признаков прикладной базы изображений и оценивание показателей эффективности применения кластерной модели в методах структурного распознавания визуальных объектов в плане получения компактного представления данных.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Фундаментом структурного распознавания есть априорно заданная база описаний эталонных изображений (алфавит классов), представленная их общей совокупностью СП в виде множества $Z = \{Z^j\}_{j=1}^J$.

Осуществим на множестве Z разбиение $Z = M = \{M_i\}_{i=1}^k$, $M_i \cap M_d = \emptyset$, $M_i \neq \emptyset$. Считаем элементы $z \in M_i$ эквивалентными (равноценными) между собой. Получим две системы классификации $\forall z \in Z$: $\{Z^j\}$ – для эталонных изображений и $\{M_i\}$ – для СП. За счет разбиения $\{M_i\}_{i=1}^k$ описание Z^j эталона трансформируется к целочисленному вектору

$$h[Z^j] = \langle h_1^j, h_2^j, \dots, h_k^j \rangle, \quad (1)$$

где $h_i^j = \text{card}\{z \mid z \in Z^j \text{ \& } z \in M_i\}$. Представление (1) – это образ эталона, полученный в результате кластерного представления, а конечное множество векторов (1) базы из J образцов образует матрицу $H[Z] = \{\{h_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$. Строка матрицы H отражает кластерное описание отдельного эталона, а столбец – содержание кластера из числа равноценных элементов различных эталонов.

Представляет интерес изучение свойств и особенностей полученной кластерной структуры данных в плане показателей функционирования методов распознавания, построенных на ее основе.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Современные структурные методы анализа визуальной информации основаны на оценивании подобия дескрипторных описаний анализируемого и эталонного изображений, представленных в виде множеств особых точек – СП [1, 4–6]. Величина подобия отражает степень выполнения бинарного отношения релевантности для двух информационных единиц как описаний визуальных объектов в некотором пространстве признаков.

Множество СП в виде совокупности числовых векторов формируется применением специальных детекторов, наиболее известными среди которых в настоящее время считают SURF и более быстрый при реализации, но менее устойчивый к масштабированию, ORB [3, 5, 7]. SURF оперирует дескрипторами размером 64, ORB –

32 компонента, оба детектора инвариантны к геометрическим преобразованиям смещения, поворота, масштаба. Методы SURF и ORB реализованы в программных средах OpenCV, Matlab, ORB можно использовать в Веб-браузере посредством библиотеки JSFeat.

Построение разбиения в плане получения модели эталонов как групп равнозначных структурных элементов решается различными способами [1]. Один из развиваемых путей – применение кластеризации на множестве Z . Кластерное разбиение можно настроить на имеющуюся структуру данных, определяемую базой. Несомненным преимуществом применения векторной модели (1) при вычислении релевантности образов в целях распознавания в вычислительном плане значительно (в десятки раз) менее затратное, чем сопоставление описания изображения с совокупностью эталонных множеств $\{Z^j\}$ [4].

Можно рассматривать полученный образ (1) объекта как некоторую комбинаторную конфигурацию [8–11], которая организуется из элементов базового множества $m = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, $m_i \in M_i$, образованного сформированной кластерной структурой. В такой конфигурации визуальный объект изображаем вектором (1), компонента которого равна числу вхождений базового элемента (СП) в описание объекта. Здесь применим также термин «рейтинг встречаемости» для СП. Процесс построения таких конфигураций можно считать самоорганизацией «порядка из беспорядка». Полученное в результате кластеризации базовое множество m центров напрямую зависит от банка образцов $\{Z^j\}$, служащих опорными точками в неограниченном пространстве распознаваемых изображений.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Наряду с векторной моделью (1) эталонов распознавание в кластерном представлении имеет дело с матричной информацией: матрица кластерного описания $H[Z] = \{\{h_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$, на основе которой вычисляется матрица весов $\{\{\alpha_i^j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k$ эталонов, а также матрицы подобия/расстояний, которые вычисляются при сопоставлении описаний внутри базы с применением мер сходства в рамках моделей признакового пространства.

В целях построения кластерного описания, которое отображает статистическое распределение классов внутри кластеров и не зависит от числа СП в эталоне, предлагается матрицу H нормировать, причем целесообразна двухэтапная обработка:

1) нормирование в строке матрицы H на число элементов эталона

$$H^* = \{\{h_i^{j*}\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k = \{\{h_i^j / s_j\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k, \quad (2)$$

где $s_j = \text{card}(Z^j)$ – число элементов в эталоне Z^j ;

2) нормирование матрицы (2) на сумму элементов в столбце, чтобы получить распределение классов внутри отдельного кластера

$$H^{**} = \{\{\alpha_j^i\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k = \{\{h_i^{j*} / \sum_{j=1}^J h_i^{j*}\}_{j=1}^J\}_{i=1}^k. \quad (3)$$

Вектора-строки α^i соответствуют образу эталона в признаковом пространстве кластеров, они есть результатом обучения системы в используемой базе образцов.

Из (3) видно, что $\sum_{d=1}^J \alpha_d^i = 1$, так что α_d^i (относительные веса СП кластера) можно считать оценкой вероятности события, что элемент кластера M_i относится к классу Z^d . В частности, максимальное значение среди компонентов α^i соответствует наиболее вероятному классу принадлежности СП. Очевидно, что значения характеристик α_d^i непосредственно зависят как от содержания базы эталонов, так и от применяемого метода кластеризации, устанавливающего отображение эталон-кластер.

Распознавание в рамках кластерной модели исходит из теоретико-множественного описания данных и реализовано на основе статистико-вероятностного представления (1). Под распознаванием понимаем отнесение описания $O = \{o_l\}$ неизвестного визуального объекта к одному из классов $\{Z^j\}_{j=1}^J$, в результате осуществляется отображение из множества описаний объектов $\{O\}$ в конечное множество номеров классов $\{1, \dots, J\}$.

Сопоставление описания визуального объекта с использованием векторной модели эталонов осуществляется двумя основными способами [6]:

1) путем непосредственного сравнения интегральных характеристик вида (1);

2) поэлементно – каждый элемент объекта отнесем к одному из кластеров M_i , весовые характеристики которого накапливаются на множестве СП объекта.

Рассмотрим формальное содержание методов более подробно.

Метод 1.

1. Причислим элемент $o_l \in O$ объекта к кластеру $M_i \subseteq M$ в соответствии с конкурентным правилом

$$o_l \rightarrow M_i \mid \arg \min \rho(o_l, m_d) = i. \quad (4)$$

Для фильтрации ложных элементов в ходе реализации (4) выполним верификацию минимума m_i : $\rho(o_l, m_i) \leq \delta$. Если условие не выполнено, элемент o_l не относят ни к одному из кластеров.

2. В результате реализации шага 1 $\forall o_l \in O$ формируется описание (1) объекта $O = (h_1, h_2, \dots, h_k)^o$.

3. Вычислим степень r_j релевантности между нормализованными кластерными описаниями (3) объекта и эталонов как расстояние $r_j = \beta(\alpha^i[o], \alpha^i[Z^j])$ между соответствующими строками матриц $\{\alpha_j^i\}$ объекта и эталона в векторном пространстве R^k .

4. Отнесем объект O к классу $d \in \{1, \dots, J\}$ по правилу $d = \arg \min_j r_j$.

В общем случае векторные расстояния $\rho(\dots)$ и $\beta(\dots)$ различны, вместо них применимы также меры подобия, например, коэффициент корреляции, а порог δ опреде-

ляется установленной априорно степенью различимости в базе эталонов и уровне помех. На шаге 4 применима проверка значимости минимума релевантности $r_d : r_d \leq \varepsilon$, где ε – порог. При неудовлетворении неравенства класс объекта считаем неопределенным, т.к. не установлено значимое соответствие в имеющемся пространстве эталонов.

Метод 2. Модифицируем распознавание включением векторов α^i в процесс решения. Отнесение элемента o_i в правиле (4) к одному из кластеров на шаге 1 будем сопровождать формированием суммы значений векторов α^i , после анализа всех значимых $o_i \in O$ на шаге 2 получим суммарный для элементов объекта вектор характеристик классов

$$\Sigma = \Sigma_O \alpha^i = (\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_J), \quad Z_d = \Sigma_i \alpha_d^i. \quad (5)$$

Суммирование в (5) осуществляем по всем δ -значимым соответствиям кластеров для множества СП объекта. Шаг 4 метода 2 приобретает вид: объект относим к классу $d \in \{1, \dots, J\}$ по правилу:

$$O \rightarrow d \mid d = \arg \max_j \Sigma_j. \quad (6)$$

В методе 2 также могут быть применены проверки значимости при определении кластера (шаг 1) и максимума подобия в (6) (шаг 4). Значимость максимума в (6) может быть подтверждена величиной преобладания глобального максимума над ближайшим из локальных максимумов [1].

Отметим, что поэлементное сопоставление СП в методе 2 в реальных ситуациях обеспечивает большую устойчивость к помехам аномального типа, связанных с ложными объектами и фоном, что характерно для сигналов изображений.

Результативность распознавания в рамках базы изображений (конечного числа классов) с применением конкретного метода и модели данных может быть оценена значениями симметричной матрицы расстояний (метод

1) или матрицей подобия (метод 2). Анализ отклонения минимального значения от нуля в строке матрицы расстояний показывает, насколько близок наиболее похожий среди других эталон с анализируемым, стоящим на диагонали. В матрице подобия эффективность различения эталонов оценим показателем $v = \Sigma_{\min} / \Sigma_{\max}$ отношения локального и глобального максимумов при условии, что максимум $\Sigma_{\max}$ находится на диагонали (событие правильного распознавания).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Нами разработана программная среда для моделирования и исследования предложенных методов, она включает нахождение эталонных множеств ключевых точек на основе SURF и ORB дескрипторов (библиотеки OpenCV 3.2 и JSFeat), кластеризацию (JavaScript, библиотека K-Means), и вычисление матриц расстояний и подобия для базы изображений.

Изучим свойства и особенности реализации методов распознавания на примере экспериментальной базы морских млекопитающих (рис. 1) при представлении их структурных описаний в рамках 10 кластеров. Заметим, что визуально исследуемые изображения значительно похожи между собой, и в реальных условиях наблюдений их сложно классифицировать даже человеку. Другой особенностью базы есть визуальное подобие 1 и 4-го изображений (кит и китенок). Размеры изображений – 139x309 пикселей. Численный состав эталонов методом SURF [3]: 39, 69, 55 и 28 СП. Кластеризация описаний базы осуществлена методом к-средних [2]. В результате получено описание базы (матрица H) в виде табл. 1.

Наши вычисления показали, что с применением обоих методов достигается безошибочное различение эталонов по 10-ти кластерному представлению, причем эталоны 1 и 4 наиболее схожи между собой, что подтверждается и визуально. Однако для метода 2 кластерные образы эталонов 2–4 оказались в высокой степени подобными, что не гарантирует надежного распознавания в условиях помех. Полученная в результате нормирования матрица весов показана в табл. 2.

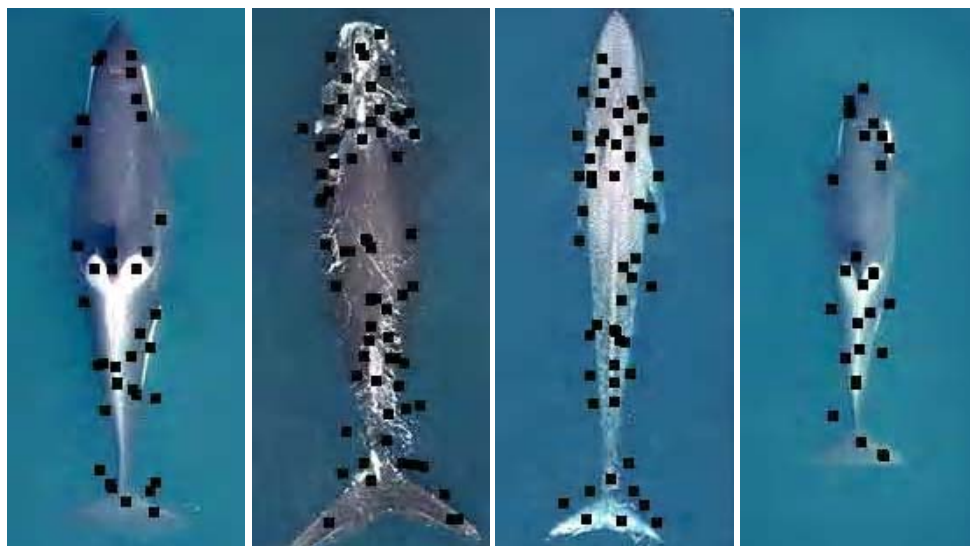


Рисунок 1– Изображения морских животных базы и координаты СП SURF

Таблица 1 – Количество СП эталонов в кластерном представлении

H	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Z^1	3	6	2	2	5	3	6	8	0	4
Z^2	11	12	0	15	8	14	9	0	0	0
Z^3	3	2	0	14	5	0	18	13	0	0
Z^4	4	1	2	3	4	5	6	1	1	1

Таблица 2 – Матрица весов для базы морских животных

α^i	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6	M_7	M_8	M_9	M_{10}
Z^1	0,18	0,38	0,42	0,08	0,27	0,17	0,19	0,43	0	0,74
Z^2	0,37	0,43	0	0,34	0,24	0,44	0,16	0	0	0
Z^3	0,13	0,09	0	0,40	0,19	0	0,40	0,50	0	0
Z^4	0,33	0,09	0,58	0,17	0,30	0,39	0,26	0,07	1,00	0,26

Как можно увидеть, полученное в табл. 2 представление выглядит достаточно эффективным, т.к. в столбцах 2, 3, 8, 9, 10 наблюдается существенное преобладание весовых коэффициентов для ограниченного числа эталонов. Матрицу подобия (метод 2) для эталонов базы можно вычислить, умножая столбец весов кластера на число СП эталона, оказавшихся в кластере (табл. 1). Матрица расстояния и матрица подобия представлены в табл. 3, 4.

Из табл. 3, 4 видим существенные различия эталонов в пространстве кластеров, в то время как эталоны 1, 4 остаются наиболее схожими.

Ключевым параметром кластерного представления есть число кластеров, которое теоретически связано с порогом эквивалентности для СП. Сокращение объёма вычислений при распознавании прямо пропорционально числу кластеров, в то время как значение вероятности правильного распознавания зависит обратно пропорционально. Матрица кластерного представления в рамках 5 кластеров для базы изображений рис. 1 представлена в табл. 5, а матрица подобия – в табл. 6.

Гистограмма представления первого изображения (рис. 1) в системе 5 и 10 кластеров приведена на рис. 2.

Проведено сравнительное исследование помехоустойчивости разработанных методов при действии аддитивных помех. Компоненты вектора помехи формировались в виде нормально распределенной случайной величины с нулевым математическим ожиданием и заданным значением среднеквадратического отклонения σ , характеризующего отношение сигнал-шум [1]. При $\sigma = 0,1$ для 10-ти кластеров первый метод обеспечивает безошибочное распознавание в пределах изучаемой базы, в то время как для второго метода вероятность P правильного распознавания составила $P = 0,92$. Снижение вероятности связано в основном с высокой степенью подобия изображений 1 и 4 (рис. 1). При $\sigma = 0,2$ вероятности составили 0,91 и 0,9, а при $\sigma = 0,3 - 0,76$ и 0,78. Как видим, в случае аддитивной помехи устойчивость первого метода несколько выше, но не значительно.

Таблица 3 – Матрица расстояний классов

Эталон	1	2	3	4
1	0	58	42	21
2	58	0	58	51
3	42	58	0	47
4	21	51	47	0

Таблица 4 – Матрица подобия

Эталон	1	2	3	4
1	13,21	7,89	9,02	8,88
2	13,96	23,99	13,62	17,42
3	12,72	10,86	20,74	10,68
4	6,38	7,07	5,44	9,11

Таблица 5 – Кластерное представление для 5 кластеров

H	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5
Z^1	10	11	3	7	8
Z^2	19	14	0	20	16
Z^3	7	12	4	26	5
Z^4	8	4	3	6	7

Таблица 6 – Матрица подобия для 5 кластеров

Эталон	1	2	3	4
1	10,43	9,65	8,95	9,96
2	17,08	18,60	16,43	16,89
3	12,39	12,85	16,58	12,17
4	7,15	6,86	6,31	7,68

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Кластерное преобразование пространства структурных признаков сокращает объем вычислительных затрат, и в сотни раз улучшается быстродействие распознавания при сохранении нужной эффективности. Проведено сравнение методов SURF и ORB при формировании структурных признаков: время обработки методом ORB в десятки раз меньше, однако, множество SURF более точно отражает форму визуальных объектов.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенных методов распознавания в

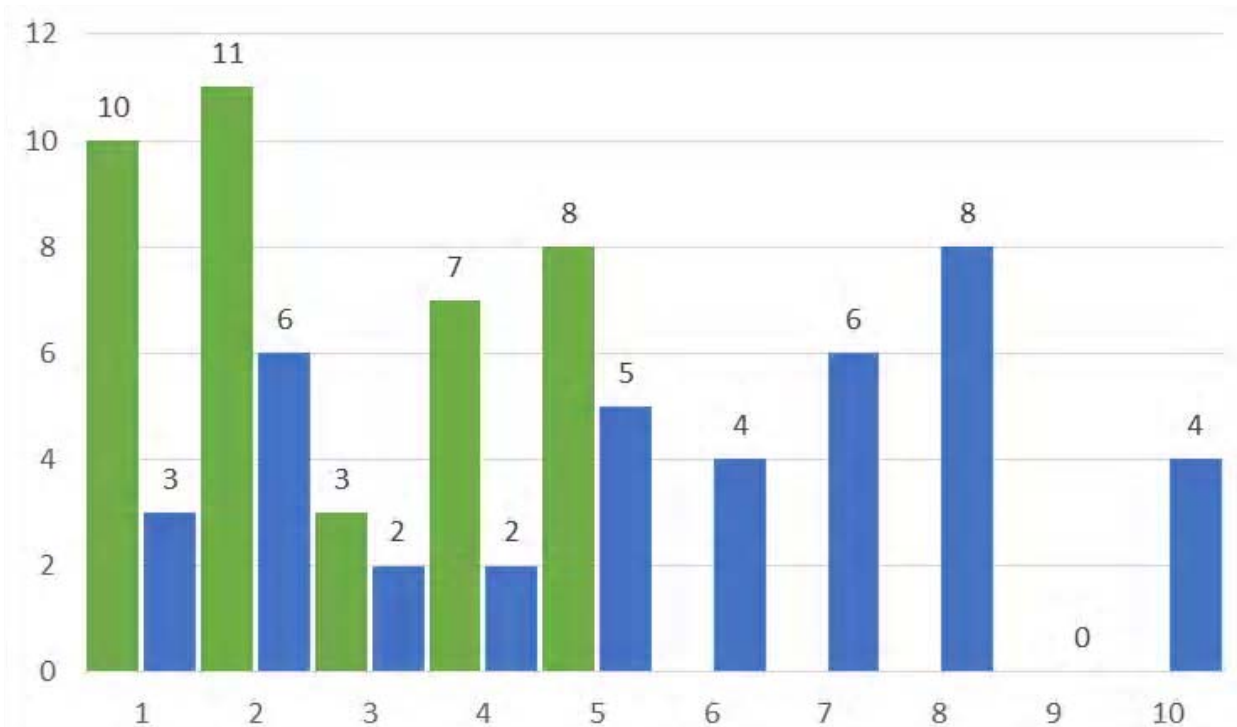


Рисунок 2 – Гистограмма кластеров изображения рис. 1 (зеленый – 5 кластеров, синий – 10 кластеров)

прикладной базе изображений. Подтверждены их работоспособность и результативность, получены сравнительные оценки качества распознавания в зависимости от уровня аддитивных помех для анализируемых вариантов обработки.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнивая значения релевантности Σ для эталонов в табл. 6 и табл. 4 (метод 2), видим, что в строках табл. 6 по сравнению с табл. 4 показатель ν отношения локального и глобального максимумов значительно выше, что говорит о невысоком уровне различимости классов. В табл. 4 величина ν колеблется в пределах 0,63–0,75, в то время как в табл. 6 – $\nu \in [0,78–0,95]$. Таким образом, подобие эталонов между собой в рамках 5 кластеров выше, чем для 10 кластеров. Аналогичная ситуация (снижение различия классов) наблюдается и для матриц расстояний: если минимум среди недиагональных элементов табл. 3 равен 21, а максимум – 58, то для аналогичной таблицы в рамках 5 кластеров они равны 11 и 47. В целом же оба метода при числе кластеров 5 и 10 обеспечивают безошибочное распознавание.

Сравнение методов распознавания при применении разных детекторов (SURF и ORB) показывает, что первый метод более точный и чувствительный к схожести описаний, он различает даже очень близкие между собой изображения. В плане различия близких изображений методы SURF и ORB ведут себя аналогично. Но для ORB наблюдается более высокое значение показателя ν : для 10 кластеров он находится в пределах отрезка 0,85–0,98. Увеличение числа кластеров также не улучшает ситуации.

Детектор ORB формирует примерно в два раза больше дескрипторов: 80, 304, 137 и 46 СП для базы рис. 1. При этом числом дескрипторов можно управлять. Но за

счет более коротких дескрипторов в 32 элемента время кластеризации и распознавания для дескрипторов ORB на порядок меньше, чем для SURF. Для одного из экспериментов время формирования SURF в среднем составило в 62 раза большее значение (8,29e–4 сек). С другой стороны, множество дескрипторов SURF, на наш взгляд, более точно отражает особенности формы обрабатываемых визуальных объектов. Дескрипторы ORB при этом образуют скученные множества практически в одних и тех же точках изображения. Пример изображения 2 с координатами дескрипторов ORB приведен на рис. 3.



Рисунок 3 – Изображение и координаты дескрипторов ORB

ВЫВОДЫ

Таким образом, можно считать, что разработанные методы классификации на основе кластерного описания обеспечивают достаточный уровень различения изображений и высокую помехоустойчивость. Кластерное представление в десятки раз сокращает временные затраты на распознавание.

В то же время результативность кластерного распознавания существенно зависит от сформированной системы кластеров в прикладной базе классов, задаваемых эталонами. На этапе обучения системы целесообразно достигать приблизительно равночисленного представле-

ння для множин структурних признаков еталонів, щоб отримане кластерне представлення приводило до приблизно рівноцінного впливу всіх структурних елементів на результат. Для близьких зображень (рис. 1, еталони 1 і 4) цілорозумно будувати єдине еталонне описання.

Дослідження підтвердили думку про те, що кількість кластерів в прикладних задачах комп'ютерного розпізнавання повинна бути в діапазоні 5...10.

Дослідження показали, що формування дескрипторів ORB здійснюється в десять разів швидше, ніж дескрипторів SURF. В той же час кількість дескрипторів SURF краще відображає форму об'єктів.

В залежності від типу завад запропоновані методи мають різну стійкість до завад. Перший метод рекомендуємо застосовувати при адитивній заваді і великих базах зображень, він забезпечує потрібну чутливість. Другий метод на основі аналізу кожного структурного елемента має кращу стійкість до завад при впливі локальних (імпульсних) завад, що призводить до часткового спотворення множини структурних признаков, що формують описання.

Такі параметри методів, як поріг еквівалентності структурних признаков, поріги для значимості подібності і ступені релевантності при розв'язанні класифікації, а також кількість кластерів визначаються в процесі навчання для конкретних прикладних баз зображень.

БЛАГОДАРНОСТІ

Робота виконана в межах держбюджетної науково-дослідницької теми Харківського національного університету радіоелектроніки «Розробка гібридних систем і методів чисельного інтелекту для обробки потоків нечіткої інформації в умовах нестационарності і неопределенності» (номер держ. реєстрації 0116U002539).

Гороховатський В. О.¹, Путятін Є. П.², Столяров В. С.³

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та вищої математики, Харківський навчально-науковий інститут державного вищого навчального закладу «Університет банківської справи», Харків, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

³Студент, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ СТРУКТУРНИХ МЕТОДІВ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ ДАНИХ

Актуальність. Підвищення результативності та розширення функціональності сучасних систем комп'ютерного зору вимагають створення більш ефективних методів обробки візуальної інформації. Основні завдання структурного розпізнавання пов'язані з удосконаленням інформаційних технологій класифікації в просторі описів як множин дескрипторів ключових точок зображень, а також необхідністю оцінювання дієвості розпізнавання на прикладних зразках. Особливу увагу приділяють вивченню структури даних для множини дескрипторів, що безпосередньо впливає на показники функціонування систем розпізнавання.

Мета. Вивчення особливостей кластерного уявлення для множини структурних ознак прикладної бази зображень і оцінювання показників ефективності застосування кластерної моделі в методах структурного розпізнавання візуальних об'єктів в плані отримання компактного подання даних.

Метод. Запропоновано методи розпізнавання на основі трансформації простору структурних ознак шляхом кластеризації і застосування кластерних характеристик бази еталонних зображень. Перший метод використовує інтегральне уявлення описів еталонів, другий метод при віднесенні структурного елемента до класу спирається на значення вектора статистичного розподілу в матричному просторі кластер-еталон. Підсумком дослідження є створення методів розпізнавання і моделей обробки даних в процесі побудови векторів релевантності або характеристик класів в трансформованому просторі ознак.

Результати. За рахунок кластерного перетворення простору структурних ознак скорочується обсяг обчислювальних витрат, і в сотні разів поліпшується швидкість розпізнавання при збереженні потрібної ефективності. Проведено порівняння методів SURF і ORB при формуванні структурних ознак, час оброблення методом ORB виявився в 60 разів менше. З іншого боку, множина дескрипторів SURF більш точно відображає особливості форми візуальних об'єктів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гороховатський В. А. Структурний аналіз і інтелектуальна обробка даних в комп'ютерному зорі / В. А. Гороховатський. – Х. : Компанія СМІТ, 2014. – 316 с.
2. Гороховатський В. А. Вивчення властивостей методів кластеризації застосовано до множин характеристик признаков зображень / В. А. Гороховатський, М. Д. Дунаєвська, В. А. Струнко // Системи обробки інформації. – 2016. – Вип. 5 (142). – С. 124–127.
3. Bay H. Surf: Speeded up robust features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Computer Vision: Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings. – Berlin: Springer, 2006. – P. 404–417.
4. Gorokhovatsky V. A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions / V. A. Gorokhovatsky // Telecommunications and Radio Engineering. – 2016. – Vol. 75, No. 14. – P. 1271–1283.
5. Rublee E. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF / [E. Rublee, V. Rabaud, K. Konolige, G. Bradski] // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), November 06–13, 2011, P. 2564–2571. Режим доступу http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf
6. Гороховатський В. А. Структурне розпізнавання зображень з застосуванням моделей інтелектуальної обробки і самоорганізації признаков / В. А. Гороховатський, А. В. Гороховатський, А. Е. Берестовський // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – №3 (38). – С. 39–46.
7. Karami E. Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images / E. Karami, S. Prasad, M. Shehata. – Режим доступу <https://www.researchgate.net/publication/292157133>
8. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. – London : Springer, 2010. – 979 p.
9. Duda R.O. Pattern classification / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – 2ed., Wiley, 2000. – 738 p.
10. Manning C. D. Introduction to Information Retrieval / C. D. Manning, P. Raghavan, H. Schütze. – Cambridge, University Press, 2008. – 528 p.
11. Shapiro L. Computer vision / L. Shapiro and G. Stockman. – Prentice Hall, 2001. – 625 p.

Стаття надійшла в редакцію 16.02.2017.

Після доробки 03.03.2017.

Проведено моделювання та експериментальні дослідження запропонованого методу розпізнавання для прикладної бази зображень. Підтверджено результативність методу в плані ефективності, отримані порівняльні оцінки якості розпізнавання в залежності від рівня адитивних перешкод для аналізованих варіантів обробки.

Висновки. У проведеному дослідженні отримані і систематизовані перспективні властивості систем розпізнавання у просторі структурних ознак зображень. Розроблені методи класифікації на основі кластерного опису забезпечують достатній рівень розрізнення зображень і високу стійкість перед перешкодами.

Наукова новизна дослідження полягає в синтезі методу структурного розпізнавання зображень шляхом застосування кластерної обробки і побудови класифікаційних рішень у просторі кластер-еталон. Перехід до векторно-кластерного подання істотно підвищує швидкість розпізнавання за рахунок спрощення обробки.

Практична значущість роботи – отримання прикладних програмних моделей для модифікацій методу структурного розпізнавання і підтвердження результативності та завадостійкості запропонованої обробки в конкретних прикладах баз даних зображень.

Ключові слова: комп'ютерний зір, структурне розпізнавання зображень, множина структурних ознак, дескриптори SURF, дескриптори ORB, релевантність описів, вектор характеристик класів, стійкість методу, швидкість розпізнавання.

Gorokhovatsky V. A.¹, Putyatin Y. P.², Stolyarov V. S.³

¹Dr. Sc., Professor, Department of Information Technology and Higher Mathematics, Kharkov Educational and Scientific Institute of Public Higher Education "University of Banking", Kharkov, Ukraine

²Dr. Sc., Professor, Head of Department of Computer Science, National University of Radio Electronics Kharkov, Kharkov, Ukraine

³Student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

RESEARCH OF EFFECTIVENESS OF STRUCTURAL IMAGE CLASSIFICATION METHODS USING CLUSTER DATA MODEL

Context. Increasing of productivity and extension of the functionality of modern computer vision systems require more effective methods for visual information processing. Main goals of structural recognition are related with the improvement of information classification technology in the space of features in a form of image key point descriptors, as well as the necessity of recognition performance estimation for application datasets. Particular attention is related to the investigation of data structure for the set of descriptors that directly affects the functioning of the recognition system.

Objective. Investigation of cluster representation for the set of structural features of application dataset was performed as well as the evaluation of cluster model performance in methods of visual objects structural recognition to provide compact representation of data was proposed.

Method. Methods of recognition based on transformation of structural features space by clustering and usage of cluster dataset image features were proposed. First method uses the integral representation of etalon images descriptions, the second one is based on the value of statistical distribution vector in matrix space cluster model during building the association between structural element and class. Result of research is creation of recognition methods and data models during construction of relevance vectors and features of classes in the transformed feature space.

Results. Using cluster transformation of the space of structural features allows to reduce the amount of computational costs, and improves recognition performance preserving desired efficiency in a hundred of times. Comparison between SURF and ORB methods for the formation of structural features was performed, processing time by ORB has appeared to be 60 times less. On the other hand, the set of SURF descriptors closely reflects the shape of visual objects.

Modeling and experimental investigations of proposed recognition method for application dataset was performed. Effectiveness of the method in terms of efficiency was confirmed, comparative estimations of recognition quality depending on the level of additive noise for the analyzed treatment options were obtained.

Conclusions. Paper proposed the systematization and obtaining of perspective properties of recognition systems in the space of structural features of images. Classification methods based on cluster descriptions provide a sufficient level of image discrimination and high noise immunity.

Scientific novelty of the research consists of synthesis of a method of structural image recognition based on the use of cluster processing and the construction of classification decisions in space of etalon cluster. Conversion to the vector-cluster presentation allows to significantly increase the speed of recognition by processing simplification.

Practical value of paper is the obtaining of application program models for the modifications of structural image recognition method with the confirmation of the effectiveness and noise immunity of the proposed approach in a specific image dataset.

Keywords: computer vision, structural image recognition, set of structural features, SURF descriptors, ORB descriptors, relevance of descriptions, vector of characteristics of classes, noise immunity, recognition performance.

REFERENCES

1. Gorokhovatskiy V. A. Strukturnyj analiz i intellektual'naya obrabotka dannyh v komp'yuternom zrenii. H. Kompanija SMIT, 2014, 316 p.
2. Gorokhovatskiy V. A., Dunaevskaja M. D., Strunenkov V. A. Izuchenie svojstv metodov klasterizacii primenitel'no k mnozhestvam harakternyh priznakov izobrazhenij, *Sistemi obrobki informacii*, 2016, Vip. 5 (142), pp. 124–127.
3. Bay H., Tuytelaars T., Van L. Gool Surf: Speeded up robust features, *Computer Vision : Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings*. Berlin, Springer, 2006, pp. 404–417.
4. Gorokhovatsky V. A. Efficient Estimation of Visual Object Relevance during Recognition through their Vector Descriptions, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2016, Vol. 75, No. 14, pp. 1271–1283.
5. Rublee E., Rabaud V., Konolige K., Bradski G. ORB: an efficient alternative to SIFT or SURF, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, November 06G.13, 2011, pp. 2564–2571. Rezhim dostupa http://www.willowgarage.com/sites/default/files/orb_final.pdf
6. Gorokhovatskiy V. A., Gorokhovatskiy A. V., Berestovskij A. E. Strukturnoe raspoznavanie izobrazhenij s primeneniem modelej intellektual'noj obrabotki i samoorganizacii priznakov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3 (38), pp. 39–46.
7. Karami E., Prasad S., Shehata M. Image Matching Using SIFT, SURF, BRIEF and ORB: Performance Comparison for Distorted Images. Rezhim dostupa https://www.researchgate.net/publication/292157133_
8. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. London, Springer, 2010, 979 p.
9. Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern classification, 2ed. Wiley, 2000, 738 p.
10. Manning C. D., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval, Cambridge, University Press, 2008, 528 p.
11. Shapiro L. and Stockman G. Computer vision. Prentice Hall, 2001, 625 p.

СИНТЕЗ МАРШРУТІВ СУБ-РОІВ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ХОПФІЛДА ДЛЯ ОБСТЕЖЕННЯ ТЕРИТОРІЙ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів малогабаритних безпілотних літальних апаратів (БПЛА).

Мета роботи – створення методу синтезу маршрутів суб-роїв БПЛА, що підвищує час життєздатності зграї БПЛА.

Метод. Запропоновано метод побудови моделей часток («суб-роїв») зграї БПЛА, що виключає дубляж виконання завдання у вузлах координатних сіток, якими покривається досліджувана територія. Суміщення нейронної карти мережі Хопфілда та польотної карти для кожного суб-рою забезпечує повідомлення через модулі бездротового зв'язку між БПЛА факту виконання моніторингового або технологічного завдання будь-яким окремим БПЛА суб-рою решті БПЛА. Запропонований підхід надає можливість використовувати функції самозагоєння суб-роїв зграї птахоподібних об'єктів («боїдів») шляхом перевизначення задач суб-роїв як кібер-фізичної системи у разі втрати окремих боїдів при їх критичному застосуванні. Структура одержуваних моделей поведінки суб-роїв, реалізована у двовимірних просторових коридорах довільної форми з наступною конкатенацією отриманих 2D-рішень, значно спрощує вирішення задач комівояжера у тривимірному просторі та дозволяє істотно прискорити виконання завдань обстеження ділянок територій.

Результати. Розроблено програмне забезпечення (ПЗ), яке реалізує запропонований метод, що використано при проведенні обчислювальних експериментів по дослідженню властивостей методу.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і ПЗ, що його реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці для рішення задач обстеження території з використанням зграї боїдів.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, суб-рій, зграя, нейронна мережа Хопфілда, дубляж задач.

НОМЕНКЛАТУРА

БПЛА – безпілотний літальний апарат (дрон, боїд);

ГДК – гранично допустима концентрація;

КФС – кібер-фізична система (англ. *cyber-physical system, CFS*);

НМХ – нейронна мережа Хопфілда;

2D – двовимірний простір (англ. *two-dimensional space*);

3D – тривимірний простір (англ. *three-dimensional space*);

B_{mn} – m -й боїд в n -му суб-рої зграї, який працює в SC_n -му просторовому коридорі;

A_n – матриця подій n -го суб-рою;

D_{ij} – початковий бінарний рівень ij -го нейрону;

$f(v_{ij})$ – функція активації ij -го нейрону;

lat_{ij} – широта ij -го вузла координатної сітки (англ. *latitude*);

lon_{ij} – довгота ij -го вузла координатної сітки (англ. *longitude*);

L – відстань між вузлами координатної сітки;

M – кількість боїдів в суб-рої;

N – кількість суб-роїв в зграї;

P_{ij} – ij -й вузол координатної сітки;

PE_0 – точка закінчення завдання одиночним БПЛА;

PF_n – точка вильоту боїдів n -го суб-рою;

SC_n – n -й просторовий коридор, в якому працює n -й суб-рій зграї;

TSP – задача комівояжера (англ. *travelling salesman problem*);

UAV – *unmanned aerial vehicles*;

x_{ij} – сигнал на вході ij -го нейрону;

y_{ij} – сигнал на виході ij -го нейрону;

v_{ij} – сигнал на виході адаптивного суматору ij -го нейрону;

w_{ij} – ваговий коефіцієнт вузла P_{ij} та ij -го елемента нейронної мережі Хопфілда;

Δt_{ij} – часова затримка поновлення стану ij -го нейрону.

ВСТУП

Все більше поширюється одночасне використання безпілотних апаратів (БПЛА або дронів) в різних галузях цивільно-військового призначення [1, 2]. Аграрний сектор нині є основним споживачем послуг дронів [1]. Необхідно зауважити, що останнім часом зміщується акцент з високотехнологічних дорогих пристроїв у бік дешевих спрощених вузькопрофільованих, з обмеженим набором інтерфейсів та сенсорів, апаратів критичного застосування («мікро-дронів»), втрата яких під час виконання задачі не перешкоджає її успішному завершенню [2]. У разі виходу з строї одного або декількох дронів вони підміняються аналогічними з тієї ж «зграї» або шляхом запуску додаткових апаратів. Тобто, «зграя» виконує адаптивні зміни порядку дронів на льоту та «самозагоєння» суб-роїв. Кожен з дронів в такий роєвий системі підтримує зв'язок з іншими БПЛА. Тут немає лідера чи командира, що дозволяє рою успішно пережити втрату окремих дронів і продовжувати скоординовані дії найчастіше на основі нейронної карти [3].

Треба зазначити, що дрони лише співпрацюють у межах «зграї» та повинні не створювати конфліктні ситуації один одному. Що стосується функцій, то кожна група БПЛА (суб-рій) в межах «зграї» виконує самостійне завдання (або вимірювання різних показників, або відеозйомку, або економне диференційоване обприскування окремих ділянок рослин тощо) та об'єднана так званим «ройовим інтелектом». Сучасна назва «*bird*» використовується для невеликих та недорогих БПЛА у рої (за умови виконання спільного завдання) або у зграї (якщо кожен суб-рій зграї виконує окрему задачу з спільного завдання зграї), відповідає укороченій версії «птахоподібний об'єкт» (англ. *bird-oid object*) [2].

Ройовий інтелект передбачає скоординовані дії деякої кількості боїдів, які локально взаємодіють між собою і навколишнім середовищем [4]. Хоча кожен боїд слідує простим базовим правилами, але в сукупності система ройового інтелекту демонструє винятково складну спільну поведінку. Вона діє фактично як єдиний великий організм.

Об'єктом роботи є процес планування маршрутів БПЛА якщо не оптимальним чином, то таким, що забезпечує виконання низки задач всією зграєю з найменшою витратою обчислювальних та енергоспожитих ресурсів.

Предметом дослідження є методи синтезу маршрутів суб-ройів, з яких складається зграя боїдів, на основі нейронних мереж Хопфілда (HMX).

Метою роботи є створення такого методу синтезу маршрутів суб-ройів зграї, який забезпечить вирішення задачі комівояжера (англ. TSP) з виключенням дублювання виконання задач у вузлах, якими промаркована досліджувана територія, та з суттєвим прискоренням синтезу маршрутів БПЛА у порівнянні з існуючими методами. Необхідність досягнення мети обумовлена обмеженістю енергоресурсів боїдів, що не дозволяє виконувати великий обсяг обчислень, якого потребує застосування класичних методів вирішення задачі TSP. Актуальність досліджень підвищується, якщо завдання обстеження територій пов'язані з надзвичайними ситуаціями та потребують негайних рішень в надзвичайно обмежені строки.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Наочними задачами, для вирішення яких доцільно застосовувати зграї (рої) невеликих боїдів з обмеженими обчислювальними та енергоресурсами, наприклад, є вирішення задач агросектору, огляд технічних споруд, моніторинг метеопоказників, поширення тріщин при землетрусах, води – при повеннях тощо. В подібних задачах завжди актуальними є питання визначення маршруту з моніторингом певних характеристик у визначених вузлах на чітко обмеженій території. Такий маршрут повинен бути, якщо й не оптимальним, але мінімальним за часом та довжиною траєкторії для прийняття своєчасних рішень.

Якщо ці умови не будуть виконані, можливі два варіанта критичного закінчення маршруту зграєю боїдів:

- невиконання задачі обстеження всіх заданих точок маршруту;

- неповернення чисельних боїдів до місця вильоту через зіткнення або закінчення ресурсу елементів електроживлення на борту боїдів.

Враховуючи вищевикладене, задача моніторингу характеристик території з чітко визначеними розмірами може бути приведена до класичної задачі комівояжера з нетрадиційним шляхом вирішення останньої.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Одним з ключових завдань при функціонуванні безпілотних апаратів в недостатньо відомій обстановці є планування безпечних траєкторій, що дозволяє будувати безаварійні маршрути переміщення [3]. Складність синтезу траєкторій для колективів роботів (у статті – зграї боїдів) полягає в тому, що, по-перше, в робочій зоні присутні інші безпілотні апарати (рухливі перешкоди), а по-друге, обчислювальні можливості бортових систем боїдів обмежені, що не дозволяє вирішувати задачу синтезу маршрутів БПЛА з використанням класичних переборних або потенційних алгоритмів.

У роботах [3, 5] розглянуті нові підходи до опису руху і планування маршрутів БПЛА на основі біологічно подібних алгоритмів. Нові методи побудови нейро-нечітких мереж не вимагають завантаження всієї навчальної вибірки в пам'ять комп'ютера та істотно прискорюють процес синтезу моделей [6]. Обмеженням використання таких методів є необхідність розбиття нейромоделі на прямокутні блоки.

З огляду на необхідність в проведеному дослідженні поєднувати нейронну карту [3] з картою польотів, доцільно використовувати для формування матриці стану всіх нейронів мережі алгоритм нейронної мережі Хопфілда [7]. Згодом всередині такої матриці можна виділити області довільної форми, в яких виконується синтез маршрутів БПЛА для вирішення задачі комівояжера.

Існує багато методів рішення TSP-задачі. Однак, такі методи в пошуку оптимального маршруту витрачають значну кількість обчислювальних і часових ресурсів, що зростають у експоненті із зростанням кількості вузлів – до 10 с для 20 точок маршруту [7]. Однак, в швидкодіяних процесах, пов'язаних зі швидкістю переміщення БПЛА від 20 до 30 м/с [2], просторовий коридор може бути пройдений боїдом швидше, ніж буде розрахований оптимальний маршрут. Тому доцільним є приведення 3D завдання TSP до більш простої і швидко розв'язуваної двовимірної (2D) задачі [8].

Ефективність певного числа рішень досить спірна, але найважливішою вимогою при синтезі маршрутів БПЛА є перевага в швидкості розрахунку. Достатня швидкість для забезпечення безконфліктної поведінки боїдів зграї може бути забезпечена при застосуванні мультиагентного підходу, коли боїди самостійно розв'язують різні за змістом оптимізаційні задачі, що виникають під час роботи системи, за умови відсутності центрального управління [9]. Але такий підхід повинен бути доповненим правилами організації роботи кібер-фізичної системи (КФС), в якій забезпечені умови стабільного бездротового зв'язку для передачі таких карт на входи всіх боїдів суб-рою та ін. [10]. В такий КФС на попередньому етапі (до вильоту зграї) оператору КФС необхідно частково спланувати розподіл агентів (боїдів) зграї на суб-рої, сформувати початкові нейронні карти алгоритму HMX для кожного суб-рою.

У зв'язку з вищесказаним, синтез нейромережевої системи планування маршрутів БПЛА з виключенням дублювання виконання задач, з урахуванням обмежених апаратних можливостей птахоподібних безпілотних апаратів, є актуальною та своєчасною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо моделювання групової поведінки зграї боїдів з урахуванням розбиття їх на суб-рої, які виконують аналогічні задачі в обмежених просторових коридорах.

Для економії обчислювальних ресурсів і продовження життя зграї поведінку боїда- «комівояжера» пропонується описувати тільки в географічних координатах (lat_j , lon_j), тобто, вирішувати 2D-задачу TSP. Висота h , на якій повинен переміщатися кожен окремий суб-рій, фіксується в залежності від рельєфу місцевості, над якою працює суб-рій. При такому підході повинна вирішуватися 2D-задача комівояжера в кожному просторовому коридорі, в якому працює окремий суб-рій [9]. На відміну від [6, 9] пропонується в розробленому методі формувати просторові коридори (блоки польотної карти) не прямокутними, а достатньо довільної форми з суміжними межами, без дублювання членства вузлів у суміжних блоках.

Попадання m -го боїда n -го суб-рою в точку з координатами (lat_j , lon_j) визначається або за GPS-координатами, або (за відсутністю зв'язку) порівнянням знімків фотокамери боїда з об'єктами з точною локалізацією, виявленими за Google або Apple мапами. Отже, вхідними даними є масив опорних точок, через які повинен пролетіти боїд (або суб-рій). Для кожного n -го суб-рою вказана точка вильоту PF_n , яка також є точкою фінішу.

Розглянемо план території, який покривається декількома координатними сітками з K рівномірно нанесеними в лінію контрольними вузлами на чітко визначеній відстані L (рис. 1). Кожна координатна сітка – це квадрат 10×10 вузлів, який є планом одного польоту зграї боїдів. Кількість суб-роїв в зграї, точки вильоту кожного суб-рою, висота польоту кожного суб-рою і відстань між вузлами, в яких повинні бути виконані технологічні або моніторингові завдання, визначається оператором цієї КФС перед кожним вильотом.

Якщо задача обстеження території виконується окремим БПЛА, з вильотом у точці PF_0 та закінченням завдання у точці PE_0 (рис. 2), то загальна вартість такого маршруту становить приблизно 2620, якщо вважати, що ваговий коефіцієнт переміщення боїда між вузлами P_{ij} координатної сітки по прямій становить $w_{ij} = 1 \cdot k$, а по діагоналі – $w_{ij} = 1,4 \cdot k$, де k – коефіцієнт, що динамічно змінюється в залежності від швидкості переміщення боїда [2].

Для прискорення обстеження мапи, вкритої декількома координатними сітками (див. рис. 1), доцільно використовувати зграю боїдів, поділену на декілька суб-роїв N , з кількістю M_n боїдів в n -му суб-рої. Для кожного суб-рою складається окрема польотна карта в межах однієї координатної сітки, що відповідає одному вильоту зграї. Пропонується для роботи кожного n -го суб-рою формувати просторовий коридор SC_n довільної форми.

Алгоритм має розуміти варіанти різного положення точок вильоту безпілотних літальних апаратів: виліт всіх

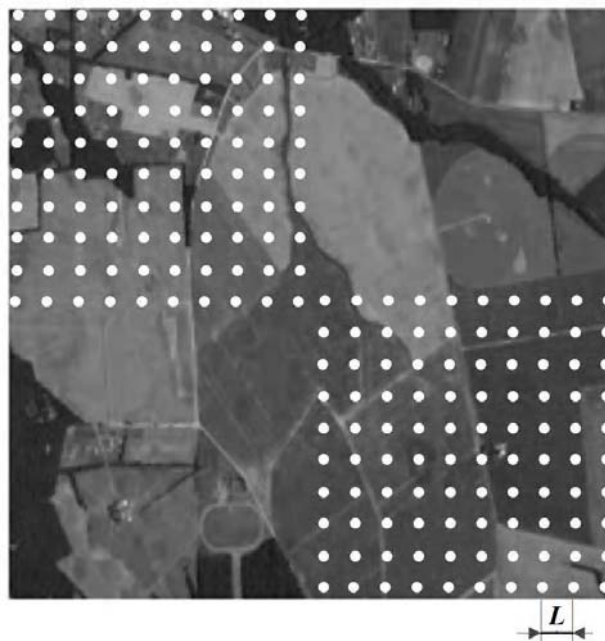


Рисунок 1 – Координатні сітки на мапі

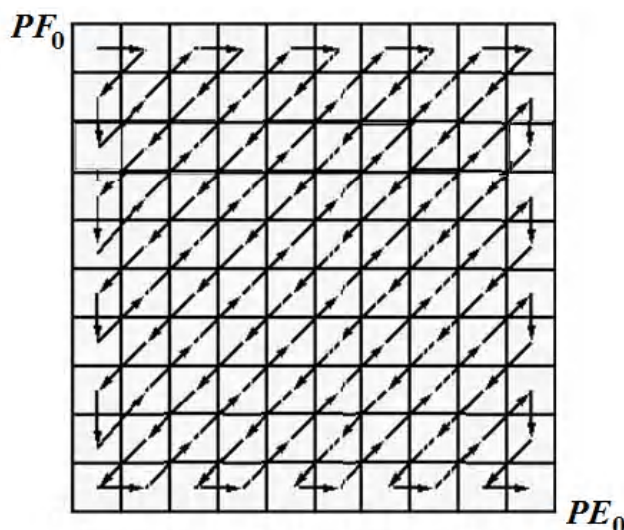


Рисунок 2 – Маршрут обстеження території окремим БПЛА

суб-роїв з однієї спільної точки PF_0 (рис. 3а), або з різних точок вильоту $PF_1 \dots PF_N$ (рис. 3б).

В залежності від кількості та положення точок вильоту кожного суб-рою стає кожна координатна сітка розділяється на просторові коридори SC_n (див. рис. 3). У наведеному прикладі кількість таких коридорів становить $N=4$. В кожному коридорі працює один суб-рій з кількістю боїдів один або більше (максимальна кількість боїдів у зграї M). Кожен вузол координатної сітки входив тільки в один просторовий коридор.

Тоді площа території, яка буде обстежена за один виліт зграї боїдів, залежить від відстані L між кожними двома сусідніми вузлами та кількості вузлів K :

$$S = (K - 1)^2 L^2. \quad (1)$$

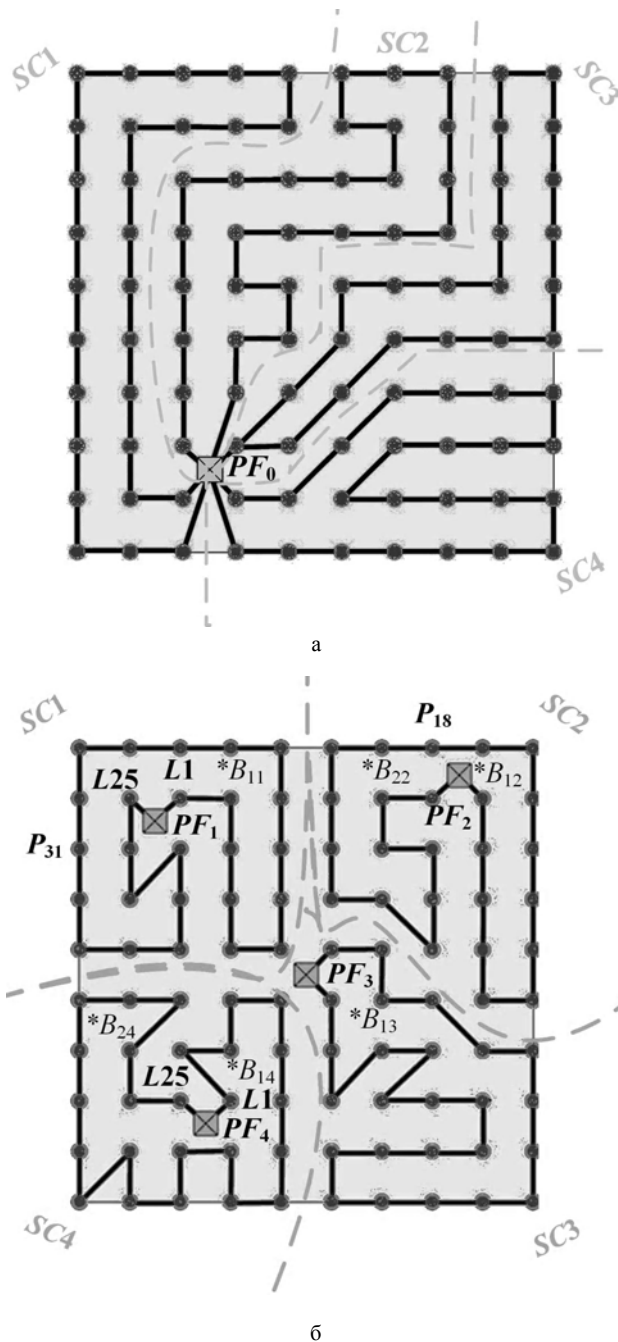
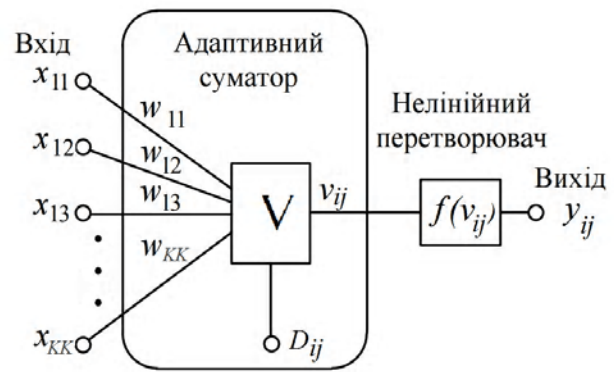
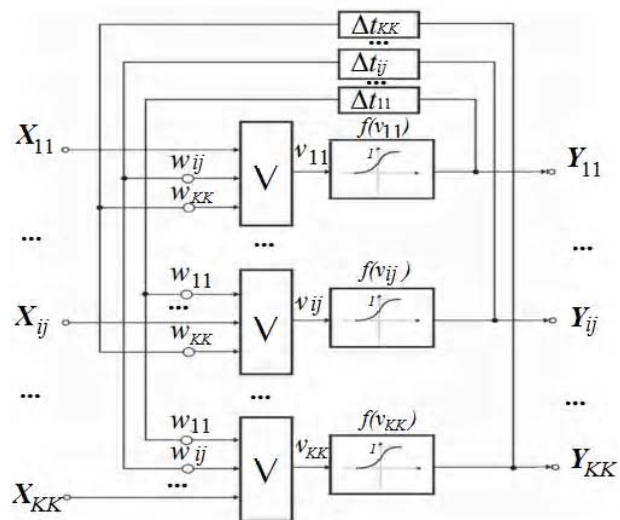


Рисунок 3 – Розподіл координатної сітки польотів на просторові коридори SC_n при $N = 4$:
а – при спільній точці PF_0 вильоту боїдів ($*B_{ij}$); б – при рознесених точках вильоту PF_n

Дискретна повнозв'язна НМХ складається з одного шару бінарних нейронів, кожен з яких пов'язаний з рештою нейронів і має мережеві вхід і вихід (рис. 4а). Координати цілі (вузли координатної сітки), а також інформація, чи є ці вузли вже обстеженими, надходять на вхід НМХ (рис. 4б), яка являє собою шар адаптивних суматорів із зворотними зв'язками, вихідні сигнали яких надходять з часовою затримкою Δt_{ij} на входи нейронів, в результаті чого вихідний сигнал НМХ формується лише після того, як мережа досягне динамічної рівноваги [3].



а



б

Рисунок 4 – Графічне зображення: а – нейрону; б – НМХ

Математично подібний нейрон (рис. 4а) описується за допомогою системи рівнянь (2):

$$\begin{cases} y_{ij} = f(v_{ij}); v_{ij} = \sum_{i=1}^{K,K} x_{ij} w_{ij} + D_{ij}; \\ D_{ij} = 1, P_{ij} \notin SC_n; D_{ij} = 0, P_{ij} \in SC_n; \\ w_{ij} = 1, \text{ якщо довжина маршруту між вузлами } L; \\ w_{ij} = 1,4, \text{ якщо довжина маршруту між вузлами } \sqrt{L}^2. \end{cases} \quad (2)$$

Початковий бінарний рівень нейрону D_{ij} задається оператором КФС та дорівнює «1», якщо нейрон (вузол польотної карти) не входить до карти суб-рою; дорівнює «0», якщо вузол підлягає обстеженню боїдом даного суб-рою.

Штучна мережа Хопфілда «навчається» рішенням задачі диз'юнкції матриць стану вузлів польотної карти (нейронів нейронної карти), що, по суті, зводиться до приведення стану всіх нейронів до «1», коли всі вузли польотної карти будуть обстежені. Тобто, у разі здійснення боїдом у вузлі P_{ij} вимірювання будь-якої характеристики, фотографування місцевості та ін., вихідна функція

$f(v_{ij})$ обчислювального процесу на відповідному ij -му нейроні, встановлюється в «1» і передається за правилами НМХ на входи всіх нейронів суб-рою. Якщо інший боїд попадає в точку з такими координатами, обчислювальний процес в цьому боїді не активується, тому що характеристики цієї точки вже виміряні та це відображено у нейронній карті.

Добуток всіх зважених входів $x_{ij} \cdot w_{ij}$ наприкінці задачі повинен бути ненульовим, враховуючи, що в кожній цільовій точці подія відбулася.

Таким чином, виключається дублювання події в кожній точці обстежуваної території, економляться обмежені обчислювальні ресурси комп'ютерних компонентів боїдів, економиться електроживлення і відповідно збільшується час життя зграї.

При плануванні маршруту суб-рою на основі розподіленої НМХ кожен з боїдів суб-рою формує власну нейронну карту і виконує її динамічне коригування за початковими даними і за інформацією від датчиків на боїді. Сформовану нейронну карту боїд по каналу зв'язку передає всім доступним боїдам зграї. У процесі руху боїд отримує нові «знання» про проведені дослідження у вузлах координатної сітки і відповідно до них коригує нейронну карту.

Кількість таких координатних сіток на цільовій мапі відповідає кількості вильотів зграї боїдів для виконання поставленої задачі з обстеження дослідної поверхні.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На початку роботи алгоритму на основі польотної карти створюється квадратна матриця подій K -го порядку, де K – кількість опорних точок в одній стороні побудованої квадратної координатної сітки, що покриває частину цільової території за топологією рис. 3а, яка можлива для моніторингу протягом одного вильоту зграї боїдів. У перетину i -го рядка та j -го стовпця даного масиву записуються «0», якщо точка входить до n -го з N просторових коридорів SC_n , та «1», якщо точка не входить до цього коридору (тобто, для даного суб-рою точка вважається вже обстеженою). Ця ж матриця A є нейронною картою НМХ:

$$\left\{ a_{ij}^{(n)} \mid n = \overline{1, N}; a_{ij}^{(n)} \mid i = \overline{1, K}; a_{ij}^{(n)} \mid j = \overline{1, K} \right\};$$

$$a_{ij}^{(n)} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } a_{ij} \in SC_n; \\ 1, & \text{якщо } a_{ij} \notin SC_n. \end{cases} \quad (3)$$

На другому етапі згідно з запропонованим методом для кожного n го суб-рою складається окрема нейронна карта НМХ A_n за правилами:

$$A = \left\| a_{ij}^{(n)} \right\|_{i,j=1}^K = \left\| \begin{matrix} a_{11}^{(1)} & \dots & a_{1j}^{(n)} & \dots & a_{1K}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1}^{(n)} & \dots & a_{ij}^{(n)} & \dots & a_{iK}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{K1}^{(n)} & \dots & a_{Kj}^{(n)} & \dots & a_{KK}^{(n)} \end{matrix} \right\|. \quad (4)$$

Тобто, якщо $a_{ij}^{(n)} = 1$, то такий вузол для n -го суб-рою вважається вже обстеженим.

На третьому етапі виконується синтез маршрутів боїдів суб-рою в межах кожного n -го просторового коридору.

Розглянемо обмеження технічної реалізації такої топології в зграї БПЛА, що складається з суб-роїв. Після вимірювань та/або відеомоніторингу та/або виконання інших технологічних процесів стан даного вузла в матриці (тобто нейрона матриці Хопфілда) змінюється з «0» на «1» (ставиться ознака, що вузол обстежений). Такий стан нейронної мережі з виходу обстеженого вузла (фактично – з RF -передавача БПЛА) передається на входи всіх інших вузлів, тобто всім БПЛА, в яких би вони вузлах не знаходились в даний час. Таким чином, вхідні сигнали потрапляють на всі нейрони, а вихідними можуть бути сигнали як з усіх нейронів, так і з частини нейронів після декількох циклів функціонування. Тобто, нейронна карта НМХ поновлюється з деякими часовими затримками Δt_{ij} .

Робота алгоритму завершується, коли вже виконаний обліт всіх опорних точок кожного просторового коридору, а також відома довжина шляху кожного маршруту. Маршрут являє собою масив послідовності опорних точок, причому найперша і остання точка – це завжди буде точка вильоту боїда (суб-рою) зграї.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У нашому випадку, коли в зграї використовується шість БПЛА, що працюють у складі 4 суб-роїв в 4 просторових коридорах $SC_1 - SC_4$, можна нарахувати 15 зв'язків у повнозв'язному площинному (2D) графі (рис. 5).

В загальному випадку кількість зв'язків в наведеній топології можна розрахувати за формулою $N \cdot (N-1)/2$, де N – загальна кількість боїдів у зграї. Це означає, якщо для

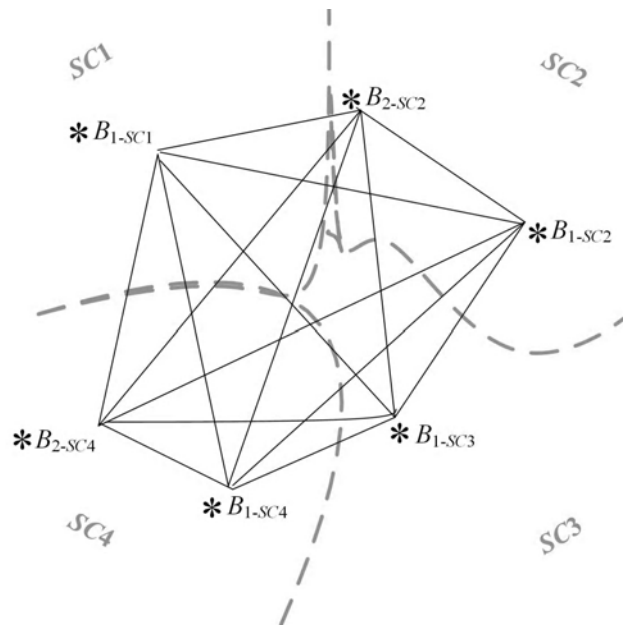


Рисунок 5 – Повнозв'язний граф для $M=6, N=4$

обстеження частини території з 100 координатних вузлів випустити зграю з 100 боїдів, то при цьому потрібно забезпечити 4950 бездротових зв'язків. Навіть якщо врахувати необхідність використання трансферних вузлів для передачі даних на вхід всіх нейронів НМХ (окрім вузла-передавача) при відсутності прямої електромагнітної видимості між боїдами або при перевищенні можливої дальності сигналу [10], наявних обчислювальних та телекомунікаційних ресурсів на борту боїдів розглянутої мережі буде недостатньо.

Тому доцільно вважати, що боїди обмінюються картою НМХ з деякою часовою затримкою, коли відстань між ними не перевищує можливу для телекомунікаційного обміну.

Наприклад, для координатної сітки розміром 10x10 точок, яка поділена на 4 просторові коридори за правилами, наведеними на рис. 3а, матриці подій A_n для просторових коридорів SC_1 та SC_2 виглядатимуть:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix};$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Для інших коридорів SC_n матриця A_n будується аналогічно.

Матриця A повної координатної сітки має розмір $K \times K$ й отримується шляхом поелементної диз'юнкції матриць $A_1 \dots A_4$.

$$A = A_1 \vee A_2 \vee A_3 \vee A_4. \quad (6)$$

Наприклад, після виконання завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 відповідними суб-роями матриця A , обчислена за формулою (6), набуває вигляду:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

З матриці у (7) видно, що просторові коридори SC_3 та SC_4 ще не обстежені. Якщо у результаті критичного застосування боїди в зазначених коридорах втрачені, тоді оператором КФС повинні бути перевизначені початкові змінні D_{ij} нейронам карт A_1 і A_2 НМХ, і боїди, які звільнились від виконаних завдань у просторових коридорах SC_1 та SC_2 , повинні бути направлені у просторові коридори SC_3 та SC_4 .

Алгоритм закінчується, коли всі значення матриці A повністю обстеженої координатної сітки частини досліджуваної території стають одиничними.

Таким чином, поведінка кожного суб-рою присвячена вирішенню єдиної для такого суб-рою задачі – виконання будь-якої технологічної функції та/або моніторингу характеристик території у призначеному цьому суб-рою просторовому коридорі чітко визначених розмірів та конфігурації, з обов'язковим вимірюванням характеристик (виконанням технологічних функцій) в кожному з наявних на координатній сітці вузлів.

Кожен з цих боїдів буде абсолютно автономною одиницею, яка буде в змозі приймати свої власні рішення і виконувати дії. Але кожен боїд буде в змозі «спілкуватися» з рештою боїдів суб-рою, наслідуючи, таким чином, поведінки рою бджіл і виконуючи спільне завдання.

НМХ може бути корисною в цьому випадку для того, щоб жоден вузол не був обстежений двічі. Для цього треба скористатися властивістю мережі Хопфілда, що з виходу кожного з нейронів подається сигнал на входи всіх інших нейронів. Тоді факт виконання дії (вимірювання, фотографування тощо) у вузлі координатної сітки кожним боїдом стає відомим решті боїдам суб-рою, й такий вузол викреслюється з числа опорних точок, відповідний нейрон переходить в нульовий стан, і боїд не виконує повторної дії в такому вузлу.

Таким чином, глобальні рішення щодо обстеження вузлів координатної сітки приймаються «зграєю» на основі всіх наявних колективних даних. Завдяки цьому суб-рій є універсальним утворенням, що добре пристосовується до групової поведінки членів суб-рою (БПЛА)

та слабо чутливе до втрати деяких його членів. Зграя, що поділена на суб-рої, може втратити деяку кількість боїдів, але все ж залишитися здатною до виконання завдання з обстеження частини мапи, обмеженої координатною сіткою з поділом на просторові коридори.

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованого методу. Результати планування маршрутів боїдів суб-роїв наведені у табл. 1 і табл. 2. У табл. 1 наведені результати застосування запропонованого методу з топологією мережі, при якій для кожного суб-рою власна окрема точка вильоту, за умови застосування боїдів зі швидкістю польоту 5 м/с та відстанню між вузлами координатної сітки $L = 100$ м.

В табл. 2 наведені аналогічні дані для БПЛА, які мають спільну точку вильоту.

З аналізу табл. 1–табл. 2 видно, що запуск суб-роїв з різних точок вильоту скорочує час обстеження території на 10,4%. Але при цьому загальна вартість маршруту зростає на 2,6%. Це означає, що в такому разі треба приділяти більше уваги питанням оптичної навігації, більш точному позиціонуванню БПЛА при здійсненні складного маневрування між вузлами координатної сітки. Необхідно передбачити режим повернення БПЛА на початкову позицію.

Треба відзначити, що при такому підході пройдений суб-роєм шлях не буде мінімальним, і описане рішення є тільки суб-оптимальним для TSP. Але використання мережі Хопфілда дозволяє знаходити задовільні рішення досить швидко, без додаткового аналізу. Це робить можливим використовувати розроблений метод синтезу маршруту відокремленої групи безпілотних апаратів (з конкатенацією декількох двовимірних рішень у тривимірному просторі) у швидкодіючих мережах, наприклад, таких, як зграя боїдів. Використання класичних методів, що дозволяють знаходити оптимальне рішення з використанням множинних ітерацій, може зажадати таких тимчасових і обчислювальних ресурсів, що приведуть до краху зграї боїдів при несвоєчасному отриманні корекції маршруту.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з табл. 1–табл. 2, запропонований синтезу маршрутів зграї БПЛА з розбиття на суб-рої, що діють в двовимірних просторових коридорах, дозволяє істотно

прискорити виконання завдань обстеження ділянок території. Описаний підхід забезпечує рішення задачі комівояжера з відвідуванням всіх вузлів координатної сітки, що покриває карту частини досліджуваної поверхні, а також високий рівень узагальнення даних моделлю.

Це дозволяє рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Сформовані матриці подій дозволяють забезпечувати активність моніторингових або функціональних пристроїв БПЛА (відеокамери, метео-датчики, пристрої розпорошення речовин та ін.) тільки у власному просторовому 2D-коридорі, а також і пасивність цих же пристроїв при попаданні деяких БПЛА суб-рою в чужий для нього просторовий коридор. Такий підхід підвищує час життєздатності зграї шляхом виключення дублювання задач у вузлах та економії обмежених енерго-, обчислювальних і технологічних ресурсів БПЛА.

Збільшення кількості БПЛА в кожному суб-рої або ущільнення вузлів координатної сітки прискорює виконання завдання цим суб-роєм, проте веде до значного витрачання загальних ресурсів зграї і до підвищення небезпеки зіткнень БПЛА всередині зграї. Таким чином, вибір характеристик зграї і планування завдань повинні бути спрямовані на пошук оптимального співвідношення K^2/N , що забезпечує прийнятний рівень енергоспоживання, матеріальних і часових витрат на виконання завдання на території.

ВИСНОВКИ

Експерименти показують, що синтез топології суб-роїв безпілотних апаратів з використанням нейронної мережі Хопфілда є доцільним та корисним для підвищення ефективності використання БПЛА при обстеженні території.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропонований метод маршрутів суб-роїв БПЛА на основі нейронної мережі Хопфілда, який в процесі синтезу маршрутів завдяки формуванню топології суб-роїв з використання НМХ виключає дубляж виконання моніторингових та/або технологічних функцій зграєю БПЛА у визначених вузлах координатної сітки, якою покривається частина мапи обстежуваної території.

Запропонований метод дозволяє істотно прискорити час обстеження території, що виконується з викорис-

Таблиця 1 – Результати методу з різних точок вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_1	1	25/25	8,9	268
SC_2	PF_2	2	25/13 і 12	4,0	268
SC_3	PF_3	1	25/25	8,5	256
SC_4	PF_4	2	25/13 і 12	3,9	252
РАЗОМ:		6	100	23,3	1044

Таблиця 2 – Результати методу з однієї точки вильоту БПЛА

№ суб-рою (просторового коридору)	№ точки вильоту БПЛА	К-сть БПЛА	К-сть вузлів маршруту (разом/розподіл між БПЛА)	Середній час виконання задачі суб-роєм, хв	Загальна вартість маршруту
SC_1	PF_0	1	28/28	9,3	278
SC_2		2	27/14 і 13	4,5	264
SC_3		1	22/22	7,9	236
SC_4		2	23/12 і 11	4,3	240
РАЗОМ:		6	100	26,0	1018

танням БПЛА, підвищити економію обмежених обчислювальних та енергоресурсів безпілотних апаратів, що дозволяє збільшити час їх життя.

Практичне значення одержаних результатів роботи полягає в тому, що застосування запропонованого методу дозволяє подовжити час життя зграї ресурсообмежених недорогих птахоподібних об'єктів (боїдів). Експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу. Отримано залежність моделі, синтезованої запропонованим методом, від місця розташування вузлів вильоту кожного суб-рою боїдів. Використання отриманої залежності дозволяє на практиці більш раціонально вибирати місце старту суб-рою, кількість координатних сіток для розбиття досліджуваної поверхні, відстань між вузлами сітки, забезпечуючи прийнятну точність нейромоделі в процесі обстеження вузлів, з забезпеченням зниження загальної вартості маршрутів.

Перспективи подальших досліджень полягають у доповненні запропонованих рішень адаптивною зміною висоти роботи кожного суб-рою в залежності від рівня критичності ситуації на обстежуваній території (пожежа, перевищення ГДК шкідливих речовин тощо).

ПОДЯКИ

Робота виконана за підтримки Міністерства освіти і науки України в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт Чорноморського національного університету ім. Петра Могили за темами «Створення поліметричних датчиків інформаційно-вимірювальних систем з живленням елементів від енергії вимірювального сигналу» (держ. реєстр. № 0115U000316, 2015–2016 рр.) та «Розроблення бездротових енергонезалежних інформаційно-вимірювальних мереж критичного застосування військово-цивільного призначення» (2017–2018 рр.).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ачасова А. Безпілотники – сучасний інструмент для аграрія [Електронний ресурс] / А. Ачасова // АгроПРО. – 2016, Жовтень (спецвипуск). – С. 44–46. – Режим доступу: URL: <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.
2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Даринцев О. В. Нейросетевой алгоритм планирования траекторий для группы мобильных роботов / О. В. Даринцев, А. Б. Мигранов, Б. С. Юдинцев // Искусственный интеллект; Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. – 2011. – № 1. – С. 154–160.
4. Rahman T. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour / T. Rahman, M. Hariadi, S. Sumpeno // Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar, Surabaya, Indonesia, 22–24 May. 2014 : proceedings [Electronic resource]. – Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning / N. Wang, L. Wang, X. Go, L. Chen, L. Shen // Advances in neural network research and applications (LISEE, 67). – Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 235–243.
6. Субботін С. О. Побудова повністю визначених нейро-нечітких мереж з регулярними розбиттям простору ознак на основі вибірок великого обсягу / С. О. Субботін // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 47–53.
7. Hopfield J. J. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration / J. J. Hopfield, C. D. Brody // Proceedings of the NAS of the USA. – 2001. – Vol. 98, No. 3. – P. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors / [M. P. Musiyenko, I. M. Zhuravska, I. V. Kulakovska, A. V. Kulakovska] // Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. – Kyiv : IEEE; NTUU “KPI”, 2016. – P. 382–387. DOI: 10.1109/LNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations / A. Melnyk, V. Golemba, A. Bochkaryov // Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings. – Scotland, UK : NASA/ESA, 2007. – P. 568–572.
10. Журавська І. М. Забезпечення стабільного бездротового зв'язку у кібер-фізичній системі з рухомими об'єктами / І. М. Журавська // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – Т. 5, № 2(31). – С. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.

Стаття надійшла до редакції 06.02.2017.

Після доробки 02.06.2017.

Журавская И. Н.¹, Мусиенко М. П.²

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант кафедры компьютерной инженерии Черноморского национального университета им. Петра Могили, Николаев, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных наук Черноморского национального университета им. Петра Могили, Николаев, Украина

СИНТЕЗ МАРШРУТОВ СУБ-РОЕВ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ХОПФИЛДА ДЛЯ ОБСЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ

Актуальность. Решена актуальная задача экономии ограниченных энерго-, вычислительных и технологических ресурсов малогабаритных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Цель работы – создание метода синтеза маршрутов суб-роев БПЛА, продлевающего время жизнеспособности стаи БПЛА.

Метод. Предложен метод построения моделей частиц («суб-роев») стаи БПЛА, исключающий дублирование выполнения задачи в узлах координатных сеток, которыми покрывается исследуемая территория. Совмещение нейронной карты сети Хопфилда и полетной карты для каждого суб-роя обеспечивает сообщение через модули беспроводной связи между БПЛА о факте выполнения мониторинговой или технологической задачи любым отдельным БПЛА суб-роя остальным БПЛА. Предложенный подход позволяет использовать функции самозаживления суб-роев стаи птицеподобных объектов («бoids») путем переопределения задач суб-роев как кибер-физической системы в случае потери отдельных боидов при их критическом применении. Структура получаемых моделей поведения суб-роев, реализованная в двумерных пространственных коридорах произвольной формы с последующей конкатенацией полученных 2D-решений, значительно упрощает решение задачи коммивояжера в трехмерном пространстве и позволяет существенно ускорить выполнение задач обследования участков территорий.

Результаты. Разработано программное обеспечение (ПО), реализующее предложенный метод, которое использовано при проведении вычислительных экспериментов по исследованию свойств метода.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и реализующего его ПО, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач обследования территории с использованием стаи боидов.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, суб-рой, стая, нейронная сеть Хопфилда, дублияж задач

Zhuravska I. M.¹, Musiyenko M. P.²

¹Ph.D., Associate Professor, Doctorant of Department of Computer Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Dean of Faculty of Computer Science, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv, Ukraine

THE SYNTHESIS OF ROUTES OF UAVS' SUB-SWARMS BASED ON HOPFIELD NEURAL NETWORK FOR INSPECTION OF TERRITORIES

Context. The urgent task the economy of the limited power, computing and technological resources of small unmanned aerial vehicles (UAVs) has been solved.

Objective is a creation of sub-swarms' routes synthesis method with increasing the time of UAV flock viability.

Method. The method for model building of the UAVs' sub-swarm is offered. It allows to avoid the dubbed tasks at any node of grids that cover the survey territory. Combining Hopfield neural network's map and flight map for each sub-swarm provides an information via wireless communication modules of UAV about the executed facts of monitoring or technological tasks by any individual UAV of sub-swarm to rest of UAVs. This approach allows to use the self-healing properties of the sub-swarms in flocks of bird-like objects ("boids") by means redefining the tasks of sub-swarms as a cyber-physical system in case of loss of several boids during a critical usage. The structure of the resulting sub-swarms' behavior models is implemented in two-dimensional spatial corridors of arbitrary shape; then achieved 2D-solving are concatenated. This can significantly speed up the tasks survey territories.

Results. The software implementing proposed method have been developed and used in computational experiments investigating the properties of the method. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and software.

Conclusions. The experiments also allow to recommend them for use in practice to solve the problems survey area using boids' flock.

Keywords: unmanned air vehicle, sub-swarm, flock, Hopfield neural network, dubbed tasks.

REFERENCES

1. Achasova A. Drones – modern tools for farmers [Electronic resource], *AgroPRO*, 2016, Oct. (special issue), pp. 44–46. Access mode: <https://agropro.club/articles/bezpilotniki-suchasnij-instrument-dlya-agrariya/>.
2. Perdix fact sheet: Release of the Strategic capabilities office DoD [Electronic resource]. Access mode: <https://www.defense.gov/Portals/1/Documents/pubs/Perdix%20Fact%20Sheet.pdf>.
3. Darintsev O. V., Migranov A. B., Yudincev B. S. Neural network algorithm of planning trajectories for a group of mobile robots, *Artificial Intelligence ; Ufa state aviation technical university*, 2011, No. 1, pp. 154–160.
4. Rahman T., Hariadi M., Sumpeno S. NCP striking pattern in combat situation using boids behaviour, *Intelligent technology and its application (ISITIA) : IEEE international seminar*. Surabaya, Indonesia, 22–24 May, 2014 : proceedings [Electronic resource]. Access mode: <http://isitia.its.ac.id/base/index.php/SITIA/2014/paper/viewFile/343/143>.
5. Wang N., Wang L., Go X., Chen L., Shen L. Hopfield neural network guided evolutionary algorithm for aircraft penetration path planning, *Advances in neural network research and applications (LISEE, 67)*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 235–243.
6. Subbotin S. A. Building a fully defined neuro-fuzzy network with a regular partition of a feature space based on large sample, *Radio electronics, computer science, control*, 2016, No. 3, pp. 47–53.
7. Hopfield J. J., Brody C. D. What is a Moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatiotemporal integration, *Proceedings of the NAS of the USA*, 2001, Vol. 98, No. 3, pp. 1282–1287. DOI: 10.1073/pnas.98.3.1282.
8. Musiyenko M. P., Zhuravska I. M., Kulakovska I. V., Kulakovska A. V. Simulation the behavior of robot sub-swarm in spatial corridors, *Electronics and nanotechnology (ELNANO) : 36th international conference*, Kyiv, 19–21 Apr. 2016 : proceedings. Kyiv : IEEE; NTUU "KPI", 2016, P. 382–387. DOI: 10.1109/ELNANO.2016.7493090.
9. Melnyk A., Golemba V., Bochkaryov A. Multiagent approach to the distributed autonomous explorations, *Adaptive hardware and systems AHS 2007 : conference, Edinburgh, 5–8 Aug. 2007 : proceedings*. Scotland, UK, NASA/ESA, 2007, pp. 568–572.
10. Zhuravska I. Ensuring a stable wireless communication in cyber-physical systems with moving objects, *Technology audit and production reserves*, 2016, Vol. 5, No. 2(31), pp. 58–64. DOI: 10.15587/2312-8372.2016.80784.

УДК 004.9

Коробчинський М. В.¹, Чирун Л. Б.², Висоцька В. А.³, Нич М. О.⁴

¹Д-р техн. наук, старший науковий співробітник Військово-дипломатичної академії імені Євгена Березняка, Київ, Україна

²Провідний спеціаліст інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁴Магістр кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ МАТЧІВ У КІБЕРСПОРТІ

Актуальність. Зараз є актуальним розроблення систем прогнозування матчів у кіберспорті, це пов'язано з активним розвитком кіберспорту. У цій статті реалізовано можливість прогнозувати матчі користувачів.

Мета. Метою виконання роботи є проектування моделі системи колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті з використанням сучасної технології нейропрогнозування. Завданням є розроблення системи для спільного користувацького прогнозування результатів кіберспортивних матчів та самостійного опрацювання інформації і видачі власного прогнозу. До основних задач належать наступні: облік та аналіз всіх минулих і майбутніх ігор; облік та аналіз характеристик/результатів всіх команд; надання можливості користувачу персонально робити прогноз на кожен матч; визначення шансу на виграш команди на основі даних за попередні матчі.

Метод. Проблема вирішено методом опитування експертів шляхом проведення аналітичних записок та за допомогою штучної нейронної мережі. В створеній нейромережі є три шари. Перший шар складається із 10 нейронів – рецепторів, або нейронів вхідних даних. Другий шар нейронів є внутрішній. Третій шар нейронів є вихідний, в ньому є лише 2 нейрони. Вхідною інформацією для алгоритму є кількість виграних матчів з останніх 10; кількість виграних матчів перед даною зустріччю (вінстрік); рейтинг команди; стабільність складу (час незмінності складу команди); середній показник програшів даної команди. Відповіддю є 1 або 2 (перемога конкретної команди).

Результати. Для досягнення результату проведений аналіз відповідної літератури з інформацією про основні види колективного прогнозування. Розроблено дерево мети, і проведено систематичний аналіз предметної області. Застосовано метод інтерв'ю з експертами. Інтернет-ресурси реалізовані за CMS Drupal. Проаналізовані основні методи колективного прогнозування. Проведений систематичний аналіз об'єкта дослідження і предмета, цілей, побудованих дерев, визначено проблему і побудовано UML-діаграми. Проаналізовано застосування методу інтерв'ю з експертами. Реалізовано веб-сайт з CMS Drupal і мови програмування PHP.

Висновки. На основі розробленого алгоритму розрахунку прогнозів та навчання нейромереж реалізовано незалежний від людського фактору процес прогнозування матчів в кібер-спорті. Наявність такої системи значно спростить пошук прогнозів на кібер-спортивні матчі та дасть можливість кожному бажаному прийняти участь у прогнозуванні матчів. Система дає новий поштовх до вирішення проблеми прогнозування результатів не лише у кібер-спорті, а і у спорті взагалі.

Ключові слова: кіберспорт, інформаційна система.

НОМЕНКЛАТУРА

ІС – інформаційна система;

ПО – предметна область;

ШНМ – штучні нейронні мережі;

БНМ – біологічних нейронних мереж;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

S – система прогнозування кібер-матчів;

X – вхідні дані ІС з різних достовірних джерел-сайтів (наприклад, історія ігор команд та учасників команд в інших змаганнях);

C – внутрішній контент системи, набутий під час її функціонування;

N – штучна нейронна мережа;

T – часовий проміжок аналізу діяльності команди;

E – експертна оцінка;

Q – запити від користувачів ІС;

U – обмеження на аналіз даних для прогнозування;

Y – вихідні дані ІС як результат прогнозування;

ϕ – функція збору даних для прогнозування;

φ – функція навчання ШНМ;

θ – функція прогнозування результатів матчів;

N_n – кількість користувачів, що прийняли участь у голосуванні;

K_i – кількість користувачів, що проголосували за i-ту команду.

ВСТУП

Відеоігри з'явилися нещодавно та темпи їх еволюції вражає: від простеньких дитячих іграшок на автоматах з піксельною графікою до комп'ютерних ігор у вигляді інтерактивного кіно (спецефекти, озвучки від акторів і моделі для лицьової анімації). Еволюція ігор відбулась як через технологічні вдосконалення, так завдяки появі Інтернет вони стали багатокористувацькими. Вперше кіберспортивні риси та змагання по мережі з'явилися в Quake: Arena, Starcraft. Ігри захоплювали не графікою, а відмінним динамічним геймплеем, вимагали від гравців нелюдською реакції і багатьох годин тренувань. Online змаганнями не обмежувалися, люди почали збиратися на LAN-турніри в Інтернет-клубах [1]. Активно кіберспорт почав розвиватись на протязі останніх 5–10 рр із-за доступності Інтернет.

Стрімкий розвиток кіберспорту значно вплинув на ігрову індустрію [1]. Розробники випускають ігри, в яких гравці об'єднуються в команди і змагаються між собою.

Виникли турніри, професійні команди, і фанати. Виникла потреба прогнозування переможця. Зазвичай процес прогнозування покладаний на вузьке коло так званих експертів з цього питання – букмекерів або людей, які постійно спостерегають за ходом гри на конкретному інформаційному ресурсі. На ІС інформаційного ресурсу кіберспорту покладені лише функції фіксації статистики матчів та ігор. Це унеможливило взяти участь в успішному прогнозуванні результатів матчів для простих спостерігачів змагань в кіберспорті. Метою виконання роботи є проектування моделі системи колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті з використанням сучасної технології нейропрогнозування.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Застосування методу нейромережного прогнозування на основі аналізу статистики попередніх результатів матчів та рівня професійності команд та ігор значно спрощує процес отримання успішного прогнозу для простих спостерігачів змагань в кіберспорті. Завданням є розроблення загальної архітектури ІС для спільного користувацького прогнозування результатів кіберспортивних матчів та самостійного опрацювання інформації і видачі власного прогнозу. ІС має навчатися на основі зібраної статистики змагань на протязі певного періоду часу з врахуванням учасників змагань та їх профілів.

Формальною моделлю системи прогнозування кіберматчів є кортеж

$$S = \langle X, C, N, T, E, Q, U, Y, \phi, \theta \rangle.$$

До основних задач ІС належать наступні: облік та аналіз всіх минулих/майбутніх ігор; облік та аналіз характеристик/результатів всіх команд; надання можливості користувачу персонально робити прогноз на кожен матч; визначення шансу на виграш команди на основі даних за попередні матчі. Якщо з першими трьома задачами успішно справляються більшість ІС прогнозування матчів у кіберспорті, то з останньою задачею виникають певні складнощі із-за того, що простий користувач ІС має залежити від думки експертів – окремих букмекерів, тобто від людського фактору. Автоматичне прогнозування результатів матчів та можливість системи навчатися на протязі певного періоду часу сприятиме покращенню результатів прогнозування та вносить елемент незалежності прогнозування від людини.

Вхідні дані з різних джерел X (стабільність складу команди), внутрішній контент ІС C (наприклад, історія ігор на цьому сайті, зміна учасників команди, активність команди тощо), експертні оцінки E (рейтинг команд, середній показник програшів даної команди) та обмеження на прогнозування U (наприклад, аналіз лише останніх 10 матчів) за певний проміжок часу T (наприклад, матчі лише за останній рік або час незмінності складу команди) формують підґрунтя для процесу прогнозування штучною нейронною мережею N

$$Y = \theta \circ \phi \circ \phi,$$

де $C = \phi(X, T, E, U)$, $N = \phi(C, T, U)$ та $Y = \theta(Q, N, T, U)$. Відповіддю є 1 або 2 (перемога конкретної команди).

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Методи прогнозування – це різноманітні прийоми і способи мислення, що дають змогу на основі аналізу ретроспективних даних, екзогенних і ендогенних зв'язків об'єкта прогнозування, а також їхніх змін у межах розглянутого явища і процесу, вивести твердження певної вірогідності відносно майбутнього розвитку об'єкта [2]. Відомо більше за 150 методів і прийомів у прогнозуванні. Кожен метод має особливості залежно від мети його використання і рівня проведених досліджень. Вибір методів прогнозування здійснюється відповідно до характеру об'єкта і вимог, які висуваються до інформаційного забезпечення [2–5]. Для спільного користувацького прогнозування результатів кіберспортивних матчів достатньо використовувати інтуїтивні методи прогнозування. Вони дають змогу отримати прогнозу оцінку стану розвитку об'єкта в майбутньому незалежно від інформаційної забезпеченості. Будеться раціональна процедура інтуїтивно-логічного мислення людини в поєднанні з кількісними методами оцінки й опрацювання отриманих результатів. Узагальнена думка експертів та їх експертиза є вирішенням проблеми [2].

Процес експертної оцінки включає такі напрями: формування експертної групи; підготовку і проведення експертизи; статистичне опрацювання отриманих результатів опитування [3, 5]. Етапи проведення експертних оцінок: постановка проблеми; відбір експерта; опитування експерта; опрацювання експертних оцінок. Методи експертних оцінок поділяють: за кількістю експертів: індивідуальні та колективні; за технологією опрацювання інформації: прямі і експертні методи зі зворотним зв'язком; за технологією отримання прогнозу оцінки [5]. Процес експертної оцінки краще реалізувати через штучні нейронні мережі. Це математичні моделі, а також їх програмні або апаратні реалізації, побудовані за принципом організації й функціонування біологічних нейронних мереж – мереж нервових кліток живого організму. ШНМ не програмують у звичному розумінні цього слова, вони навчаються. Можливість навчання – одне з головних переваг нейронних мереж перед традиційними алгоритмами [6–7]. Задачі, які вирішують ШНМ, зводяться до апроксимації багатовимірних функцій, тобто побудови відображення $F: x \rightarrow y$ [7]. Якщо розглядати ШНМ як деяке середовище для опрацювання інформації, тоді її можна задати шляхом визначення елементів даного середовища та правил їх взаємодії. В цьому випадку ШНМ є структурою, яка складається з великої кількості процесорних елементів, кожен з яких має локальну пам'ять і може взаємодіяти з іншими процесорними елементами за допомогою комунікаційних каналів з метою передачі даних, що можуть бути інтерпретовані довільним чином. Процесорні елементи незалежно в часі опрацьовують локальні дані, що поступають до них через вхідні канали. Зміна параметрів алгоритмів такої опрацювання залежить тільки від характеристик даних. ШНМ – обчислювальні парадигми, які реалізують спрощені моделі БНМ (локальні ансамблі нейронів, об'єднані синаптичними зв'язками; сукупність ансамблів формує мозок із різноманітними функціональними можливостями).

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Оскільки на даний момент кіберспорт почав швидко розвиватись, то з'явилась потреба в ресурсі, де фанати зможуть робити прогнози майбутніх матчів та дізнатись результати минулих. Наявність ІС колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті дає можливість користувачеві отримати доступ до необхідної інформації використовуючи один ресурс. Користувач може переглянути результати минулих матчів, подивитись оцінку шансів на виграш кожної з команд на майбутніх матчах та самому зробити прогноз на ту чи іншу команду. Призначенням такої системи є збір оціночних тверджень користувачів відносно кожного матчу та інтелектуальне прогнозування результату даного матчу, також система порівнює прогноз із результатом і може визначити відсоток матчів, які були спрогнозовані користувачами правильно. ІС колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті повинна розв'язувати такі задачі: реалізація методу прогнозування на основі збору голосів користувачів; визначення ефективності методу (порівняння прогнозу з реальними результатами); швидкий та зручний пошук інформації (результатів попередніх ігор).

Необхідність створення такої системи викликана відсутністю на даний момент реалізованого аналогу, який би об'єднував в собі результати і прогнози не з якоїсь певної гри, а з декількох; а також тим, що аналогі є платними. Інтуїтивні методи прогнозування – це методи вирішення проблеми за допомогою інтуїції, досвіду та думки експертів-учасників даних методів. Метод експертних оцінок оснований на проведенні інтуїтивного та логічного аналізу проблеми з кількісною оцінкою і опрацюванням результатів. Після цього узагальнена думка експертів вважається рішенням даної проблеми. Використання інтуїції, логічного мислення та кількісних оцінок з формального опрацювання дозволяє одержати ефективне вирішення проблеми. Особливостями методу експертних оцінок є, по-перше, обґрунтована організація проведення всіх етапів експертизи забезпечує найбільшу ефективність роботи на кожному з етапів; по-друге, застосування кількісних методів як при організації експертизи, так і при оцінці суджень експертів і формальній груповому опрацюванні результатів. Найбільш часто ці методи використовують при розгляді соціально-економічних проблем, де неможливо виробити формалізовану прогностичну модель [4–5, 8–10]. Метод експертних оцінок проводять трьома методами як інтерв'ю, аналітичні записки або написання сценарію. Проблема вирішено методом опитування експертів шляхом проведення аналітичних записок та за допомогою ШНМ. Етапи застосування методу колективних експертних оцінок:

- формування експертної групи (відбір експертів проводиться з використанням методів самооцінки, методи взаємної оцінки, по минулому досвіду);
- визначення компетентності експертів;
- оцінка показності або репрезентативності групи;
- отримання індивідуальних суджень експертів по заданій проблемі;

- узагальнення думок про відносну важливість заданої проблеми експертами;
- оцінка ступеня узгодженості експертів з урахуванням коефіцієнта варіації;
- побудова гістограми розподілу думок експертів;
- формулювання плану прогнозу.

Технологія узагальнення оцінок залежить від виду оцінок, кількості даних оцінок. Якщо прогнозом є число, то може використовуватися середнє значення. Якщо відповіді експертів різні, то використовується теорія ігор. Якщо оцінка експертів давалася у вигляді рангів, то в процесі узагальнення визначається сума рангів й узгодженість оцінок за допомогою коефіцієнта конкордації; Спірмана або Кендела. Про достовірність групових експертних оцінок зазвичай судять по їх узгодженості. При проведенні експертних опитувань, як правило, отримують оцінки декількох об'єктів. Визначити узгодженість оцінок, які даються різними експертами, можна за допомогою непараметричного двохфакторного дисперсійного аналізу. При виконанні аналізу, в якості першого чинника розглядаються експерти, в якості іншого чинника – об'єкти, які оцінюються експертами. Рівні першого фактора – це різні експерти, а рівні другого чинника – різні об'єкти.

Узгодженість оцінок експертів визначається за відсутності впливу фактора, пов'язаного з експертами. У поширених статистичних пакетах для цього використовують критерій Фрідмана (Friedman) і, якщо є можливість ранжувати експертів за величиною оцінок, то критерій Пейджа (Page). Зазвичай, тестується гіпотеза «є відмінності між середніми значеннями оцінок деяких експертів» з оцінкою рівня значущості гіпотези. Якщо рівень значимості гіпотези не перевищує 5 або 10%, то можна вважати, що оцінки експертів узгоджені і достовірні. Колективна думка експертної групи може бути виражене у формах: кількісних оцінок у фізичних одиницях виміру або у вигляді відношення; бальних оцінок; попарних порівнянь; угруповань (сортування) [5]. Реалізація методу опитування експертів полягає в голосуванні кожного користувача (який вважається експертом) із N_n .

Алгоритм працює наступним чином (рис. 1 а):

Крок 1. Всі бажані користувачі із N_n роблять прогноз на даний матч.

Крок 2. Розрахунок сумарної кількості голосів та за кожну з команд з врахуванням K_i .

Крок 3. На основі голосів здійснюють прогнозування шансу на перемогу кожної з команд у відсотках. Результатом є шанс на перемогу кожної з команд у даному матчі.

В створеній ШНМ є три шари (рис. 1б). Перший шар складається із 10 нейронів – рецепторів, або нейронів вхідних даних. Другий шар нейронів є внутрішній. Третій шар нейронів є вихідний, в ньому є лише 2 нейрони. Вхідною інформацією для алгоритму є кількість виграних матчів з останніх 10; кількість виграних матчів перед даною зустріччю (вінстрік); рейтинг команди; стабільність складу (час незмінності складу команди); середній показник програшів даної команди. Відповіддю є 1 або 2 (перемога конкретної команди).

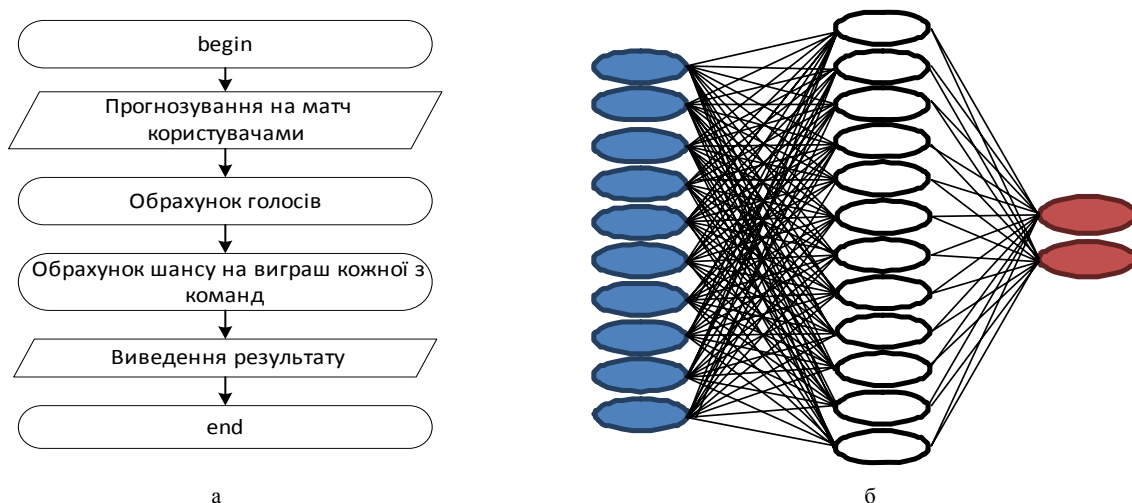


Рисунок 1 – Прогнозування:
а – алгоритм обрахунку прогнозів; б – схема нейронної мережі

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для створення ШНМ використано бібліотеку Fast Artificial Neural Network Library (FANN). Діаграма варіантів використання описує функціональне застосування ІС колективного прогнозування матчів у кіберспорті (рис. 2) [1, 8–10].

Користувачу для прогнозування потрібно пройти автентифікацію. Тоді він може переглянути результати по-

передніх ігор, які його цікавлять. Користувач може подивитись результати прогнозів інших користувачів на даний матч. Після прогнозування результат заноситься в базу даних і об'єднується з іншими прогнозами на даний матч (рис. 3а).

Для отримання результату обрахунку прогнозу користувач повинен завантажити ІС з веб-сайту, ввести потрібні дані про команди, після чого програма видає

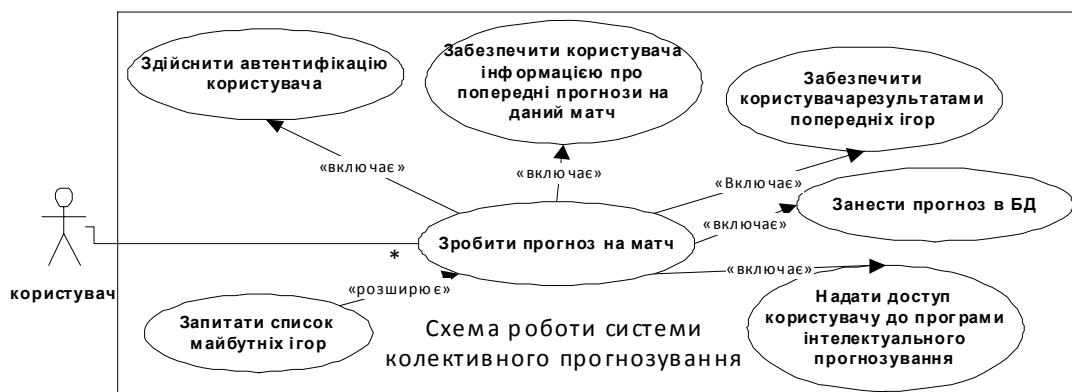


Рисунок 2 – Діаграма варіантів використання ІС прогнозування матчів у кіберспорті

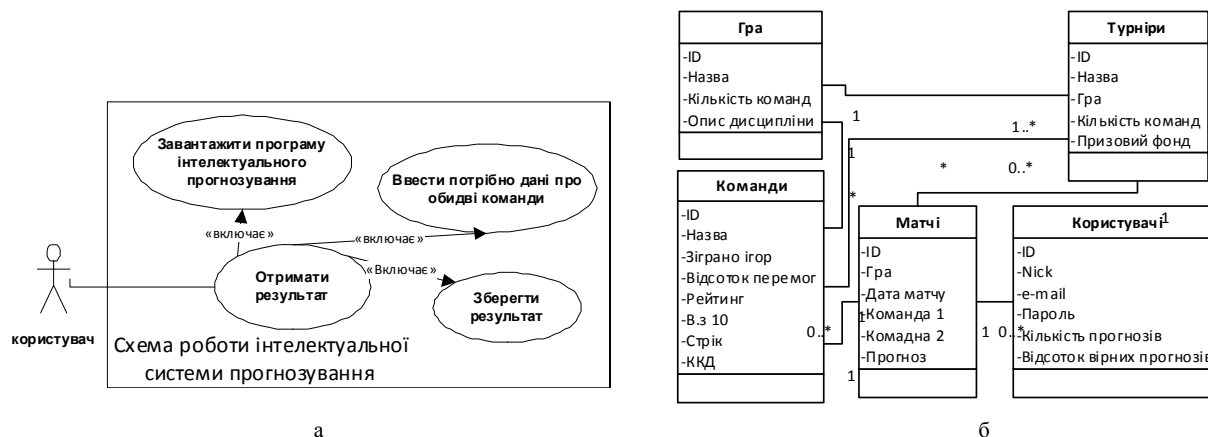


Рисунок 3 – Діаграма ІС:
а – варіантів використання; б – класів

результат, який можна зберегти в текстовий файл. Діаграма класів ІС прогнозу результатів матчів наведена на рис. 3б. Діаграма на рис. 4а демонструє процес роботи ІС починаючи від перевірки наявності доступу до сайту, де розміщена система, до виводу результату користувачеві.

– З'єднання з сайтом. Користувач повинен залогінитись на сайті; якщо він ще не зареєстрований, то він проходить реєстрацію.

– Користувач має обрати одну з 3-х вкладок – прогнозування майбутніх матчів, перегляд результатів минулих або завантажити програму прогнозування.

– Якщо користувач завантажив програму інтелектуального прогнозування, то йому потрібно ввести вхідні дані обох команд.

– Якщо користувач вибрав один з інших варіантів, то він обирає дисципліну, в рамках якої проходить матч, що його цікавить.

– Потім користувач повинен обрати турнір, в рамках якого проходить матч.

– Якщо користувач обрав прогноз, то після вибору потрібного йому матчу він може зробити свій прогноз на даний матч.

– В кінцевому результаті користувач отримує результат прогнозування свого, колективного або інтелектуального.

ІС складається з наступних частин: команди (рис. 4б), опитування (рис. 4в), ігри, програма інтелектуального прогнозування. Вид сторінок опитування включає в себе сторінки, на яких власне проводиться прогнозування результатів матчів, для реалізації цього компоненту в системі використовується модуль Drupal Advanced Poll.

Структура сутності «Опитування» складається з таких полів (рис. 4а): Poll name – власне назва сторінки з даним опитуванням; гра – гра (дисципліна) з якої проводиться даний матч; дата проведення матчу; опис – короткий опис матчу, турнір в рамках якого проводиться матч, стадія; команда 1; команда 2. Вид сторінки команди включає загальну сторінку з переліком команд, та персональну сторінку кожної команди з детальною інформацією про неї. Адміністратор може в будь-який час додати нову команду, якщо в цьому є потреба.

На рис. 5 подана діаграма компонентів ІС прогнозування результатів ігор у кіберспорті. ІС працює з базою даних за допомогою інтерфейсу «IDialog». ІС використовує модулі, такі як User_Api, Advanced Poll, View reference, CK_Editor. ІС використовує три бібліотеки: fann (Fast Artificial Neural Network Library), fannj (додаткова бібліотека для роботи з fann), та бібліотеку jna (Java Native Acces).

Вид сторінок «ігри» включає в себе 3 сторінки, на яких знаходяться всі прогнози по минулих чи майбутніх матчах з трьох дисциплін (ігор), та короткий опис даної гри. На рис. 6а наведено приклад однієї з таких сторінок. ІС створена на основі ШНМ і «навчена» за допомогою даних про попередні матчі між командами. Для створення ШНМ завантажують три бібліотеки: libfan, fannj та jna. З таблиці навчання створеної в третьому розділі створюється файл, який буде мати в собі набір тих самих «уроків» (рис 6б). Тепер створимо ШНМ, «навчимо» її, та збережемо в файл (рис. 7). ШНМ складається із шарів (layer) нейронів, в першому шарі у нас 10 нейронів: виграє з 10 останніх матчів першої команди; виграшний

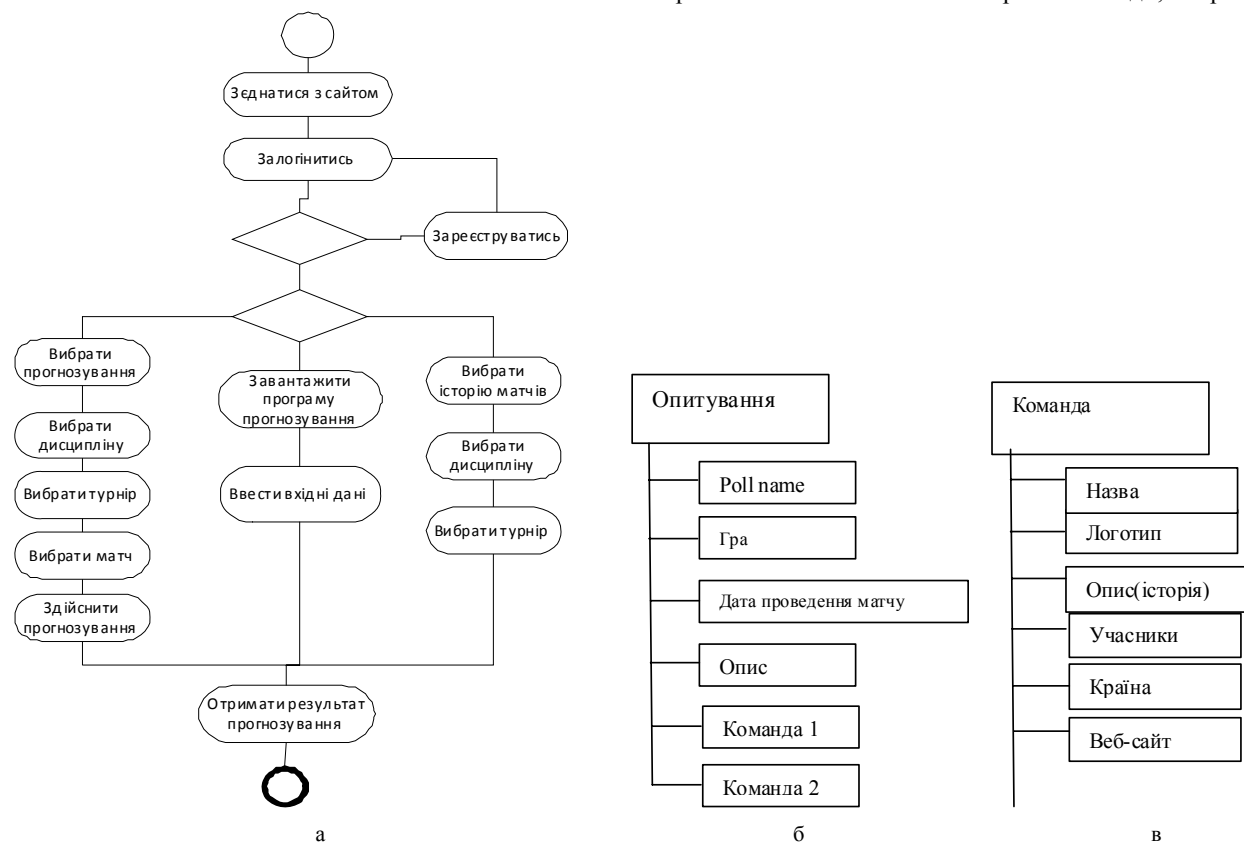


Рисунок 4 – Структура сутності ІС:
а – діаграма діяльності; б – структура сутності «Опитування»; та в – «Команда»

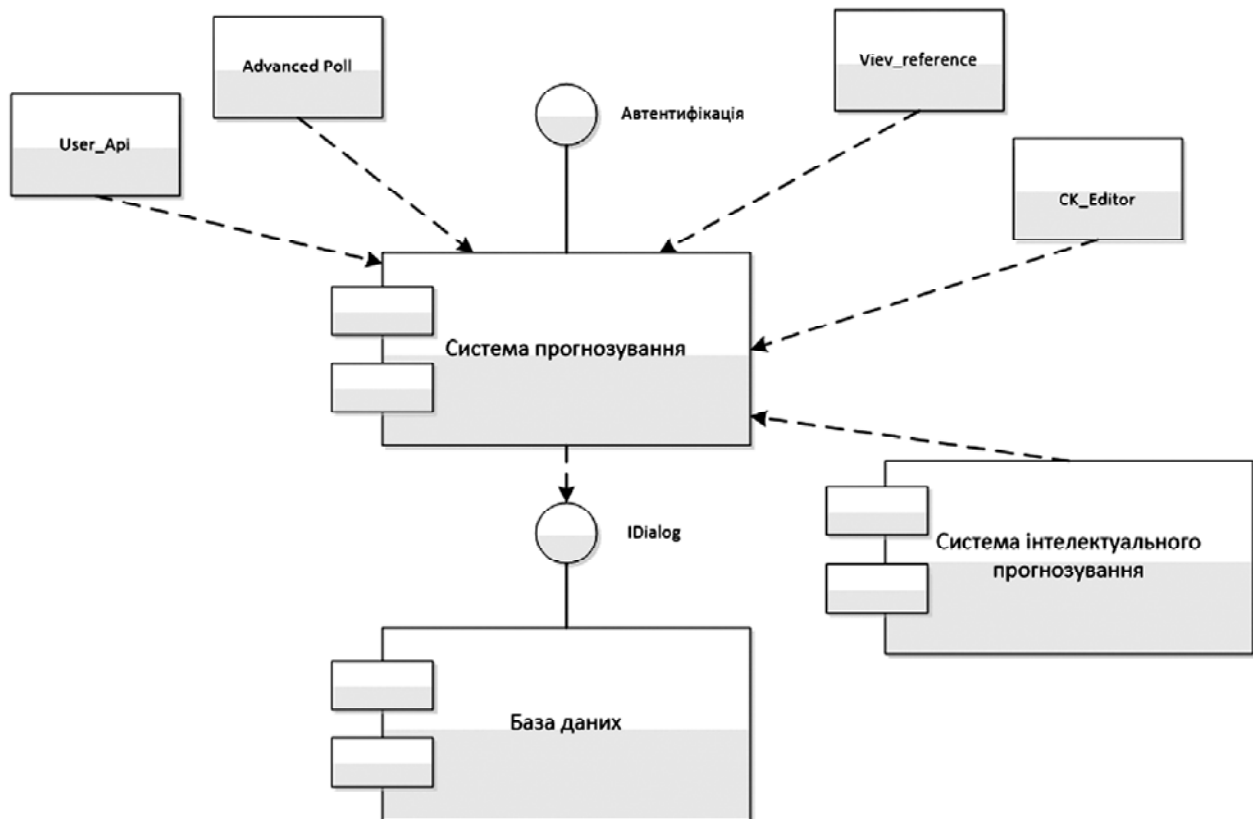
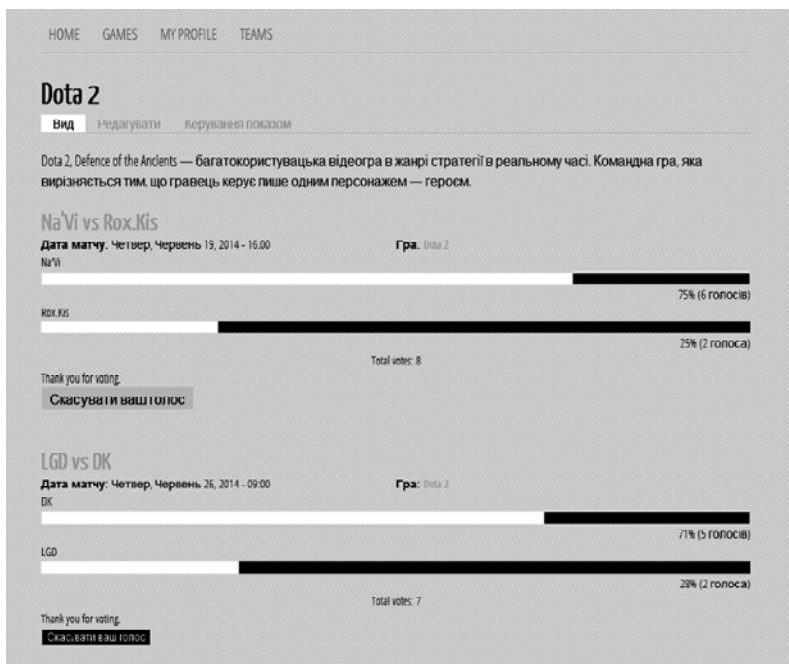
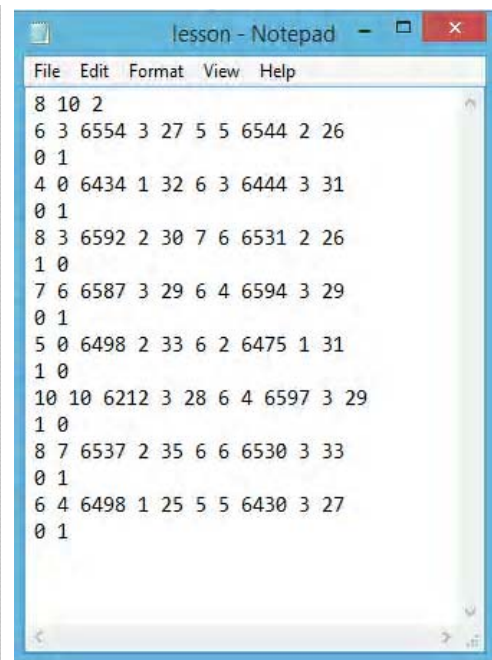


Рисунок 5 – Діаграма компонентів



а



б

 Рисунок 6 – Дані для навчання:
 а – сторінка гри з прогнозами на матчі; б – набір «уроків» для ШНМ

стрік першої команди; рейтинг першої команди; стабільність складу першої команди; ККД першої команди (на прикладі атакуючого удару); виграно з 10 останніх матчів другої команди; виграний стрік другої команди; рейтинг другої команди; стабільність другої першої команди; ККД другої команди.

В останньому шарі маємо два нейрони, які відповідають першій та другій команді. Об'єкт класу `lann` – це і є мережа, яка створюється на основі раніше створених шарів. Об'єкт класу `trainer` інкапсулює алгоритми навчання ШНМ переданої при створенні тренера, після навчання зберігається у файл. Першим етапом реалізації про-

екту є проектування бази даних (БД). Всі сутності будуть подані таблицями в базі даних. Призначення відношень бази даних:

- Гра – Ігри (дисципліни) з якими працює система.
- Атрибути : _id, Назва, Кількість_Команд, Опис;
- Матчі – всі минулі і майбутні матчі занесені в систему.
- Атрибути:_id, Poll_Name, ID_Гри, Дата,Команда_1,Команда_2,Прогноз;
- Команди – інформація про конкретну команду.
- Атрибути:_id, Назва, Зіграно_ігор, віррейт, рейтинг, стрік, ккд;
- Користувачі – інформація про користувачів.
- Атрибути:_id, Нікнейм, e-mail, Пароль, Кількість_прогнозів, Відсоток_вірних_прогнозів;
- Турніри:_id, Назва, Гра, Кількість_команд, призові.

Система розпізнає 3 види користувачів: незареєстрований користувач, зареєстрований користувач та адміністратор. Незареєстрований користувач вільно пересувається сайтом, проте він не бере участі в прогнозуванні, лише переглядає результати. Зареєстрований користувач також вільно пересувається сайтом, переглядає інформацію про команди, їх попередні та майбутні матчі, приймає участь у прогнозуванні матчів та має доступ до прогнозування. Адміністратор має всі права доступу на сайті, його задача оновлювати дані про команди та додавати нові матчі для прогнозування. Інтерфейс системи є графічний. На кожній зі сторінок користувач в верхньому меню має 4 кнопки: HOME – перехід на головну сторінку; GAMES – перехід на сторінку зі всіма матчами незалежно від дисципліни; MY PROFILE – перехід на сторінку профілю користувача; TEAMS – перехід на сто-

рінку списку команд. На головній сторінці користувачу доступне інтерактивне меню з трьох слайдів: кожен слайд відповідає за одну дисципліну, вони перегортаються автоматично кожні 4 секунди, та користувач при бажанні може перейти на потрібний слайд за допомогою кнопки внизу. На кожному зі слайдів є посилання на сторінку кожної з дисциплін (ігор), де розміщено список всіх матчів з даної дисципліни. На сторінці гри користувач бачить список всіх матчів, і результатів їх прогнозування, в разі якщо користувач не спрогнозував результат матчу, йому пропонується спрогнозувати його (рис. 6а).

Внизу кожної сторінки присутні три форми, в яких користувач може дізнатись про останні додані на сайт матчі, рейтинг команд та перейти на випадковий матч і переглянути результат його прогнозування, або спрогнозувати його, якщо ще не зробив (рис. 8а).

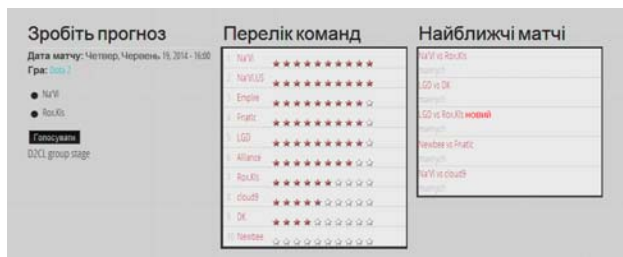
Сторінка Games містить останні додані матчі незалежно від дисципліни (рис. 8б), користувач може перейти з цієї сторінки на сторінку матчу (рис. 6а), який його цікавить і проголосувати, чи подивитись результати голосування.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

ІС прогнозування результатів матчів (рис. 9) має досить простий інтерфейс: користувачеві достатньо ввести дані обох команд і натиснути кнопку, після чого програма показує, яка команда на її думку переможе. Перевірка показала що програма передбачає правильно близько 70% матчів (13 із 19). Вхідними даними є: голоси, які користувач віддає певним командам по кожному з матчів; дані команд суперників. Результатами роботи системи є: шанс перемоги кожної з команд, по даному матчу обраний колективно; переможець зустрічі визначений інтелектуальною складовою системи.

```
public static void main(String[] args){
    //Спочатку створюємо шари
    List<Layer> layerList = new ArrayList<Layer>();
    layerList.add(Layer.create(10, ActivationFunction.FANN_SIGMOID_SYMMETRIC, 0.01f));
    layerList.add(Layer.create(13, ActivationFunction.FANN_SIGMOID_SYMMETRIC, 0.01f));
    layerList.add(Layer.create(2, ActivationFunction.FANN_SIGMOID_SYMMETRIC, 0.01f));
    Fann fann = new Fann(layerList);
    //Створюємо тренера і визначаємо алгоритм навчання
    Trainer trainer = new Trainer(fann);
    trainer.setTrainingAlgorithm(TrainingAlgorithm.FANN_TRAIN_RPROP);
    /* Проводимо навчання мережі, з максимальною кількістю циклів 100000, показуємо звіт
    кожну 100у ітерацію і досягаємо похибку менше 0.0001 */
    trainer.train(new File("lesson.data").getAbsolutePath(), 100000, 100, 0.0001f);
    fann.save("ann"); }
```

Рисунок 7 – Створення та навчання ШНМ



а



б

Рисунок 8 – Форма:

а – внизу кожної зі сторінок; б – сторінки всіх матчів

Наприклад, користувач, який хоче спрогнозувати матч з дисципліни Dota 2, переходить на сторінку прогнозування (рис. 10а). Перебуваючи на даній сторінці користувач робить свої прогнози відносно майбутніх матчів, також він може перейти на персональну сторінку кожного з матчів (рис. 10б). Під кнопкою проголосувати користувач може побачити короткий опис матчу, тобто турнір в рамках якого проводиться даний матч, та стадія турніру. Вигляд сторінки після голосування (рис. 10в).

Якщо користувач бажає отримати прогноз за допомогою програми інтелектуального прогнозування, він повинен завантажити програму з головної сторінки сайту, запустити програму і ввести дані обох команд. Після вводу користувач натискає кнопку «Порахувати» і отримує результат яка ж команда повинна перемогти (рис. 9). Створена ІС на основі отриманих даних вирішує, яка з команд переможе у матчі. Для цього використано ШНМ (табл. 1). ІС відомі такі дані: кількість перемог з останніх 10 матчів; кількість перемог безпосередньо перед матчем (стрік); рейтинг команди (унікальний); стабільність складу команди; середній показник програвшів. В створеній ШНМ є три шари. Перший шар складається із 10 нейронів – рецепторів, або нейронів вхідних даних. Другий шар нейронів є внутрішній. Третій шар нейронів є вихідний, в ньому є лише 2 нейрони (рис. 3б).

6 ОГОВОРЕННЯ

Змагання з кіберспорту, у тому числі і міжнародні, проводяться по всьому світі. Найзначнішим з них є турнір world Cyber Games, організований подібно до олімпійських ігор. Існує багато букмекерських ресурсів з прогнозуванням результатів матчів, але вони всі орієнтовані на прийом грошових ставок, їхні прогнози базуються на

думці окремих букмекерів [1]. Існує багато порталів для перегляду подій зі світу кіберспорту, можливостями проведення ставок та публікування прогнозів на кіберспорт від експертів, наприклад:

1. <http://cyber.sports.ru/>;
2. <https://r3.cybbet.com/>;
3. http://bookmakerclub.com/articles_stavki_na_kibersport/;
4. <https://bookmaker-ratings.com.ua/tip/sport-types/tip-prognozy-na-kiber-sport/>.

Але не існує як загального алгоритму проведення ефективних прогнозів в кіберспорті автоматично. Зазвичай прогнози роблять певне коло фахівців цієї сфери. Крім того, не існує загальної архітектури для систем прогнозування матчів у кіберспорті. Авторами розроблено та описано в роботі загальну архітектуру для систем прогнозування матчів у кіберспорті, в якій реалізовано розроблений авторами алгоритм проведення ефективних прогнозів матчів.

Спроектована ІС спрямована на задоволення потреб фанатів кіберспортивних ігор для відслідковування матчів. Кіберспорт розвивається дуже активно. Це викликає великий попит на кіберспортивний контент. Прогнозування результатів ігор є невід'ємною частиною цього контенту. Дана ІС орієнтована в на пересічних гравців і фанів кіберспорту. Подібних ІС майже немає. Одна з них egamingbets.com є подібною на розроблювану ІС, але вона орієнтована не на прогнозування результатів кіберспортивних матчів, а на виконання ставок на переможців цих ігор. Мінусом даної системи є також непрактичний інтерфейс, який важко зрозуміти новому користувачу, також відсутнє сортування ігор по даті, що є дуже зруч-

	В. з 10	Стрік	Рейтинг	Склад	ККД
Команда 1	6	3	6554	3	68
Команда 2	5	5	6544	2	66

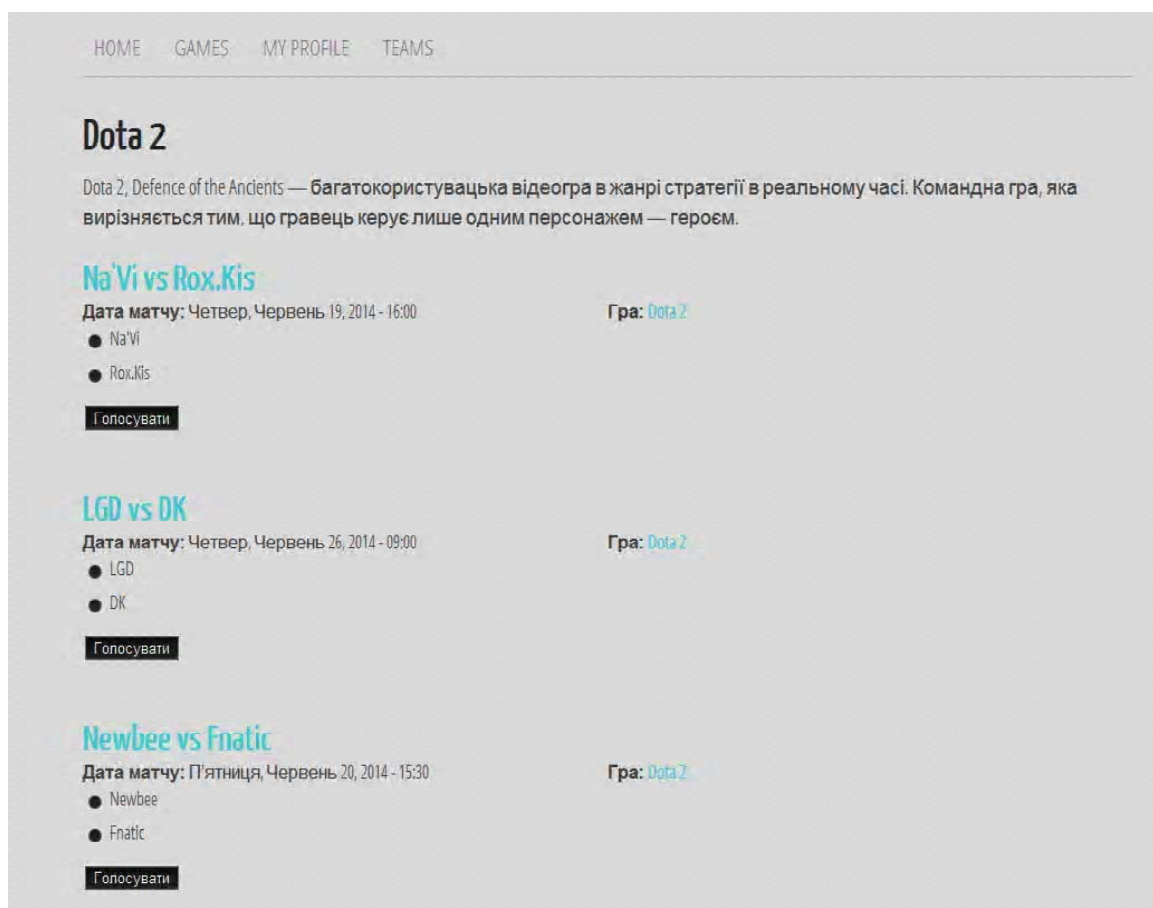
Порахувати

Переможе команда №

Рисунок 9 – Вікно прогнозування

Таблиця 1 – Урок для нейронної мережі

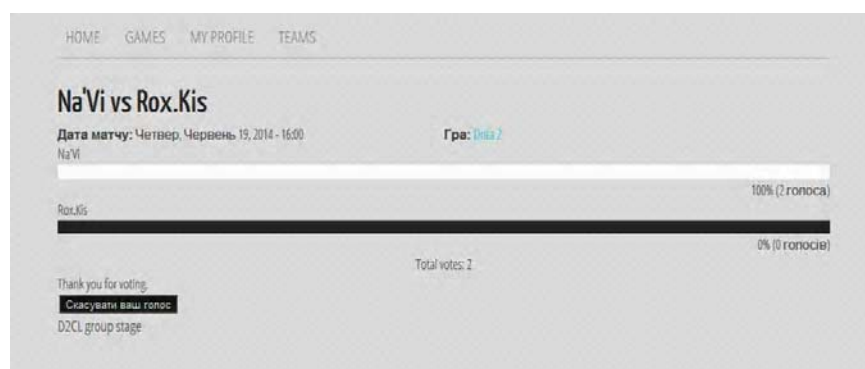
Команда 1					Команда 2					Переможець
В.з10	Стрік	Рейтинг	Склад	ККД	В.з10	Стрік	Рейтинг	Склад	ККД	
6	3	6554	3	68	5	5	6544	2	66	2
4	0	6234	1	63	6	3	6444	3	74	2
8	3	6592	2	87	7	6	6531	2	58	1
7	6	6587	3	68	6	4	6594	3	63	2
5	0	6498	2	74	6	2	6475	1	74	1
10	10	6612	3	59	6	4	6597	3	55	1
8	7	6537	2	66	6	6	6530	3	86	2
6	4	6498	1	71	5	5	6430	3	90	2



а



б



в

Рисунок 10 – Сторінка:
а – матчів; б – прогнозування; в – результатів прогнозування з гри

ною функцією. Значною перевагою даної системи також є те, що вона орієнтована на роботу не з однією грою а декількома такими як: Dota2; World of Tanks; Counter-Strike:GO. Список модулів CMS Drupal, які використовувались при розробці системи.

ВИСНОВКИ

В статті вирішено завдання розроблення загальної архітектури системи колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті з використанням сучасної технології нейропрогнозування. Під час дослідження спроектовано, розроблено та апробовано функціонування такої системи.

Наукова новизна полягає у реалізації методу колективного прогнозування результатів ігор у кібер-спорті на основі розробленого алгоритму розрахунку прогнозів та навчання ШНМ. Реалізація такого методу підтримує незалежний від людського фактору процес прогнозування матчів в кібер-спорті.

Практична цінність розробленої ІС полягає у значному спрощенні пошуку прогнозів на кібер-спортивні матчі та дає можливість кожному бажаному прийняти участь у прогнозуванні матчів. Система не є унікальною, проте вона може дати новий поштовх до вирішення проблеми прогнозування результатів не лише у кібер-спорті, а і у спорті взагалі. Також перевагою даної системи є те, що вона безкоштовна, в той час, як за букмекерські прогнози зазвичай треба платити.

Перспективи подальших досліджень полягає у вдосконаленні алгоритму прогнозування кібер-матчів та методу навчання розробленої ШНМ на основі зібраних статистичних даних функціонування цієї ІС.

ПОДЯКИ

У статті розв'язана науково-практична задача прогнозування матчів у кіберспорті. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Дослідження, розроблення і впровадження інтелектуальних розподілених інформаційних технологій та систем на основі ресурсів баз даних, сховищ даних, просторів даних та знань з метою прискорен-

ня процесів формування сучасного інформаційного суспільства», а також Військово-дипломатичної академії імені Євгена Березняка. Наукові дослідження проводилися також в рамках ініціативної тематики досліджень кафедри ІСМ Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Розроблення інтелектуальних розподілених систем на основі онтологічного підходу з метою інтеграції інформаційних ресурсів».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Берко А. Ю. Системи електронної контент-комерції: монографія / А. Ю. Берко, В. А. Висоцька, В. В. Пасічник. – Львів : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2009. – 612 с.
2. Гаркуша Н. М. Моделі і методи прийняття рішень в аналізі та аудиті / Н. М. Гаркуша. – Х. : Знання, 2011. – 364 с.
3. Завгородня Т. Методи колективних експертних оцінок [Електронний ресурс] / Т. Завгородня. – Режим доступу : http://lubbook.net/book_251_glava_9_Tema_5_Metodi_kolektivnikhe.html.
4. Сазанов В. Г. Прогнозирование и планирование в условиях рынка / В. Г. Сазанов. – Владивосток : ТИДОТ ДВГУ, 2001. – 267 с.
5. Мамолов К. О. Методы экспертных оценок в планировании и прогнозировании / К. О. Мамолов. – Санкт-Петербург : ВНИИМП, 1999. – 289 с.
6. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника / Ф. Уоссерман. – М. : Мир, 1992. – 183 с.
7. Новаторський М. А. Штучні нейронні мережі : обчислення / М. А. Новаторський, Б. Б. Нестеренко. – К. : Ін-т математики НАН України, 2004. – 408 с.
8. Математична лінгвістика / [В. Висоцька, В. Пасічник, Ю. Щербина, Т. Шестакевич]. – Л. : «Новий Світ-2000», 2012. – 359 с.
9. Methods based on ontologies for information resources processing : monograph / [Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun, Dmytro Dosyn]. – Saarbrücken : LAP. – 324 p.
10. Висоцька В. А. Методи і засоби опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної контент-комерції : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.13.06 – інформаційні технології / Вікторія Анатоліївна Висоцька ; Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – 27 с.

Стаття надійшла до редакції 29.01.2017.

Після доробки 21.03.2017.

Коробчинский М. В.¹, Чирун Л. Б.², Высоцкая В. А.³, Ныч Н. А.⁴

¹Д-р. техн. наук, старший научный сотрудник Военно-дипломатической академии имени Евгения Березняка, Киев, Украина

²Ведущий специалист института компьютерных наук и информационных технологий Национального университета «Львовская политехника», Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина

⁴Магистр кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина

ОСОБЕННОСТИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ МАТЧЕЙ В КИБЕРСПОРТЕ

Актуальность. Сейчас актуальны разработки систем прогнозирования матчей в киберспорте, что связано с активным развитием киберспорта. В этой статье реализовано возможность прогнозировать матчи пользователей.

Цель. Целью выполнения работы является проектирование модели системы коллективного прогнозирования результатов игр в кибер-спорте с использованием современной технологии нейропрогнозирования. Задачей является разработка системы для совместного пользовательского прогнозирования результатов киберспортивных матчей и самостоятельной работы информации и выдачи собственного прогноза. К основным задачам относятся следующие: учет и анализ всех прошлых и будущих игр; учет и анализ характеристик / результатов всех команд; предоставление возможности пользователю персонально делать прогноз на каждый матч; определение шанса на выигрыш команды на основе данных за предыдущие матчи.

Метод. Проблема решена методом опроса экспертов путем проведения аналитических записок и с помощью искусственной нейронной сети. В созданной нейросети есть три слоя. Первый слой состоит из 10 нейронов-рецепторов, или нейронов входных данных. Второй слой нейронов является внутренним. Третий слой нейронов является выходным, в нем есть 2 нейроны. Входной

інформацією для алгоритма являється кількість виграних матчів із останніх 10; кількість виграних матчів перед даною зустріччю (вінстрик), рейтинг команди; стабільність складу (час незмінності складу команди), середній показник програної зустріччю даної команди. Відповіддю є 1 або 2 (перемога конкретної команди).

Результати. Для досягнення результату проведено аналіз відповідної літератури з інформацією про основні види колективного прогнозування. Розроблено дерево цілі, і проведено систематичний аналіз предметної області. Застосовано інтерв'ю з експертами. Інтернет-ресурси реалізовані CMS Drupal. Проаналізовані основні методи колективного прогнозування. Проведений систематичний аналіз об'єкта дослідження і предмету, цілей, побудованих дерев, визначені проблеми і побудовано UML-діаграми. Проаналізовано застосування методу інтерв'ю з експертами. Реалізовано сайт з CMS Drupal і мови програмування PHP.

Висновки. На основі розробленого алгоритму розрахунку прогнозів і навчання нейронної мережі реалізовано незалежний від людського фактора процес прогнозування матчів у кіберспорту. Наявність такої системи значно спростить пошук прогнозів на кіберспортивні матчі і дасть можливість кожному бажаному взяти участь у їх прогнозуванні. Система дає новий погляд на рішення проблеми прогнозування результатів не тільки в кіберспорту, а й у спорті загалом.

Ключові слова: кіберспорт, інформаційна система.

Korobchynskiy M. V.¹, Chyrun L. B.², Vysotska V. A.³, Nych M. O.⁴

¹Dr. Sc., Senior Research Fellow of Military-Diplomatic Academy named by Eugene Bereznyak, Kyiv, Ukraine

²Leading Specialist of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

⁴Master of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

MATCHES PROGNOSTICATION FEATURES AND PERSPECTIVES IN CYBERSPORT

Context. The forecasting system fixing in cybersport is relevant at this point, it is connected to an active development cybersport. In this paper the ability to predict matches users is implemented.

Objective. The purpose of this work is the system model design of collective predicting outcomes of games results in cyber sport using modern technology of the neuro forecasting. The task is a system development for common user forecasting results of matches cybersport and independent information processing and issuing its own forecast. The main tasks include: all past and future games accounting and analysis; all teams performance / results accounting and analysis; user capabilities to make personal prediction for every match; determining the team winning odds based on previous matches.

Method. The problem by the survey of experts by means of analytical reports and using artificial neural network is solved. ANN is established in three layers. The first layer consists of 10 neurons-receptors, neurons of inputs data. The second layer of neurons is inside. The third layer is the source of neurons, it is only 2 neurons. The input data for the algorithm is the number of matches won the last 10; the number of won games before this meeting; team rating; stability of (time invariance of the team); the average of the losing team. The answer is 1 or 2 (the victory of a particular team).

Results. To achieve the goals of the relevant literature with information about the main types of collective prediction is reviewed. A tree objectives, and conducted a systematic analysis of the future system is developed. In this paper the method of interviews with experts and implemented it in their system is altered. Online resources implemented with CMS Drupal. The basic methods of collective prediction are described. A systematic analysis of the research object and subject is developed; objectives tree is developed and the problem and constructed UML-diagrams are studied. The method of interviews with experts and the use of this method in the paper are described. The implementation of a web site with CMS Drupal and programming language PHP is showed.

Conclusions. Based on the algorithm calculation example and training artificial neural network independent of the human factor in the process of predicting matches cyber sport is implemented. The presence of such system greatly simplifies the search for example cyber sports matches and give everyone the opportunity to take part in predicting matches. This system can give new impetus to the problem of predicting results not only in cyber-sport and sport in general.

Keywords: cybersport, prediction, information system.

REFERENCES

1. Berko A. YU. Vysotska V. A., Pasichnyk V. V. *Systemy elektronnoyi kontent-komertsyi: monohrafiya*. L'viv, Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu «L'vivs'ka politehnika», 2009, 612 p.
2. Harkusha N. M. *Modeli i metody pryynyattya rishen' v analizi ta audyti*. KH, Znannya, 2011, 364 p.
3. Zavgorodnya T. *Metodi kolektivnikh yekspertnikh otsinok* [Electronic recourse]. Access mode : http://lubbook.net/book_251_glava_9_Tema_5_Metodi_kolektivnikhe.html. The name on the title screen.
4. Sazonov V. G. *Prognozirovaniye i planirovaniye v usloviyakh rynka*. Vladivostok, TIDOT DVGU, 2001, 267 p.
5. Mamolov K. O. *Metody ekspertnykh otsenok v planirovanii i prognostirovanii*. Sankt-Peterburg, VNIIMP, 1999, 289 p.
6. Uossermen F. *Neyrokompyuternaya tekhnika*. Moscow, Mir, 1992, 183 p.
7. Novators'kyi M. A., Nesterenko B. B. *Shtuchni neyronni merezhi: obchyslennya*. K. In-t matematyky NAN Ukrayiny, 2004, 408 p.
8. Pasichnyk V. V., Shcherbyna YU. M., Vysotska V. A., Shestakevych T. V. *Matematychna lingvistyka*. [Knyha 1. Kvantytatyvna lingvistyka] : navch. posibnyk, *Seriya «Komp'yutyngh»*. L'viv : «Novyyi svit -2000», 2012, 359 p.
9. Vasylytyn, Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun, Dmytro Dosyn *Methods based on ontologies for information resources processing* : monograph. Saarbrücken, LAP, 324 p.
10. Vysotska V. A. *Metody i zasoby opratsyuvannya informatsiynykh resursiv v systemakh elektronnoyi kontent-komertsyi* : avtoreferat dysertatsiyi na здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.13.06 – інформаційні, Національний університет «Львівська політехніка». L'viv, 2014, 27 p.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 519.161

Данильченко А. О.

Старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії Житомирського державного технологічного університету,
Житомир, Україна

РОЗПАРАЛЕЛЮВАННЯ МОДИФІКОВАНОГО МЕТОДУ ГІЛОК ТА МЕЖ ДЛЯ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ ПРО ПАРОСПОЛУЧЕННЯ ЗІ ЗНИКАЮЧИМИ ДУГАМИ

Актуальність. Розглянуто задачу складання розкладу проходження процедур пацієнтами санаторію, яка зведена до розширеної задачі пошуку максимального паросполучення в дводольному графі. Для поставленої задачі про паросполучення зі зникаючим дугами було розроблено оптимальний алгоритм її рішення на базі методу гілок і меж. Алгоритм враховує обмеження сумісності процедур. Проведено розрахунковий експеримент в основі якого лежить доказ доцільності розпаралелювання оптимального алгоритму розв'язання задачі складання розкладу прийому лікувальних процедур пацієнтами для прикладного використання його в санаторних закладах України.

Мета роботи. Довести доцільність розпаралелювання оптимального алгоритму розв'язання задачі складання розкладу проходження процедур пацієнтами санаторію.

Метод. Сформульована математична модель задачі про паросполучення зі зникаючим дугами. Обрані обчислювальні платформи різної конфігурації, що мають різні обчислювальні потужності: різну кількість ядер процесора, різний обсяг пам'яті, і т.д. Написано авторське програмне забезпечення для проведення експерименту. Програма складається з двох модулів: серверний модуль, який контролює процес виконання розрахунків і клієнтський модуль, який виконується на відокремлених ПЕОМ з метою обчислення паралельних операцій. Проведено обчислювальний експеримент по распараллеливанию оптимального алгоритму розв'язання задачі про паросполучення зі зникаючим дугами. Експеримент проводився на базі санаторію «Дениші». Обчислювальний експеримент проведений на серії випадкових умов задачі, що генеруються програмою. Проведено аналіз отриманих результатів шляхом порівняння часу рішення задачі про паросполучення зі зникаючим дугами оптимальним алгоритмом на різних обчислювальних платформах.

Результати. Модифікований метод гілок та меж показує стабільність зменшення часу складання розкладу проходження процедур при збільшенні обчислювальних потужностей.

Висновки. Прогнозований найменший час складання розкладу, отримано на обчислювальній платформі з максимальною кількістю задіяних ПЕОМ. Прогнозований час складання розкладу при використанні алгоритму розпаралелювання модифікації методу гілок і меж прямо пропорційно залежить від кількості вершин дводольного графа (що дорівнює сумі кількості процедур і кількості пацієнтів), кількості призначених процедур і обмежень.

Ключові слова: паросполучення, дводольний граф, метод гілок і меж, метод повного перебору, розпаралелювання.

НОМЕНКЛАТУРА

ЗПІД – задача про призначення з умовами несумісності деяких пар робіт та їх виконавців;

$k_{лп}$ – кількість лікувальних процедур;

$k_{п}$ – кількість пацієнтів;

$k_{пп}$ – кількість призначених процедур;

C_{ij} – обмеження прийому процедур;

G – дводольний оргграф;

X – множина вершин, кожна з яких відповідає можливому проміжку прийому процедур;

Y – множина вершин відповідних множині всіх процедур;

ICS_DENISH – програма автоматизованого формування розкладу прийому процедур пацієнтами санаторію;

$t_{BP}^{пр}$ – прогнозований час формування розкладу;

$t_{мп}$ – час складання розкладу методом повного перебору.

ВСТУП

Призначення процедур в сучасних санаторних та лікувальних закладах є складним процесом, що повинен враховувати досить велику кількість факторів, основними з яких є [1, 2]:

- перелік призначених лікарем процедур;
- час роботи процедурного кабінету;

- пропускна здатність процедурного кабінету (одну процедуру одночасно можуть приймати декілька пацієнтів);

- тривалість прийому процедури (для різних процедур тривалість прийому процедури різна);

- тривалість часу технічної перерви між прийомами процедур;

- сумісність процедур (пацієнт не може одночасно приймати декілька процедур, але крім цього, на розклад накладається додаткове обмеження – пацієнт не може приймати наступну процедури менш ніж через деякий час після прийняття попередньої, для кожної пари процедур значення часу сумісності може різнитися).

Такі задачі з успіхом розв’язуються математичним апаратом теорії розкладу – розділ прикладної математики, що вивчає моделі впорядкування та методи складання розкладів [3].

В статті [1] розглянуто задачу складання розкладу проходження процедур пацієнтами санаторію. Сформульована задача зведена до розширеної задачі пошуку максимального паросполучення у дводольному графі. Розроблено оптимальний алгоритм її розв’язання на базі відомого методу гілок та меж.

Із NP-повноти задачі «Про паросполучення зі зникаючими дугами», яка доведена в [1], слідує, що вона не піддається ефективним точним методам [4].

Відомо, що будь-яка NP-повна задача може бути розв’язана методом повного перебору. Але при цьому, в залежності від розмірності задачі, потрібні обчислювальні ресурси та час її розв’язання можуть бути неприпустимо великими з практичної точки зору.

Для оптимізації процесу повного перебору застосовують метод гілок та меж, який дозволяє зменшувати множину допустимих розв’язків за допомогою ефективного алгоритму пошуку, а також розпаралелювання обчислень.

Слід зазначити, що для методу віток та меж найбільшу складність мають саме процедура розгалуження та процедура знаходження оцінок верхніх і нижніх меж для оптимального значення на підмножині припустимих розв’язків.

Розпаралелювання обчислень не звужує кількість варіантів, що аналізуються, а лише скорочує потрібний на це час.

Таким чином, найбільш доцільною схемою зменшення обчислювальної складності знаходження точного розв’язання NP-повних задач залишається скорочення повного перебору.

Метою обчислювального експерименту є визначення доцільності розпаралелювання запропонованої модифікації методу гілок та меж для розв’язання задачі про паросполучення зі зникаючими дугами для прикладного використання його в санаторних закладах України.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Оскільки програмний продукт є орієнтований на кінцевого покупця загальна постановка задачі має наступний вигляд:

1. Потрібно розробити задачу, що забезпечує збереження таких даних:

- відомості про пацієнтів та збереження архіву даних;

- повна характеристика процедур та час сумісності процедур;

- інформація про лікарів їх спеціалізації та вагові коефіцієнти;

- вихідні та свята.

2. Задача має забезпечити виконання наступних функцій та розрахунків:

- додавання, редагування, знищення, сортування, друк та пошук даних по всім перерахованим пунктам;

- закріплення хворого за певним лікарем та розрахунків навантаження лікарів;

- призначення лікарем пацієнту певної кількості процедур;

- формування розкладу пацієнта з урахуванням завантаження процедурних кабінетів;

- система має забезпечити формування розкладу в двох режимах:

3. Формування розкладу пацієнта одразу після призначення (ручний режим);

4. Автоматичне формування розкладу для всіх пацієнтів.

- можливість редагування розкладу;

- розрахунок перегляд та друк загальних та вільних лімітів лікарів на призначення процедур;

- розрахунок, перегляд і друк резерву процедур та загальної кількості призначених процедур;

- розрахунок та друк завантаження процедурних кабінетів на певну дату.

В основі порівняльного обчислювального експерименту є доказ доцільності розпаралелювання алгоритму розв’язку задачі складання розкладу приймання лікувальних процедур пацієнтами для прикладного використання його в санаторних закладах України.

Для досягнення мети експерименту необхідно:

1. Оцінити часові витрати на виконання розрахунків на різних обчислювальних платформах, що мають різні обчислювальні потужності: різну кількість ядер мікропроцесора, різний обсяг пам’яті, тощо.

2. Порівняти результати та визначити ефективність та доцільність розпаралелювання процесу розв’язку. Критерієм ефективності є мінімізація часу виконання розрахунків щодо пошуку найбільшого паросполучення у дводольному графі зі зникаючими дугами.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Метод гілок і меж [5] є загальним алгоритмічним методом вирішення різноманітних оптимізаційних задач. Він широко застосовується для таких NP-повних задач, як задача комівояжера та задача о ранці. В методі гілок і меж використовуються дві процедури: розгалуження та знаходження оцінок (меж).

Із NP-повноти задачі «Про паросполучення зі зникаючими дугами», яка доведена в [1], слідує, що вона не піддається ефективним точним методам [4].

Відомо, що будь-яка NP-повна задача може бути розв’язана методом повного перебору. Але при цьому, в залежності від розмірності задачі, потрібні обчислювальні ресурси та час її розв’язання можуть бути неприпустимо великими з практичної точки зору.

Для оптимізації процесу повного перебору застосовують метод віток та меж, який дозволяє зменшувати

множину допустимих розв'язків за допомогою ефективного алгоритму пошуку, а також розпаралелювання обчислень [6].

Слід зазначити, що для методу віток та меж найбільшу складність мають саме процедура розгалуження та процедура знаходження оцінок верхніх і нижніх меж для оптимального значення на підмножині припустимих розв'язків.

Розпаралелювання обчислень не звужує кількість варіантів, що аналізуються, а лише скорочує потрібний на це час.

У багатьох публікаціях запропоновано алгоритми рішення класичної задачі про паросполучення, які дозволили скоротити обчислювальну складність програмних реалізацій [7, 8].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Ряд задач про паросполучення в дводольних графах містить обмеження, що забороняє при виборі однієї дуги включати в рішення іншу дугу. Наприклад, якщо дуга (x, y) вже міститься в паросполученні, то йому не може належати дуга (v, w) . Такі дуги називаються несумісними. Вони включені в умови задачі про паросполучення зі зникаючим дугами (ЗПД). Очевидно, ЗПД - це задача про призначення з умовами несумісності деяких пар робіт та їх виконавців.

Розглянемо одну з прикладних версій ЗПД – задача розподілу в часі оздоровчих процедур між пацієнтами санаторію. Санаторій надає список різних процедур. Пацієнт повинен пройти лікувальний курс з усіх або декількох процедур цього списку. Для кожної окремої процедури заданий графік її проведення в вигляді послідовності часових проміжків. Пацієнту призначається не більше однієї процедури зі списку. Потрібно знайти відповідність між множиною всіх процедур і множиною всіх часових проміжків:

Опишемо умови поставленої задачі в термінах дводольних графів. Нехай $G = (X, Y, E)$ – дводольний орграф, де X – множина вершин x_i , кожна з яких відповідає можливому проміжку прийому процедури, $i = 1, m$; Y – множина вершин y_j , $j = 1, n$ відповідних множині всіх процедур, що призначаються пацієнтам. Дуга $(x_i, y_j) \in E$, тоді і тільки тоді, коли процедуру y_j можна прийняти в проміжку часу x_i .

Очевидно, рішенням задачі є максимальне паросполучення в дводольному графі.

Доповнимо умови задачі наступним обмеженням: друга процедура призначається після першої не раніше ніж через годину. Тоді з паросполучення, що включає дугу (x_1, y_1) , повинні автоматично зникнути дуга (x_5, y_2) не сумісна з дугою (x_1, y_1) . У загальному випадку умова несумісності задана на деякій підмножині дуг двудольного орграфа. Потрібно знайти паросполучення, що включає максимальну кількість сумісних дуг.

В процесі покрокової побудови такого паросполучення деякі дуги будуть зникати, змінюючи структуру двудольного орграфа. Вже згадана ЗПД – це задача про максимальне паросполучення в дводольному орграфе з заданою підмножиною дуг (x_i, y_j) . Для кожної

дуги (x_i, y_j) орграфа визначена підмножина дуг C_{ij} , які не включаються до допустимого рішення, якщо в нього включена дуга (x_i, y_j) . Дуги множини C_{ij} зникають з графа G при включенні дуги (x_i, y_j) і знову стають видимими при її виключенні. Відношення несумісності дуги (x_i, y_j) з підмножиною дуг C_{ij} позначимо $(x_i, y_j) \rightarrow C_{ij} = \{(x_{i1}, y_{j1}), (x_{i2}, y_{j2}), \dots, (x_{ik}, y_{jk})\}$.

Для розв'язку сформульованої задачі було розроблено оптимальний алгоритм на базі метода гілок та меж [2].

Для подальшого проведення експерименту було розроблено програму NetRemoting, що призначена для автоматизованого формування розкладу прийому процедур пацієнтами санаторію, який складається за допомогою оптимального алгоритму рішення задачі ЗПД. Крім того, програма забезпечує: розрахунок навантаження лікарів, розрахунок, перегляд та друк загальних і вільних лімітів лікарів, розрахунок, перегляд і друк резерву процедур та загальної кількості призначених процедур, розрахунок завантаження процедурних кабінетів.

Програма автоматизованого формування розкладу прийому процедур пацієнтами санаторію (ICS_DENISH) розрахована на виконання на ПЕОМ типу IBM PC і працює під управлінням операційної системи Windows 8 або вище. Операційна система, що рекомендується, – Windows 10.

Перед проведенням експерименту виконані наступні інструкції

1. Встановлено програмне забезпечення (netframework «v2.0.50727»).

2. Налаштовано ПЕОМ, на якій виконується серверний модуль:

2.1. Відключено антивірус.

2.2. Відключено Брандмауер.

2.3. Додано до виключень порт 8008, по якому йде обмін даними.

2.4. Визначено IP адресу сервера.

3. Налаштовано клієнтський програмний модуль:

3.1. В файл Client.exe.config вписано IP адресу сервера «tcp://192.168.2.101:8008/PllCompOfBB/ControlProcess.rem».

3.2. Відключено антивірус.

3.3. Відключено Брандмауер.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експеримент проводився з використанням авторського проблемно-орієнтованого інструментарію – програми ICS_DENISH. Програма складається з двох модулів: серверний модуль, що контролює процес виконання розрахунків та клієнтський модуль, який виконується на відділених ПЕОМ з метою обчислення паралельних операцій. Програма вирішує задачу складання розкладу приймання процедур пацієнтами санаторію модифікованим методом гілок та меж. Обчислювальний експеримент проведено на серії випадкових умов задачі, що генеруються програмою. Вхідні параметри наведені у табл. 2 були випадковими (реєстрованими, але некерованими). Вихідним параметром для проведення обчислювального експерименту є t_{BP}^{TP} – прогнозований час формування розкладу за таких умов. Кількість випробувань та вхідні параметри відповідають (табл. 1–2).

Вихідним параметром для проведення порівняльного обчислювального експерименту є час t_{BP} , що витрачається на виконання розрахунків щодо складання розкладу приймання лікувальних процедур пацієнтами санаторію за допомогою програми ICS_DENISH.

Узагальнені інструкції використання програмного забезпечення при проведенні обчислювального експерименту:

1. Запустити на сервері програмне забезпечення, обрати потрібну нам кількість клієнтів і чекати їх підключення. Основне вікно серверного модуля представлено на рис. 1.

2. Після підключення всіх клієнтів сервер переходить в режим генерації вихідних даних, вибираємо потрібну нам кількість процедур, людей, призначених процедур і натискаємо кнопку, сервер генерує дані. Вікно генерації вихідних даних представлено на рис. 2.

Сервер переходить до режиму готовності до обчислень. Вікно готовності серверного модуля до обчислень наведено на рис. 3.

3. Отримати результат. Екран програми з результатом обчислення наведено на рис. 4.

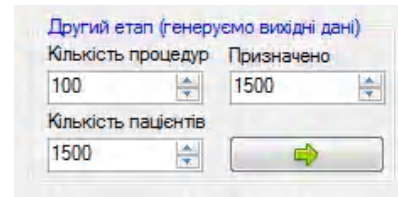


Рисунок 2 – Вікно генерації вихідних даних



Рисунок 4 – Вікно з результатом обчислень t_{BP}^{PP}

Для проведення обчислювального експерименту були використані комп'ютери з характеристиками згідно табл. 1, з яких було сформовано три обчислювальні платформи, що наведені на рис. 5.

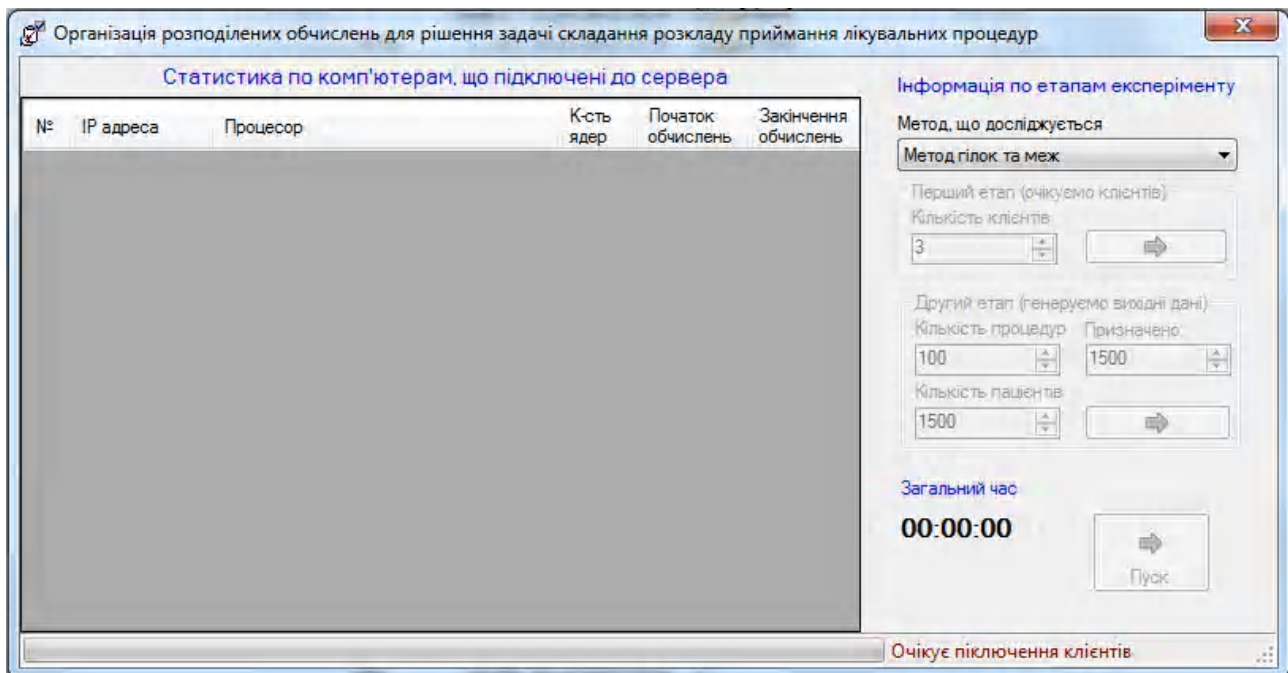


Рисунок 1 – Основне вікно серверного модуля

Таблиця 1 – Характеристики комп'ютерів, що були використані для проведення порівняльного обчислювального експерименту

Номер обчислювальної платформи	Назва мікропроцесора	Кіль. ядер	Тактова частота	Обсяг оперативної пам'яті ПЕОМ
1	Pentium 4	1	2,42 ГГц	512 МБ
2	Intel Celeron E3300	2	2,50 ГГц	2 ГБ
3	Intel Core i5-3570K	4	3,4 ГГц	4 ГБ

Таблиця 2 – Перелік вхідних параметрів обчислювального експерименту

Номер параметру	Позначка	Назва параметру	Тип параметру
1	$k_{лп}$	Кількість лікувальних процедур	Детермінований
2	$k_{п}$	Кількість пацієнтів	Випадковий
3	$k_{пп}$	Кількість призначених процедур	Випадковий
4	$C_{i,j}$	Обмеження прийому процедур	Детермінований

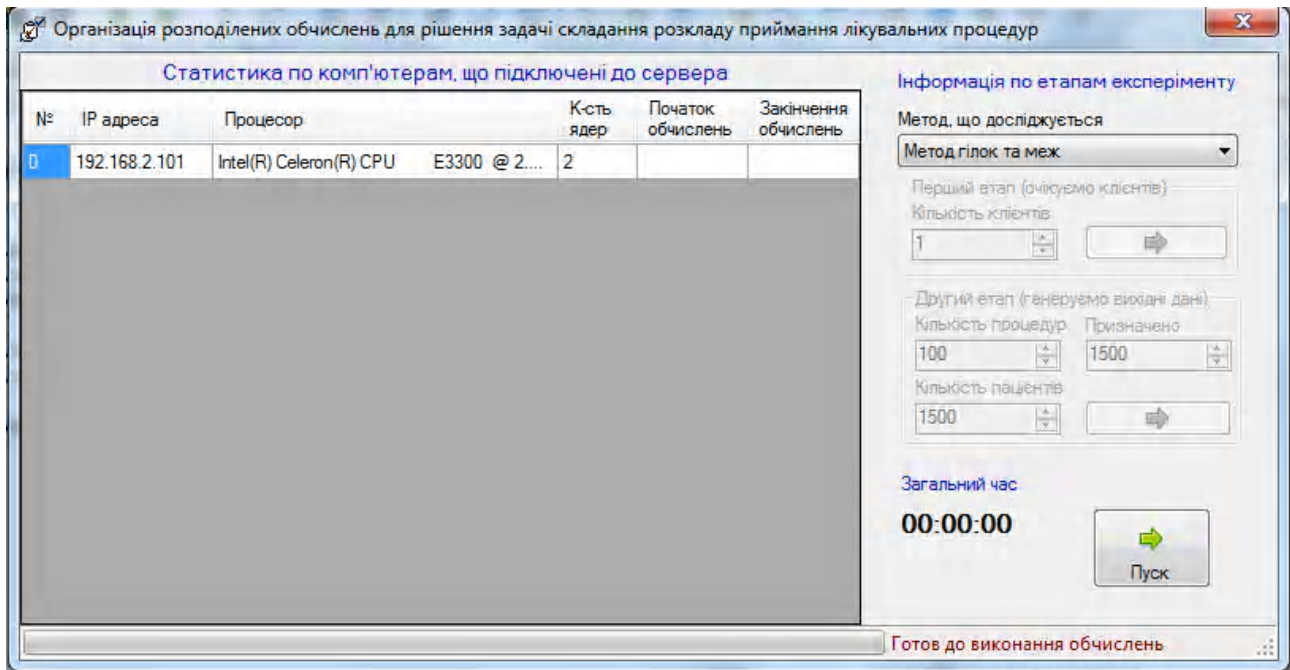
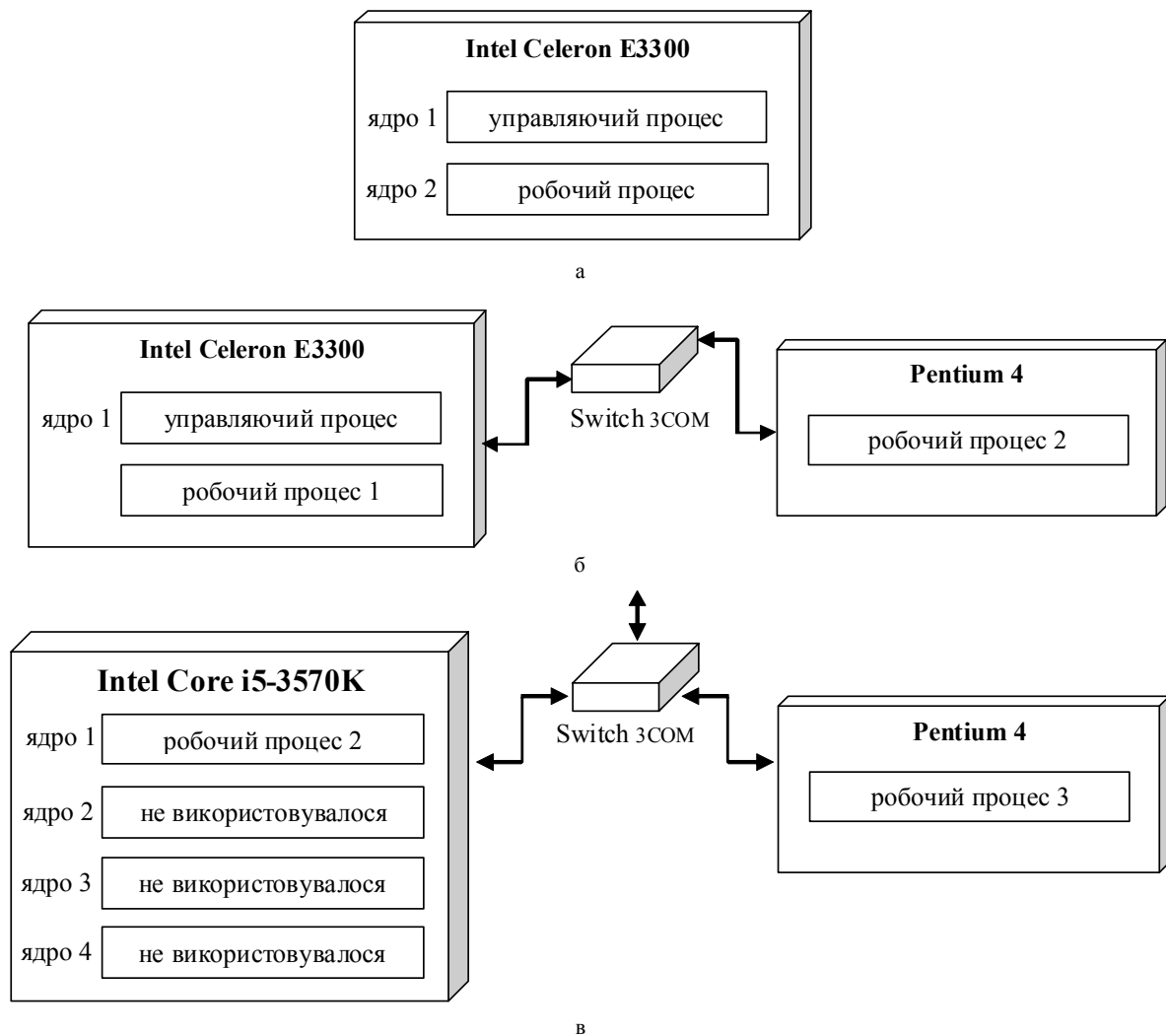


Рисунок 3 – Вікно готовності серверного модуля до обчислень

Рисунок 5 – Структура процесів, що були задіяні на різних обчислювальних платформах:
а – перша обчислювальна платформа; б – друга обчислювальна платформа; в – третя обчислювальна платформа

Таблиця 6 – Результати окремих випробувань обчислювального експерименту

Номер випробування	Вхідні параметри			Прогнозований час формування розкладу		
	$k_{лп}$	$k_{п}$	$K_{пп}$	Перша платформа	Друга платформа	Третя платформа
1	74	1584	2974	71,2	37,4	23,8
2	74	1312	3217	91,5	48,8	31,2
3	80	1723	3343	112,4	59,2	38,7
4	80	1784	3578	115,8	60,1	40,4
5	85	1837	3724	137	71,7	47
...	...	...	...	...	...	...
86	129	8719	51622	412,2	209,3	138,1

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У кожному випробуванні наведеному у табл. 6 наведено вимір часу на виконання розрахунків модифікацією методу гілок та меж для різних обчислювальних платформ, що наведені на рис. 5.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати дослідження дозволяють зробити наступні висновки:

1. Прогнозований час складання розкладу при використанні алгоритму розпаралелювання модифікації методу гілок та меж прямо пропорційно залежить від кількості вершин дводольного графу (яка дорівнює сумі кількості процедур та кількості пацієнтів), кількості призначених процедур та обмежень.

2. Прогнозовано найменший час складання розкладу, який отримано на обчислювальній платформі з максимальною кількістю задіяних ПЕОМ.

3. Отримано максимальне зменшення часу в 19,1 разів в порівнянні 86-го випробування для третьої платформи з 86 випробуванням для першої платформи для методу повного перебору ($t_{мп}$).

4. Таким чином, доведено доцільність розпаралелювання запропонованої модифікації методу гілок та меж для розв'язання задачі про паросполучення зі зникаючими дугами для прикладного використання його в санаторних закладах України.

ВИСНОВКИ

1. Було проаналізована задача складання розкладу прийому процедур пацієнтами санаторію. Поставлена задача складання розкладу прийому лікувальних процедур сформульована в термінах теорії графів і з урахуванням заданих обмежень описана дводольним графом. Показано, що рішення задачі зводиться до знаходження максимального паросполучення в цьому графі.

2. Проведена модифікація задачі про паросполучення зі зникаючими дугами для складання розкладу при заданих обмеженнях.

3. Розроблено оптимальний алгоритм вирішення задачі про паросполучення, суть якого полягає в знаходженні всіх максимальних паросполучення максимальної потужності з подальшою їх перевіркою на сумісність із заданими обмеженнями.

4. Із застосуванням розробленого програмного продукту проведено порівняльний обчислювальний експеримент, який дозволив оцінити часові характеристики оптимального алгоритму розв'язання задачі про паросполучення зі зникаючими дугами на різних розрахункових платформах і порівняти їх. За результатами розра-

хункового моделювання, можна зробити висновки про доцільність розпаралелювання рішення задачі про паросполучення із зникаючими дугами оптимальним алгоритмом. Модифікований метод гілок та меж показує стабільність зменшення часу складання розкладу приймання процедур пацієнтами при збільшенні обчислювальних потужностей ПЕОМ. Так, наприклад, при $k_{лп} = 85$, $k_{п} = 1837$, $K_{пп} = 3724$ час вирішення задачі на третій платформі зменшується у 3 рази порівняно з першою обчислювальною платформою.

Практична цінність досліджень полягає в можливості їх використання при розробці та застосуванні систем календарного планування і оперативного управління в лікувальному процесі. Дослідження також застосовні при розробці систем управління гнучкими автоматизованими системами для підприємств з дискретним характером виробництва.

Автори планують надалі додати ваги кожній дузі і вирішити задачу про паросполучення з «зникаючими» дугами в модифікованому вигляді.

Перспективним напрямком подальших досліджень є модифікація відомих методів (генетичного, мурашиного і т.д.) Для вирішення задачі складання розкладу прийому процедур пацієнтами санаторію.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Данильченко А. О. Розв'язання одного класу задач складання розкладів генетичними алгоритмами на кластерних системах / О. М. Данильченко, А. О. Данильченко, С. А. Ібрагім // Вісник ЖІПІ. – 2004. – № 4. – С.130–135.
2. Данильченко А. О. Задача про паросполучення зі «зникаючими» дугами / А. О. Данильченко, А. В. Панішев, А. М. Данильченко // Збірник наукових праць «Моделювання та інформаційні технології». – 2012. – № 63. – С.75–81.
3. Лупин С. А. http://sevntu.com.ua/cgi-bin/irbis64r_72/cgi-bin/64r/z21ID=&P2IDBN=JOURN_PRINT&P2IDBN=JOURN&S21STN=1&S21REF=&S21FMT=fullv_print&C21COM=S&S21CNR=&S21P01=0&S21P02=0&S21P03=M=&S21STR= Метод решения задач составления расписания, ориентированный на кластерные вычислительные системы / С. А. Лупин, Т. В. Милехина // Известия ВУЗов. Сер. Электроника. – 2007. – № 6. – С. 63–69
4. Пападимитриу Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность / Х. Пападимитриу, К. Стаглиц. – Москва : Мир, 1985. – 512 с.
5. Жолобов Д. А. Введение в математическое программирование: учебное пособие / Д. А. Жолобов. – Москва: МИФИ, 2008. – 376 с.
6. Агеев А. А. Приближенный алгоритм решения метрической задачи о двух коммивояжерах с оценкой точности / А. А. Агеев, А. В. Пяткин // Дискретный анализ и исследование операций. Серия 1 : Сибирское отделение Российской академии наук. Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН. – 2009. – Том 16, № 4. – С. 3–20.

7. Li Wenxia A DNA Algorithm for the Maximal Matching Problem / Li Wenxia, E. Patrikeev, Xiao Dongmei // *Automatics and robot.* – 2015. – № 10. – С. 106–112.
8. Sonkin D. Adaptive algorithm of distributing orders for taxi service / D. Sonkin // *The Tomsk Polytechnic University.* – 2009. – № 5. – С. 65–69. Стаття надійшла до редакції 10.04.2017. Після доробки 27.06.2017.

Данильченко А. А.

Старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ МОДИФИКАЦИИ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ О ПАРОСОЧЕТАНИИ С ИСЧЕЗАЮЩИМИ ДУГАМИ

Актуальность. Рассмотрена задача составления расписания прохождения процедур пациентами санатория, которая сведена к расширенной задаче поиска максимального паросочетания в двудольном графе. Для поставленной задачи о паросочетании с исчезающими дугами разработан оптимальный алгоритм ее решения на базе метода ветвей и границ. Алгоритм учитывает ограничения совместимости процедур. Проведен расчетный эксперимент в основе которого лежит доказательство целесообразности распараллеливания оптимального алгоритма решения задачи составления расписания приема лечебных процедур пациентами для прикладного использования его в санаторных заведениях Украины.

Цель работы. Доказать целесообразность распараллеливания оптимального алгоритма решения задачи составления расписания прохождения процедур пациентами санатория.

Метод. Сформулирована математическая модель задачи о паросочетании с исчезающими дугами. Выбраны вычислительные платформы разной конфигурации имеющие различные вычислительные мощности: разное количество ядер процессора, разный объем памяти, и т.д. Написано авторское программное обеспечение для проведения эксперимента. Программа состоит из двух модулей: серверный модуль, контролирующий процесс выполнения расчетов и клиентский модуль, который выполняется на отдельных ПЭВМ с целью вычисления параллельных операций. Проведен вычислительный эксперимент по распараллеливанию оптимального алгоритма решения задачи о паросочетании с исчезающими дугами. Эксперимент проводился на базе санатория «Дениши». Вычислительный эксперимент проведен на серии случайных условий задачи, генерируемых программой. Проведен анализ полученных результатов путем сравнения времени решения задачи о паросочетании с исчезающими дугами оптимальным алгоритмом на разных вычислительных платформах.

Результаты. Модифицированный метод ветвей и границ показывает стабильность уменьшения времени составления расписания прохождения процедур при увеличении вычислительных мощностей.

Выводы. Прогнозируемое наименьшее время составления расписания, получено на вычислительной платформе с максимальным количеством задействованных ПЭВМ. Прогнозируемое время составления расписания при использовании алгоритма распараллеливания модификации метода ветвей и границ прямо пропорционально зависит от количества вершин двудольного графа (которое равно сумме количества процедур и количества пациентов), количества назначенных процедур и ограничений.

Ключевые слова: паросочетание, двудольный граф, метод ветвей и границ, метод полного перебора, распараллеливания.

Danylchenko A.

Senior lecturer in Computer Engineering Zhytomyr State Technological University, Zhitomir, Ukraine

PARALLELING MODIFIED METHOD OF BRANCH AND BOUND TO SOLVE PROBLEM OF MATCHING CURVES FROM ENDANGERED OR THREATENED

Context. The problem of scheduling the passage of procedures of sanatorium patients, which is reduced to the problem of finding an extended maximum matching in a bipartite graph. For the task of matchings with disappearing arcs developed an optimal algorithm of its solution based on branch and bound method. The algorithm takes into account the limits of compatibility procedures. Spend the current experiment based on the evidence of the feasibility of algorithm parallelization for solving the problem of optimal scheduling patients receiving therapeutic treatments applied to its use in the health institutions of Ukraine.

Objective. To prove the feasibility of the algorithm parallelization optimal solution of our problem.

Method. A mathematical model of the problem of matchings with disappearing arcs. Selected computing platforms of different configurations with a variety of computing power: a different number of processor cores, different amounts of memory, etc. Written copyright software for the experiment. The program consists of two modules: a server module, which controls the process of performing calculations and client module that runs on the PC are separated for the purpose of calculating the parallel operations. The experiment was conducted on the basis of sanatorium «Denyshi». Computational experiments for optimal algorithm parallelization for solving the problem of matchings with disappearing arcs. Computer experiment carried out on a series of random conditions of the problem generated by the program. The analysis of the results by comparing the time solving the problem of matchings with disappearing arcs optimal algorithm on different computing platforms.

Results. The modified method of branches and borders shows the stability of reducing the time of scheduling transmission procedures with increasing computing power.

Conclusions. Estimated minimum time scheduling, received at the computer platform with the maximum number of PCs involved. Estimated time scheduling algorithm parallelization by using modifications of the branch and bound directly proportional to the number of vertices of a bipartite graph (which is equal to the sum of the number of procedures and the number of patients), the number of assigned procedures and restrictions.

Keywords: matching, bipartite graphs, branch and bound method, the method of exhaustive search, parallelization.

REFERENCES

1. Danil'chenko A. O., Danil'chenko A. O., Íbragím S. A. Rozv'yazannya odnogo klasu zadach skladannya rozkladiv genetichnimi algoritmi na klasternikh sistemakh, *Visnik ZHITÍ*, 2004, No. 4, pp. 130–135.
2. Danil'chenko A. O., Panishev A. V., Danil'chenko A. M. Zadacha pro paropoluchennya zi «znikayuchimi» dugami, *Zbirnik naukovikh prats' «Modelyuvannya ta informatsiyni tekhnologii»*, 2012, No. 63, pp. 75–81.
3. Lupin S.. The method for solving scheduling problems, focused on cluster computing systems, *Proceedings of the universities. Ser. Electronics: scientific-technical*, 2007, 6, pp. 63–69.
4. Papadimitriou K.H., Staglios K. Kombinatornaya optimizatsiya. Algoritmy i slozhnost'. Moscow, Mir, 1985, 512 p.
5. Zholobov D. A. Vvedeniye v matematicheskoye programmirovaniye: uchebnoye posobiye. Moscow, MIFI, 2008, 376 p.
6. Ageev A. Approximate algorithm for solving the problem of metric peripatetic salesman with an estimate of the accuracy. *Discrete Analysis and Operations Research. Series 1: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Institute of Mathematics. Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences.* 2009, 4, pp. 3–20.
7. Li Wenxia Patrikeev E., Dongmei Xiao A DNA Algorithm for the Maximal Matching Problem, *Automatics and robot*, 2015, No. 10, pp. 106–112.
8. Sonkin D. Adaptive algorithm of distributing orders for taxi service, *The Tomsk Polytechnic University*, 2009, No. 5, pp. 65–69.

ОБНАРУЖЕНИЕ АНОМАЛИЙ В СЕТЕВОМ ТРАФИКЕ НА ОСНОВЕ ИНФОРМАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

Актуальность. Решена актуальная задача оценки информативности признаков данных большой размерности. Объектом исследования являлся сетевой трафик.

Цель работы – анализ данных сетевого трафика на предмет информативности для выявления аномалий в сетевом трафике с целью сокращения пространства признаков.

Метод. Предложен подход для оценки информативности признаков данных большой размерности, обеспечивающий повышение точности выявления аномалий в сетевом трафике и существенно увеличивающий скорость работы алгоритмов классификации. Проанализированы особенности алгоритмов случайного леса и Firefly. В работе для отбора признаков предложен подход на основе интеграции данных алгоритмов. Признаки сортируются в порядке убывания оценки их важности, наименее информативные не рассматриваются. В качестве классификаторов были рассмотрены деревья решений, наивный Байес, Байесовский классификатор, аддитивная логистическая регрессия и метод k -ближайших соседей. Результаты классификации были оценены с использованием пяти метрик: вероятности истинно-положительных и ложно-положительных результатов, F -меры, мер точности и полноты.

Результаты. Эксперименты были проведены в среде Matlab 2016a, где был реализован предложенный алгоритм на наборе данных NSL-KDD. Наилучшие результаты классификации для отобранных признаков были получены методом k -ближайших соседей.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного подхода, что позволяет рекомендовать его для применения на практике при оценке информативности с целью сокращения пространства признаков и повышения скорости работы алгоритмов классификации. Кроме того, в целях дальнейшего изучения эффективности обнаружения аномалий в сетевом трафике, будет использован набор реальных данных.

Ключевые слова: сетевые атаки, информативность признаков, случайный лес, алгоритм Firefly, NSL-KDD.

НОМЕНКЛАТУРА

RF – Random Forest;
KDD – Knowledge Discovery and Data Mining;
OOB – Out-of-Bag Error;
DoS – Denial of Service Attack;
U2R – Users to Root Attack;
R2L – Remote to Local Attack;
Weka – Waikato Environment for Knowledge Analysis;
Probe – Probing Attack;
TCP – Transmission Control Protocol;
UDP – User Datagram Protocol;
ICMP – Internet Control Message Protocol;
TPR – True Positive Rate;
FPR – False Positive Rate;
AUC – Area under ROC Curve;
BayesNet – Байесовский классификатор;
J48 – деревья решений;
LogitBoost – аддитивная логистическая регрессия;
IBk – метод k -ближайших соседей;
 x_{ij} – точка из набора данных;

$\xi(x_{ij})$ – номер класса, которому соответствует зна-

чение x_{ij} ;

c – количество распознаваемых классов;
 Θ – область допустимых значений;
 I – информативность признака;
 P – популяция светлячков;
 β – привлекательность светлячка;
 γ – коэффициент поглощения света;

r – расстояние;

α – параметр рандомизации;

T_i – ансамбль деревьев решений;

$\hat{\omega}_i(x)$ – класс новых наблюдений;

Q_i – распределение Гаусса случайных чисел.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время с развитием сетевых технологий угрозы безопасности значительно возросли [1, 2]. Таким образом, повышение уровня сетевой безопасности является одним из актуальных вопросов для исследователей [3].

При анализе данных сетевого трафика проблема размерности стоит остро. Размерность имеющихся данных, характеризующаяся различным числом признаков, достигает большого числа показателей. В силу этого необходимо снизить размерность признакового пространства и выделить из них наиболее важные.

Отбор признаков помогает улучшить производительность классификации и ее способности к обобщению. Другим мотивом для отбора признаков является то, что меньшее количество признаков приводит к более интерпретируемым классификаторам, что важно во многих областях (например, биомедицине).

Кроме того, измерение некоторых переменных признаков может быть довольно дорогостоящим с точки зрения денег, требований к хранению и передаче данных или времени на обучение. Данные с меньшей размерностью также могут быть более легко визуализированы. Таким образом, отбор признаков является важной задачей во многих системах классификации образов.

Во многих исследованиях был сделан вывод о том, что различные алгоритмы отбора признаков имеют различное поведение на различных наборах данных, и, следовательно, опасно использовать только один алгоритм [4].

Методы машинного обучения широко применяются для отбора признаков с целью анализа сетевого трафика на предмет наличия атак. Теоретически алгоритмы машинного обучения могут получить высокую производительность, т.е. могут минимизировать уровень ложных тревог и максимизировать точность обнаружения. Однако обычно требуется бесконечное число обучающих образцов. На практике это условие невозможно в силу ограничения вычислительной мощности и требования ответа в режиме реального времени.

Существует множество алгоритмов работающих на основе имитации поведения природных агентов, таких как рыбы, птицы, насекомые и т.д. Среди них алгоритм Firefly (алгоритм «светлячков») является одним из тех, который может приводить к эффективным решениям большого числа задач [5]. Целью данного исследования является разработка нового подхода для отбора признаков путем интеграции алгоритмов случайного леса (random forest, RF) [6, 7] и Firefly.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для оценки информативности в работе рассматриваются алгоритмы случайного леса и Firefly, на основе которых отбираются наиболее важные признаки [8].

Обозначим через Θ область допустимых значений.

Строки матрицы $X \in R^{m \times n}$ при этом представляют элементы обучающей выборки, $\xi(x_{ij})$ – номер класса, которому соответствует значение x_{ij} j -го признака на i -ом элементе выборки, а c – количество распознаваемых классов. Далее производится оценка информативности $I(x_{ij})$ ($i=1, \dots, m$) j -го признака с областью определения Θ алгоритмом случайного леса. Признаки сортируются в порядке убывания оценки их важности, наименее информативные не рассматриваются.

Далее на основе алгоритма Firefly необходимо сгенерировать популяцию светлячков P , где каждый светлячок соответствует отобранному признаку. При этом необходимо определить изменчивость интенсивности света (variation of light intensity) и формулировку привлекательности (attractiveness formulation). Привлекательность светлячка пропорциональна интенсивности света, которая меняется с расстоянием r и задается в виде,

$$\beta = \beta_0 e^{-\gamma r^2}, \quad (1)$$

где β_0 превращается в привлекательность при $r=0$. Движение светлячка k привлекает другого более яркого светлячка l и определяется как

$$y_k^{t+1} = y_k^t + \beta_0 e^{-\gamma r_{kl}^2} (y_l^t - y_k^t) + \alpha Q_k^t. \quad (2)$$

Требуется оценить информативность признаков сетевого трафика для повышения скорости работы систем обнаружения вторжений, сохраняя при этом достаточно хорошие результаты.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

При классификации набор данных обычно включает большое количество признаков, которые могут быть релевантными, нерелевантными или избыточными. Избыточные и нерелевантные признаки не пригодны для классификации, и они могут даже снизить эффективность классификатора в отношении большого пространства поиска, которое также известно как «проклятие размерности» [9].

Преимущества отбора признаков включают в себя сокращение вычислительных затрат, экономию дискового пространства, упрощение процедур выбора модели для точного прогнозирования и интерпретации комплексных зависимостей между переменными [10]. Отобранные признаки не только оптимизируют точность классификации, но также уменьшают количество необходимых данных для достижения оптимального уровня производительности процесса обучения [11, 12].

Методы отбора признаков обычно включают в себя стратегию поиска, меру оценки, критерий остановки и валидацию результатов.

Среди двух подходов, используемых для отбора признаков, а именно метода фильтров (filter approach) и метода обертки (wrapper approach), первый работает лучше при анализе данных высокой размерности [11].

Генетический алгоритм является одним из недавних разработок для отбора признаков [13]. В настоящее время он является очень эффективным в научно-технической оптимизации.

Классификация на основе протоколов была предложена с использованием генетического алгоритма с логистической регрессией и применена к набору данных KDD'99 в работах [14, 15].

Гибридный метод для отбора признаков при обнаружении сетевых вторжений представлен в работе [16]. В этой статье, речь идет о новом алгоритме, который сочетает в себе прирост информации и генетический алгоритм.

В [17] представлен современный подход для отбора признаков на основе алгоритма Firefly.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В данном разделе приводится описание алгоритмов случайного леса и Firefly.

Случайный лес был предложен Л. Брейманом в статье [6]. Он строится на основе ансамбля деревьев решений, каждый элемент которого получается при помощи бутстрэпа (bootstrap) [18, 19]. Называется ансамблем по той причине, что при создании одного дерева используются не все признаки пространства, а только случайно выбранные.

Алгоритм случайного леса заключается в следующем:

Пусть обучающий набор состоит из m образцов, размерность пространства признаков при этом равна n . Строится необходимое число деревьев. С помощью голосования проводится классификация. Объект классификации будет отнесен каждым деревом к одному из классов, и класс, за который проголосовало большее количество деревьев, побеждает.

Для каждого дерева выбирается подвыборка из числа наблюдений и подвыборка из числа переменных [20]. На этой подвыборке обучается дерево.

Далее получается ансамбль деревьев решений $\{T_i\}_{i=1}^s$, где s – количество деревьев в ансамбле ($i = 1, 2, \dots, s$).

При предсказании новых наблюдений получается класс $\hat{\omega}_i(x) \in \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_c\}$, предсказанный T_i , т.е. $T_i(x) = \hat{\omega}_i(x)$; где $\hat{\omega}_{if}^s(x)$ – класс, наиболее часто встречающийся в множестве $\{\hat{\omega}_i(x)\}_{i=1}^s$ [21].

Для этой задачи можно использовать любые классификаторы, но деревья обладают способностью быстро обучаться. На основе метрики out-of-bag error (OOB) определяется ошибка [22–24].

Преимущества случайных лесов включают:

- значительное повышение точности;
- высокая вычислительная эффективность;
- переподгонка в некоторых случаях решаема (когда количество признаков больше числа наблюдений в обучающей выборке);
- метод прост в применении.

Их недостатками являются отсутствие наглядного представления процесса принятия решения, а, следовательно, и сложность в интерпретации результатов.

Брейман предложил меры информативности признаков, что позволило строить матрицу близости наблюдений для компенсации перечисленных выше недостатков. Одной из важных задач статистического анализа является нахождение наиболее информативных признаков. А меры информативности дают такую возможность.

Алгоритм Firefly был предложен Xin She Yang и основан на поведении светлячков [5]. Основным алгоритм Firefly предполагает, что существует P светлячков y_k ($k = 1, \dots, P$), первоначально произвольно размещенных в пространстве. Интенсивность света I каждого светлячка определяется целевой функцией $f(x)$. В простейшей форме, интенсивность света $I(r)$ изменяется в зависимости от расстояния r монотонно и экспоненциально, как это показано в (3):

$$I = I_0 e^{-\gamma r}, \quad (3)$$

где I_0 – исходная интенсивность света и γ – коэффициент поглощения света. Если $I_i > I_j$, $j \neq i$, то менее яркий светлячок j будет двигаться в направлении более яркого светлячка i .

Привлекательность изменяется в зависимости от расстояния $r_{ij} = d(y_i, y_j)$:

$$r_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (4)$$

Движение одного светлячка к другому, более привлекательному светлячку определяется как (2). Если яркость j больше, чем i , то передвигаем i к j . Таким образом, сходимость светлячка определяется его движением.

В (2) второе слагаемое обусловлено привлекательностью. В третьем члене α – параметр рандомизации, а Q_t представляет собой распределение Гаусса случайных чисел. Если $\beta_0 = 0$, то движение становится произвольным. Если $\gamma = 0$, то задача сводится к оптимизации роя частиц.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения экспериментов была рассмотрена база данных сигнатур NSL-KDD [25], построенная на основе базы KDD-99 по инициативе американской Ассоциации перспективных оборонных научных исследований DARPA [26]. Она охватывает широкий спектр различных вторжений, смоделированных в среде, имитирующей сеть Военно-воздушных сил США.

Рассмотренная база NSL-KDD имеет следующие преимущества [27]:

- нет избыточных записей в обучающем наборе, так что классификатор не покажет какой-либо предвзятый результат;
- нет дубликата записей в тестовом наборе. Он содержит некоторые атаки, которые не присутствуют в обучающем наборе;
- количество выбранных записей из каждой группы уровней сложности обратно пропорционально доле записей в исходном наборе данных NSL-KDD.

Обучающий набор данных состоит из 21 различных атак, а тестовый – из 37. Известные виды атак содержатся в обучающем наборе, в то время как новые атаки – это дополнительные атаки в тестовом наборе данных (они отсутствуют в обучающем наборе). Кроме того, количество записей в обучающем наборе составляет 125973 образцов, а в тестовом – 22544. Это преимущество делает его доступным для проведения экспериментов на полных данных без необходимости случайным образом выбирать небольшую часть.

Все атаки в NSL-KDD поделены на четыре группы [28]: DoS (Denial of Service Attack), U2R (Users to Root Attack), R2L (Remote to Local Attack) и Probe (Probing Attack).

Каждая запись имеет 42 атрибута, описывающих различные признаки (табл. 1). Протоколы, которые рассматриваются в NSL-KDD, включают TCP, UDP (User Datagram Protocol) и ICMP (Internet Control Message Protocol).

Метки присваиваются каждой записи либо в качестве типа «атаки», либо как «нормальное» состояние [29].

Для сравнения производительности и эффективности методов обнаружения вторжений в сети используются следующие метрики [30]:

а) Наиболее распространенными метриками для сравнения систем обнаружения вторжений являются вероятности истинно-положительных (True Positive Rate, TPR) и ложно-положительных результатов (False Positive Rate, FPR). FPR является вероятностью получения оповещения, даже если система ведет себя нормально. С другой стороны, вероятность ложно-отрицательных результатов (False Negative Rate, FNR) является вероятностью не дающей сигнала тревоги, даже если поведение системы является вредоносным. Уравнения (5) и (6) представляют FPR и FNR:

$$FPR = \frac{\text{number of false positives}}{\text{number of false positives} + \text{number of true negatives}}, \quad (5)$$

Таблица 1 – Список признаков для каждой записи базы данных NSL-KDD

№	Название признака	№	Название признака	№	Название признака
1	duration	15	su_attempted	29	same_srv_rate
2	protocol_type	16	num_root	30	diff_srv_rate
3	service	17	num_file_creations	31	srv_diff_hast_rate
4	flag	18	num_shells	32	dst_host_count
5	scr_bytes	19	num_access_files	33	dst_host_srv_count
6	dst_bytes	20	num_outbound_cmds	34	dst_host_same_srv_rate
7	land	21	is_host_login	35	dst_host_diff_srv_rate
8	wrong_fragments	22	is_quest_login	36	dst_host_same_src_port_rate
9	urgent	23	count	37	dst_host_srv_diff_host_rate
10	hot	24	srv_count	38	dst_host_serror_rate
11	num_failed_logins	25	serror_rate	39	dst_host_srv_serror_rate
12	logged_in	26	srv_serror_rate	40	dst_host_rerror_rate
13	num_compromised	27	rerror_rate	41	dst_host_srv_rerror_rate
14	root_shell	28	srv_rerror_rate	42	class

$$FNR = \frac{\text{number of false negatives}}{\text{number of false negatives} + \text{number of true positives}} \quad (6)$$

Следовательно, вероятности TPR и истинно-отрицательных результатов (True Negative Rate, TNR) могут быть определены как:

$$TPR = 1 - FNR \text{ и } TNR = 1 - FPR \quad (7)$$

По сути, существует компромисс между скоростью ложных срабатываний и частотой ложных отрицательных значений. Если политика обнаружения вторжений становится очень чувствительной, риск FPR будет выше. Таким образом, баланс следует рассматривать между этими двумя рисками (FPR и FNR) в конфигурации системы обнаружения вторжений.

б) Выражение (8) представляет собой меру полноты (recall), которая определяется как доля нормального поведения:

$$\text{recall} = \frac{\text{number of true positives}}{\text{number of true positives} + \text{number of false negatives}} \quad (8)$$

Тем не менее, мера полноты недостаточно содержательна, так как она может быть получена тривиальным образом путем классификации всех типов поведения, как вредоносных.

в) Существует еще одна метрика, называемая мерой точности (precision), которая решает эту проблему:

$$\text{precision} = \frac{\text{number of true negatives}}{\text{number of true negatives} + \text{number of false positives}} \quad (9)$$

При классификации всего трафика как нормального, мера точности достигается полностью.

г) F-мера является показателем, который сочетает в себе меры точности и полноты:

$$F\text{-measure} = \frac{2 \times \text{recall} \times \text{precision}}{\text{recall} + \text{precision}} \quad (10)$$

д) ROC-кривая (Receiver Operator Characteristic – рабочая характеристика (приемника)) сравнивает частоту TPR с FPR [30]. Одно важное ограничение этой метрики состоит в том, что она вычисляет общую производительность системы обнаружения вторжений на всех исходных данных. Чем выше значение площади под ROC-кривой (area under ROC curve, AUC), тем лучше производительность метода.

Разрабатываемый подход был проанализирован с использованием следующих классификаторов:

- наивного Байесовского классификатора (NaiveBayes);
- деревьев решений (J48);
- аддитивной логистической регрессии (Additive Logistic Regression – LogitBoost);
- Байесовского классификатора (BayesNet);
- метода k-ближайших соседей (IBk).

В ходе тестирования были использованы реализации данных алгоритмов в программной системе Weka 3.8.0.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты были проведены в ОС Windows® 10–64 с процессором Core i7 (2,5 ГГц), 8,0 Гб ОЗУ. Оценка информативности признаков проводилась в среде Matlab 2016a на наборе данных NSL-KDD. Параметры алгоритмов Firefly и случайного леса, использованные в эксперименте, приведены в табл. 2.

В результате ошибка алгоритма случайного леса составила 0,08% при количестве деревьев равном 30 и значении ООВ равном 0,03%, что показывает хорошую работу подхода.

Пять различных алгоритмов классификации (деревья решений, наивный Байес, Байесовский классификатор, аддитивная логистическая регрессия и метод k-ближайших соседей) сравниваются в программной среде Weka 3.8.0 при отобранных информативных признаках (Таблица 3) и 41 признаке базы данных NSL-KDD.

В таблицах 4 и 5 приводятся результаты работы алгоритмов классификации сетевых атак на основе 41 признака и отобранных информативных признаков из имеющегося набора данных соответственно.

Наилучшие результаты были отмечены жирным шрифтом (табл. 4–5). В качестве метрик были рассмотрены TPR, FPR, Precision, Recall, F-мера и AUC.

Таблица 2 – Параметры алгоритмов оценки информативности признаков

Число светлячков	7
Параметр рандомизации (α)	0,2
Привлекательность	2
Коэффициент поглощения света (γ)	1
Число деревьев	30

Из табл. 4–5 можно сделать заключение, что наилучшие результаты были получены методом IBk. Согласно метрике FPR наименьший процент ошибки классификации для 41 признака был достигнут методом NaiveBayes, а для отобранных 25 признаков – методом IBk.

Сравнение производительности алгоритмов (Таблица 4) показало, что метод BayesNet превосходит остальные по метрике AUC (92,5%). Анализируя полученные

данные по метрике F-мера уменьшение размерности вектора признаков согласно информативности привело к улучшению работы методов J48, NaiveBayes, LogitBoost и IBk.

Сравнение значений AUC для рассмотренных классификаторов более наглядно демонстрируется на рис. 1 (красным цветом обозначены результаты для 41 признака, а синим – 25 признаков на основе предложенного подхода).

Таблица 3 – Результаты оценки информативности признаков

Подход	Отобранные признаки
Алгоритм Firefly	22,26,30,5,37,14,7,13,27,21,10,18,24,23,11,12,31,1,20,36
Случайный лес	5,2,23,24,36,10,8,4,34,40,31,32,35,22,6,27,1,33,37,16,14,11,29,13,28
Предлагаемый подход	22,26,5,2,23,24,36,37,14,13,27,21,10,18,11,12,31,1,20,8,29,28,40,35,6

Таблица 4 – Сравнение производительности алгоритмов классификации для 41 признака

Метод	TPR (%)	FPR (%)	Precision (%)	Recall (%)	F-мера (%)	AUC (%)
J48	75,8	13,2	76,7	75,8	74,0	81,8
NaiveBayes	70,2	11,7	75,8	70,2	70,7	86,5
BayesNet	71,5	19,2	78,6	71,5	67,0	92,5
LogitBoost	74,5	15,8	78,0	74,5	73,3	90,6
IBk	76,8	16,3	81,2	76,8	72,6	82,3

Таблица 5 – Сравнение производительности алгоритмов классификации для отобранных признаков

Метод	TPR (%)	FPR (%)	Precision (%)	Recall (%)	F-мера (%)	AUC (%)
J48	76,5	14,7	80,9	76,5	74,3	82,1
NaiveBayes	59,5	7,9	73,4	59,5	64,9	84,7
BayesNet	73,9	16,9	80,2	73,9	69,8	93,6
LogitBoost	78,8	11,5	81,8	78,8	78,7	93,5
IBk	99,6	0,2	99,6	99,6	99,6	100

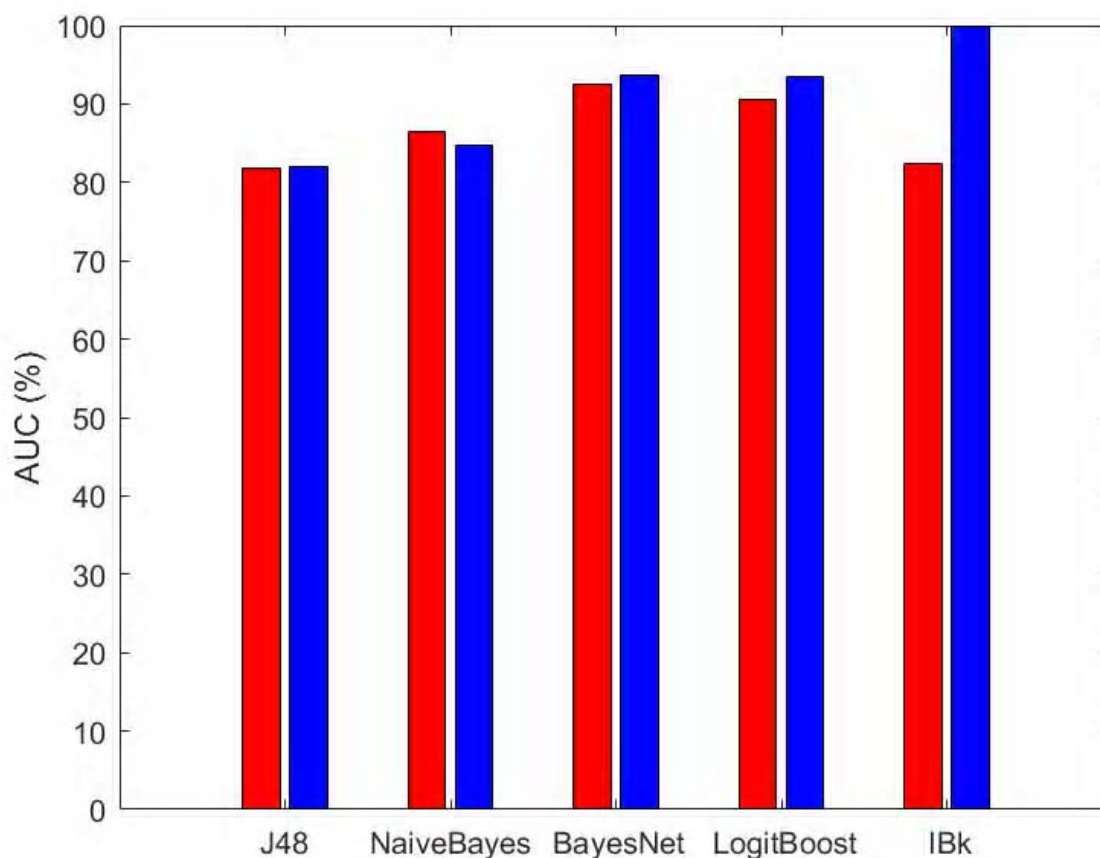


Рисунок 1 – Сравнение производительности методов классификации для базы данных NSL-KDD

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный подход оценки информативности признаков данных большой размерности обеспечивает повышение точности выявления аномалий в сетевом трафике. Соответственно, сокращение пространства признаков существенно увеличивает скорость работы алгоритмов классификации.

Тестирование подхода проводилось на основе метрик TPR, FPR, Precision, Recall, F-мера и AUC. Наилучшие результаты были получены для метода к-ближайших соседей, однако он требует больших временных затрат. В силу этого предпочтение можно было бы отдать методам BayesNet или LogitBoost.

ВЫВОДЫ

Цель текущего исследования состояла в анализе данных высокой размерности на предмет информативности для выявления аномалий в сетевом трафике. В работе для выявления информативных признаков, используемых для обнаружения атак в сетевом трафике, были рассмотрены алгоритмы случайного леса и Firefly. В качестве классификаторов были рассмотрены деревья решений, наивный Байес, Байесовский классификатор, аддитивная логистическая регрессия и метод к-ближайших соседей.

Таким образом, экспериментальные результаты показывают, что предлагаемый подход достигает перспективной производительности при обнаружении сетевых атак на основе информативных признаков.

Хотя предложенный алгоритм отбора информативных признаков имеет обнадеживающую производительность, она может быть дополнительно повышена за счет оптимизации стратегии поиска. Кроме того, в целях дальнейшего изучения эффективности обнаружения аномалий в сетевом трафике, будет использован набор реальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dua S. Data mining and machine learning in cybersecurity / S. Dua, X. Du. – Boca Raton, FL: CRC Press, 2011. – 256 p. DOI: 10.1201/b10867
2. Saxe J. Why security data science matters and how its different: pitfalls and promises of data science based breach detection and threat intelligence [Electronic resource]. – 2015. – Access mode: <https://www.blackhat.com/us-15/speakers/Joshua-Saxe.html>
3. Gates C. Challenging the anomaly detection paradigm: a provocative discussion / C. Gates, C. Taylor // Proceedings of the Workshop on New Security Paradigms. – 2007. – P. 21–29. DOI: 10.1145/505202.505211
4. Molina L. C. Feature selection algorithms: a survey and experimental evaluation / L. C. Molina, L. Belanche, A. Nebot // Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining. – 2002. – P. 306–313. DOI: 10.1109/ICDM.2002.1183917
5. Yang X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization / X.-S. Yang // Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. – 2009. – Vol. 5792. – P. 169–178. DOI: 10.1007/978-3-642-04944-6_14
6. Breiman, L. Random forests / L. Breiman // Machine Learning. – 2001. – № 1. – P. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324
7. Random forests – Classification manual [Electronic resource]. – 2017. Access mode: <http://www.math.usu.edu/adele/Forests/>
8. Strobl, C. Danger: High power! – exploring the statistical properties of a test for random forest variable importance / C. Strobl, A. Zeileis // Proceedings in Computational Statistics. – 2008. – P. 59–66.
9. Xue B. Particle swarm optimization for feature selection in classification: Novel initialization and updating mechanisms / B. Xue, M. Zhang, W. N. Browne // Applied Soft Computing. – 2014. – Vol. 18. – P. 261–276. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2227469
10. Feng D. Supervised feature subset selection with ordinal optimization / D. Feng, F. Chen, W. Xu // Knowledge-Based Systems. – 2014. – Vol. 56. – P. 123–140. DOI: 10.1016/j.knsys.2013.11.004
11. Bouaguel W. A fusion approach based on wrapper and filter feature selection methods using majority vote and feature weighting / W. Bouaguel, G. B. Mufti, M. Limam // Proceedings of the International Conference on Computer Applications Technology. – 2013. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAT.2013.6522003
12. Wang G. An improved boosting based on feature selection for corporate bankruptcy prediction / G. Wang, J. Ma, S. Yang // Expert Systems with Applications. – 2014. – Vol. 41, № 5. – P. 2353–2361. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.033
13. Srinivasa K. G. Application of Genetic Algorithms for Detecting Anomaly in Network Intrusion Detection Systems / K. G. Srinivasa // Advances in Computer Science and Information Technology. Networks and Communications. – 2012. – Vol. 84. – P. 582–591. DOI: 10.1007/978-3-642-27299-8_61
14. Yu K. M. Protocol-based classification for intrusion detection / K. M. Yu, M. F. Wu, W. T. Wong // Applied Computer and Applied Computational Science. – 2008. – Vol. 3, № 3. – P. 135–141.
15. Akbar S. Intrusion detection system methodologies based on data analysis / S. Akbar, R. K. Nageswara, J. A. Chandulal // International Journal of Computer Applications. – 2010. – Vol. 5, № 2. – P. 10–20. DOI: 10.5120/892-1266
16. Sethuramalingam S. Hybrid feature selection for network intrusion detection / S. Sethuramalingam, E. R. Naganathan // International Journal of Computer Science and Engineering. – 2011. – Vol. 3, № 5. – P. 1773–1780. DOI: 10.4225/75/57a84d4fbefbb
17. Banati H. Fire Fly based feature selection approach / H. Banati, M. Bajaj // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. – 2011. – Vol. 8, № 4. – P. 473–80.
18. Hothorn T. Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework / T. Hothorn, K. Hornik, A. Zeileis // Journal of Computational and Graphical Statistics. – 2006. – Vol. 15, № 3. – P. 651–674. DOI: 10.1198/106186006X133933
19. Breiman L. Stacked Regressions / L. Breiman // Machine Learning. – 1996. – Vol. 24. – P. 49–64. DOI: 10.1007/BF00117832
20. Strobl C. Conditional variable importance for random forests / C. Strobl, A.-L. Boulesteix, T. Kneib, T. Augustin, A. Zeileis // BMC Bioinformatics. – 2008. – Vol. 9, № 1. – P. 25. DOI: 10.1186/1471-2105-9-307
21. Siroky D. Navigating Random Forests and related advances in algorithmic modeling / D. Siroky // Statistics Surveys. – 2009. – Vol. 3. – P. 147–163. DOI: 10.1214/07-SS033
22. Archer K. J. Empirical characterization of random forest variable importance measures / K. J. Archer, R. V. Kimes // Computational Statistics & Data Analysis. – 2008. – № 4. – P. 2249–2260. DOI: 10.1016/j.csda.2007.08.015
23. Strobl C. Bias in random forest variable importance measures: illustrations, sources and a solution / C. Strobl, A.-L. Boulesteix, A. Zeileis, T. Hothorn // BMC Bioinformatics. – 2007. – Vol. 8, № 1. – P. 1471–2105. DOI: 10.1186/1471-2105-8-25
24. Liaw A. Classification and Regression by randomForest / A. Liaw, M. Wiener // R News. – 2002. – Vol. 2, № 3. – P. 18–22.
25. Aggarwal P. Analysis of KDD dataset attributes-class wise for intrusion detection / P. Aggarwal, S. K. Sharma // Procedia Computer Science. – 2015. – Vol. 57. – P. 842–851. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.490
26. McHugh J. Testing intrusion detection systems: a critique of the 1998 and 1999 DARPA intrusion detection system evaluations

- as performed by lincoln laboratory / J. McHugh // ACM Transactions on Information and System Security. – 2000. – Vol. 3, № 4. – P. 262–294. DOI: 10.1145/382912.382923
27. Tavallae M. A detailed analysis of the KDD CUP 99 Data Set / M. Tavallae, E. Bagheri, W. Lu, A. Ghorbani // Proceedings of the second IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications. – 2009. – P. – 53–58. DOI: 10.1109/CISDA.2009.5356528
28. NSL-KDD data set for network-based intrusion detection systems [Electronic resource]. – 2017. – Access mode: <http://nsl.cs.unb.ca/NSL-KDD/>
29. Davis J. J. Data preprocessing for anomaly based network intrusion detection: A review / J. J. Davis, A. J. Clark // Computers & Security. – 2011. – Vol. 30, № 6–7. – P. 353–375. DOI: 10.1016/j.cose.2011.05.008
30. Holz T. 13 security measurements and metrics for networks / T. Holz // Dependability Metrics. – 2008. – P. 157–165. DOI: 10.1007/978-3-540-68947-8_13

Статья поступила в редакцию 07.04.2017.

После доработки 26.06.2017.

Имамвердиев Я. Н.¹, Сухостат Л. В.²

¹Канд. техн. наук, доцент, зав. відділом, Інститут інформаційних технологій Національної Академії Наук Азербайджану, Баку, Азербайджан

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник, Інститут інформаційних технологій Національної Академії Наук Азербайджану, Баку, Азербайджан

ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У МЕРЕЖЕВОМУ ТРАФІКУ НА ОСНОВІ ІНФОРМАТИВНИХ ОЗНАК

Актуальність. Вирішено актуальне завдання оцінки інформативності ознак даних великої розмірності. Об'єктом дослідження був мережевий трафік.

Мета роботи – аналіз даних мережевого трафіку на предмет інформативності для виявлення аномалій в мережевому трафіку з метою скорочення простору ознак.

Метод. Запропоновано підхід для оцінки інформативності ознак даних великої розмірності, що забезпечує підвищення точності виявлення аномалій в мережевому трафіку і істотно збільшує швидкість роботи алгоритмів класифікації. Проаналізовано особливості алгоритмів випадкового лісу і Firefly. В роботі для відбору ознак запропонований підхід на основі інтеграції даних алгоритмів. Ознаки сортуються в порядку убавання оцінки їх важливості, найменш інформативні не розглядаються. Як класифікаторів були розглянуті дерева рішень, наївний Байес, Байєсівський класифікатор, аддитивна логістична регресія і метод до найближчих сусідів. Результати класифікації були оцінені з використанням п'яти метрик: ймовірності істинно-позитивних і хибно-позитивних результатів, F-заходи, заходів точності і повноти.

Результати. Експерименти були проведені в середовищі Matlab 2016a, де був реалізований запропонований алгоритм на наборі даних NSL-KDD. Найкращі результати класифікації для відібраних ознак були отримані методом к-найближчих сусідів.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого підходу, що дозволяє рекомендувати його для застосування на практиці при оцінці інформативності з метою скорочення простору ознак і підвищення швидкості роботи алгоритмів класифікації. Крім того, з метою подальшого вивчення ефективності виявлення аномалій в мережевому трафіку, буде використаний набір реальних даних.

Ключові слова: мережеві атаки, інформативність ознак, випадковий ліс, алгоритм Firefly, NSL-KDD.

Imamverdiyev Y. N.¹, Sukhostat L. V.²

¹PhD, Associate Professor, Head of Department, Institute of Information Technology of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

²PhD, Senior Researcher, Institute of Information Technology of Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan

NETWORK TRAFFIC ANOMALIES DETECTION BASED ON INFORMATIVE FEATURES

Context. The urgent task for feature informativeness evaluation of a large amount of data has been solved. The object of the study was a network traffic.

Objective is to analyze the data informativeness for network traffic anomalies detection in order to reduce the feature space.

Method. The approach for feature informativeness evaluation of a large amount of data is proposed to increase the accuracy of the anomaly detection in network traffic. It also substantially increases the computation speed of the classification algorithms. The characteristics of a random forest and Firefly algorithms are considered. In the paper, an algorithm for feature selection based on the integration of these algorithms is proposed. Features are sorted in descending order according to their importance, the least informative ones are not considered. The decision trees, naive Bayes, Bayesian classifier, additive logistic regression and k-nearest neighbors method are considered as classifiers. The quality of the classification results is estimated using six evaluation metrics: true positive rate, false positive rate, precision, recall, F-measure and AUC.

Results. The experiments have been performed in the Matlab environment (2016a) on the NSL-KDD data set, using the proposed algorithm. The best classification results for the selected features have been obtained using k-nearest neighbors method.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the efficiency of the proposed approach and allow recommending it for practical use in feature informativeness evaluation in order to reduce the feature space and increase the computation speed of the classification algorithms. In addition, in order to further study the effectiveness of anomaly detection in network traffic, a real data set will be used.

Keywords: network attacks, feature informativeness, random forest, Firefly algorithm, NSL-KDD.

REFERENCES

1. Dua S., Du X. Data mining and machine learning in cybersecurity. Boca Raton, FL, CRC Press, 2011, 256 p. DOI: 10.1201/b10867
2. Saxe J. Why security data science matters and how its different: pitfalls and promises of data science based breach detection and threat intelligence [Electronic resource], 2015, Access mode: <https://www.blackhat.com/us-15/speakers/Joshua-Saxe.html>
3. Gates C., Taylor C. Challenging the anomaly detection paradigm: a provocative discussion, *Proceedings of the Workshop on New Security Paradigms*, 2007, pp. 21–29. DOI: 10.1145/505202.505211
4. Molina L. C., Belanche L., Nebot A. Feature selection algorithms: a survey and experimental evaluation, *Proceedings of IEEE International Conference on Data Mining*, 2002, pp. 306–313. DOI: 10.1109/ICDM.2002.1183917
5. Yang X.-S. Firefly algorithms for multimodal optimization, *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications*, 2009, Vol. 5792, pp. 169–178. DOI: 10.1007/978-3-642-04944-6_14
6. Breiman, L. Random forests, *Machine Learning*, 2001, No. 1, pp. 5–32. DOI: 10.1023/A:1010933404324
7. Random forests – Classification manual [Electronic resource], 2017, Access mode: <http://www.math.usu.edu/adele/Forests/>
8. Strobl C., Zeileis A. Danger: High power! – exploring the statistical properties of a test for random forest variable importance, *Proceedings in Computational Statistics*, 2008, pp. 59–66.
9. Xue B., Zhang M., Browne W. N. Particle swarm optimization for feature selection in classification: Novel initialization and updating mechanisms, *Applied Soft Computing*, 2014, Vol. 18, pp. 261–276. DOI: 10.1109/TSMCB.2012.2227469
10. Feng D., Chen F., Xu W. Supervised feature subset selection with ordinal optimization, *Knowledge-Based Systems*, 2014, Vol. 56, pp. 123–140. DOI: 10.1016/j.knosys.2013.11.004
11. Bouaguel W., Mufti G. B., Limam M. A fusion approach based on wrapper and filter feature selection methods using majority vote and feature weighting, *Proceedings of the International Conference on Computer Applications Technology*, 2013, pp. 1–6. DOI: 10.1109/ICCAT.2013.6522003
12. Wang G., Ma J., Yang S. An improved boosting based on feature selection for corporate bankruptcy prediction, *Expert Systems with Applications*, 2014, Vol. 41, No. 5, pp. 2353–2361. DOI: 10.1016/j.eswa.2013.09.033
13. Srinivasa K. G. Application of Genetic Algorithms for Detecting Anomaly in Network Intrusion Detection Systems, *Advances in Computer Science and Information Technology: Networks and Communications*, 2012, Vol. 84, pp. 582–591. DOI: 10.1007/978-3-642-27299-8_61
14. Yu K. M., Wu M. F., Wong W. T. Protocol-based classification for intrusion detection, *Applied Computer and Applied Computational Science*, 2008, Vol. 3, No. 3, pp. 135–141.
15. Akbar S., Nageswara R. K., Chandulal J. A. Intrusion detection system methodologies based on data analysis, *International Journal of Computer Applications*, 2010, Vol. 5, No. 2, pp. 10–20. DOI: 10.5120/892-1266
16. Sethuramalingam S., Naganathan E. R. Hybrid feature selection for network intrusion detection, *International Journal of Computer Science and Engineering*, 2011, Vol. 3, No. 5, pp. 1773–1780. DOI: 10.4225/75/57a84d4fbefbb
17. Banati H., Bajaj M. Fire Fly based feature selection approach, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2011, Vol. 8, № 4, pp. 473–80.
18. Hothorn T., Hornik K., Zeileis A. Unbiased recursive partitioning: a conditional inference framework, *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 2006, Vol. 15, No. 3, pp. 651–674. DOI: 10.1198/106186006X133933
19. Breiman L. Stacked Regressions, *Machine Learning*, 1996, Vol. 24, pp. 49–64. DOI: 10.1007/BF00117832
20. Strobl C., Boulesteix A.-L., Kneib T., Augustin T., Zeileis A. Conditional variable importance for random forests, *BMC Bioinformatics*, 2008, Vol. 9, No. 1, pp. 25. DOI: 10.1186/1471-2105-9-307
21. Siroky D. Navigating Random Forests and related advances in algorithmic modeling, *Statistics Surveys*, 2009, Vol. 3, pp. 147–163. DOI: 10.1214/07-SS033
22. Archer K. J., Kimes R. V. Empirical characterization of random forest variable importance measures, *Computational Statistics & Data Analysis*, 2008, No. 4, pp. 2249–2260. DOI: 10.1016/j.csda.2007.08.015
23. Strobl C., Boulesteix A.-L., Zeileis A., Hothorn T. Bias in random forest variable importance measures: illustrations, sources and a solution, *BMC Bioinformatics*, 2007, Vol. 8, No. 1, pp. 1471–2105. DOI: 10.1186/1471-2105-8-25
24. Liaw A., Wiener M. Classification and Regression by randomForest. *R News*, 2002, Vol. 2, No. 3, pp. 18–22.
25. Aggarwal P., Sharma S. K. Analysis of KDD dataset attributes-class wise for intrusion detection, *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 57, pp. 842–851. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.490
26. McHugh J. Testing intrusion detection systems: a critique of the 1998 and 1999 DARPA intrusion detection system evaluations as performed by lincoln laboratory, *ACM Transactions on Information and System Security*, 2000, Vol. 3, No. 4, pp. 262–294. DOI: 10.1145/382912.382923
27. Tavallaee M., Bagheri E., Lu W., Ghorbani A. A detailed analysis of the KDD CUP 99 Data Set, *Proceedings of the second IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications*, 2009, pp. 53–58. DOI: 10.1109/CISDA.2009.5356528
28. NSL-KDD data set for network-based intrusion detection systems [Electronic resource], 2017, Access mode: <http://nsl.cs.unb.ca/NSL-KDD/>
29. Davis J. J., Clark A. J. Data preprocessing for anomaly based network intrusion detection: A review, *Computers & Security*, 2011, Vol. 30, No. 6–7, pp. 353–375. DOI: 10.1016/j.cose.2011.05.008
30. Holz T. 13 security measurements and metrics for networks, *Dependability Metrics*, 2008, pp. 157–165. DOI: 10.1007/978-3-540-68947-8_13

УДК 378.147.044.4'24(477)

Кузьма К. Т.

Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії, Миколаївський національний університет ім. В. О. Сухомлинського, Миколаїв, Україна

ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ПЕРЕВІРКИ РІВНЯ ЗНАНЬ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОГО АНАЛІЗУ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу підвищення ефективності процесу підтримки прийняття рішень під час статистичного контролю знань.

Мета роботи – розробка обчислювальної процедури вирішення чотириохальтернативної задачі класифікації тестованих за рівнем навченості, що дозволяє здійснювати контроль знань диференційовано, мінімізує об'єм завдань, необхідний для виконання.

Метод. Запропоновано обчислювальну процедуру класифікації тестованих на чотири класи, які відповідають рівням навченості: «початковий», «середній», «достатній», «високий», що базується на використанні двоохальтернативного критерію послідовного аналізу в декілька етапів та забезпечує здійснення контролю знань в процесі виконання завдань, мінімізуючи таким чином час перевірки знань, що дозволяє автоматизувати процес перевірки статистичних гіпотез у системах тестування та навчання з метою диференційної оцінки знань учасників навчального процесу. Для вирішення задачі оцінки придатності тесту запропоновано метод, що базується на побудові функції оперативної характеристики послідовного критерію, яка дозволяє визначити обсяг завдань достатній для досягнення бажаного рівня якості тесту за рахунок встановлення зв'язку між очікуваною ймовірністю прийняття гіпотези та випадковим значенням параметра ймовірності появи у виборці з $1, 2, \dots, n$ питань приймального числа невірно виконаних завдань.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану обчислювальну процедуру, що використано при проведенні обчислювальних експериментів тестового контролю знань.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованої процедури і програмного забезпечення, що її реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці для рішення задач автоматизованої перевірки рівня знань.

Ключові слова: послідовний аналіз, перевірка рівня знань, класифікація тестованих за рівнем знань, перевірка гіпотез, критеріально-орієнтований тест.

НОМЕНКЛАТУРА

ОТ – обчислювальна технологія;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

d_h – число невірно виконаних завдань серед h перевірених;

h – кількості питань у виборці;

H_i – гіпотеза щодо віднесення об'єкта навчання до i -го класу навченості;

$L(p)$ – оперативна характеристика статистичного критерію;

n – загальна кількість тестових питань;

p_i – ймовірність невиконання завдань для i рівня навчальних досягнень, $i = \overline{1, 4}$;

$f(d)$ – функція щільності розподілу неправильних відповідей;

$f(Q)$ – функція оцінювання знань;

μ_1 – математичне очікування числа правильно виконаних завдань для неатестованих об'єктів навчання, що відповідає гіпотезі A_1 – об'єкт навчання не володіє достатніми знаннями та не атестується;

μ_2 – математичне очікування числа правильно виконаних завдань для атестованих об'єктів навчання, що відповідає гіпотезі A_2 – об'єкт навчання володіє достатніми знаннями та атестується позитивно;

σ^2 – дисперсія випадкової величини X коректно виконаних завдань для атестованих та неатестованих об'єктів навчання;

X_0 – допустиме (прийнятне) число коректно виконаних завдань;

Pa_i – приймальна доля невірно виконаних завдань для i -ї класифікації;

Pr_i – неприймальна доля невірно виконаних завдань для i -ї класифікації;

g_i – i -та група із h завдань;

a_h – прийнятне число невірно виконаних завдань для певного класу;

r_h – неприйнятне число невірно виконаних завдань для певного класу;

$a_i(h)$ – пороги прийняття гіпотези щодо зарахування об'єкта навчання до одного з чотирьох класів навченості, $i = \overline{1, 3}$;

$r_i(h)$ – пороги неприйняття гіпотези щодо зарахування об'єкта навчання до одного з чотирьох класів навченості, $i = \overline{1, 3}$;

m – номер питання;

L – вага відповіді: $L = 0$ – вірна відповідь, $L = 1$ – невірна відповідь;

q – стандарт оцінювання;

$n_{\text{ср max}}$ – максимальний обсяг завдань, відповіді на які необхідно перевірити;

$P_n(d)$ – ймовірність появи d невірних відповідей з перевірених n -завдань;

α – ймовірність помилки 1-го роду, ймовірність неприйняття головної гіпотези, якщо доля невірних відповідей менша за критеріальну;

β – ймовірність помилки 2-го роду, ймовірність прийняття головної гіпотези, якщо доля невірних відповідей більша за критеріальну;

C – приймальне число невірних відповідей для заданої класифікації;

C_{ij} – ваги прийняття рішень, $i = \overline{1,2}$; $j = \overline{1,2}$.

ВСТУП

Тест, як інструмент стандартизованої процедури проведення і задалегідь спроектованої технології обробки та аналізу результатів, є зручним засобом вимірювання навчальних досягнень. Тестування як форма контролю навчальних досягнень студентів в останні роки все частіше стала застосовуватися в системі вищої, професійної освіти, оскільки є технологією, що дозволяє об'єктивно і швидко оцінити рівень досягнень кожного студента.

За цілями застосування педагогічні тести поділяються на два класи – нормативно-орієнтовані і критеріально-орієнтовані. Нормативно-орієнтований тест (norm-referenced test) дозволяє ранжувати випробовуваних за рівнем знань. Критеріально-орієнтований тест (criterion-referenced test) дозволяє виявити рівень засвоєння випробовуваним певного розділу в заданій предметній галузі. Зазвичай тестовий бал відображає частку правильних виконаних завдань і виражається у відсотках. При використанні критеріально-орієнтованого підходу особлива увага приділяється методиці оптимального вибору критеріального балу (або балів). Саме при критеріально-орієнтованому тестуванні задача перевірки знань розглядається як задача підтримки прийняття рішень та класифікації тестованих за рівнем їх підготовки.

Рішення цієї задачі забезпечує необхідну об'єктивність при оцінці та контролі знань, можливість мінімізації об'єму завдань, який повинен вирішити опитуваний. Метою роботи є розробка обчислювальної процедури вирішення чотирьохальтернативної задачі класифікації тестованих за рівнем навченості, що дозволяє здійснювати контроль знань диференційовано, мінімізує об'єм завдань, необхідний для виконання.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На основі проведених досліджень, результати яких наведено в роботі [1], для вирішення задачі прийняття рішень щодо класифікації об'єктів навчання під час тестування обрано метод послідовного аналізу, оскільки його застосування дозволяє підвищити ефективність процесу перевірки знань за рахунок мінімізації часових витрат на його проведення.

На сьогодні для процесу ідентифікації рівня знань учасників навчального процесу з використанням методу послідовного аналізу розроблено обчислювальні процедури перевірки двохальтернативних випадків, наприклад, класифікації об'єктів навчання на дві групи: атестовані та неатестовані. Постає задача розробки алгоритму класифікації тестованих відносно декількох гіпотез. Правильним прийняття рішень є формування границь, за допомогою яких здійснюється класифікація тестованих на чотири групи (I група – «високий» рівень навченості, II – «достатній», III – «середній», IV – «початковий»).

Дано відповіді $(x_1, \dots, x_h)$ на h запитань із загальної кількості завдань n . Припустимо, що $x_i = 0$, якщо завдання виконано вірно, $x_i = 1$, якщо завдання виконано невірно. Нехай p_i визначає відносне число невиконаних завдань. Для процесу перевірки відповідей на тестові питання під час контролю знань постає задача перевірки гіпотези про те, що p_i на деякому діапазоні h виконаних завдань із загальної кількості завдань не перевищує деякої заданої величини p'_i . Таким чином, задачу оцінки навчальних досягнень необхідно вирішити шляхом послідовної перевірки гіпотез $p_i \leq p'_i$ проти гіпотез $p_i > p'_i$, де $i = \overline{1,4}$ – номер класу навченості.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Задача обробки даних педагогічного тестування та контролю знань за критеріально-орієнтованою методикою в роботах [2–5] розглядається як задача підтримки прийняття рішень при класифікації об'єктів навчання (тестованих) за рівнем підготовки, для вирішення якої використовуються методи теорії статистичних рішень (критерій Байеса, Неймана-Пірсона, мінімакса, Вальда). Застосування даних методів спрямоване на створення систем статистичного контролю знань за альтернативною ознакою.

При тестуванні за альтернативною ознакою використовується замкнута форма тесту, характеристиками якої є: функція щільності розподілу неправильних відповідей – $f(d)$, прийнятний рівень неправильних відповідей – p_0 , неприйнятний рівень неправильних відповідей – p_1 , ризик «заниженої» оцінки знань – α , ризик «завищеної» оцінки знань – β , функція оцінювання знань – $f(Q)$, обсяг освітньої інформації – N , обсяг вибірки завдань тесту – n та критерій прийняття розв'язків у вигляді граничного числа неправильних відповідей – X .

У роботі [2] запропоновано правило прийняття рішень, яке визначає допустиме (прийнятне) число коректно виконаних завдань X_0 (границя прийняття рішень) на основі критерію Байеса та поділяє всіх тестованих на дві групи: атестовані та неатестовані. Умовні щільності ймовірності випадкової величини X коректно виконаних завдань для атестованих та неатестованих об'єктів навчання подаються у вигляді гаусовських законів розподілення:

$$f(X/\mu_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(X - \mu_i)^2}{2\sigma^2}\right\}, i = 1, 2.$$

Стратегія прийняття рішень відносно границі X_0 має чотири результати: вірна гіпотеза A_1 та приймається рішення про A_1 ; вірна гіпотеза A_1 , а приймається рішення про A_2 ; вірна гіпотеза A_2 та приймається рішення про A_2 ; вірна гіпотеза A_2 , а приймається рішення про A_1 .

Перший та третій результат є правильними рішеннями, другий та четвертий – помилковими.

Байєсовський критерій базується на двох припущеннях: апіорні ймовірності гіпотез P_1 та P_2 задані та $P_1 + P_2 = 1$; задані ваги чотирьох зазначених дій: C_{11} , C_{12} , C_{22} , C_{21} . Слідуючи правилам прийняття рішень для вибору або A_1 , або A_2 , простір спостережень N ділиться на дві

частини N_1 та N_2 . Якщо результат тестування потрапляє в N_1 , то приймається гіпотеза A_1 , якщо в N_2 – A_2 .

Байєсовський критерій будує рішення так, щоб у середньому втрати та ризику були мінімальними. Значення величини очікуваного ризику подається виразом:

$$R = P_1 C_{21} + P_2 C_{22} + \int_{N_1} \{ [P_2 (C_{12} - C_{22}) f_2(X/\mu_2)] - [P_1 (C_{21} - C_{11}) f_1(X/\mu_1)] \} dx.$$

Щоб мінімізувати ризик R за умови, що другий член підінтегрального виразу більший, ніж перший (значення вірних відповідей менше значення невірних), необхідно всі значення X включати до N_1 та навпаки. Таким чином, області рішень N_1 та N_2 , які відповідають гіпотезам A_1 та A_2 визначаються за наступних умов:

$$\text{якщо } P_2 (C_{12} - C_{22}) f_2\left(\frac{X}{\mu_2}\right) \geq P_1 (C_{21} - C_{11}) f_1\left(\frac{X}{\mu_1}\right), \quad (1)$$

то X відноситься до N_2 – приймається рішення щодо істинності гіпотези A_2 , та навпаки.

Вираз 1 подається у вигляді нерівності двох відношень:

$$\frac{f_2(X/\mu_2)^{A_2}}{f_1(X/\mu_1)} > \frac{P_1 (C_{21} - C_{11})}{A_1 P_2 (C_{12} - C_{22})}.$$

Ліва частина називається відношенням правдоподібності і визначається $\Lambda(x)$. Права частина називається границею прийняття рішення й визначається η та є const, оскільки залежить від апіорних параметрів задачі. Таким чином, Байєсовський критерій зводиться до критерію відношення правдоподібності, записується у вигляді нерівності $\Lambda(x)^{A_2} > A_1 \eta$ та трактується наступним чином: якщо величина відношення правдоподібності для двох гіпотез більше границі прийняття рішень, то приймається гіпотеза A_2 , якщо менше, то – A_1 .

Мінімаксий критерій використовується при відсутності інформації щодо значення апіорних ймовірностей гіпотез A_1 та A_2 – P_1 та P_2 відповідно. Якщо не визначені апіорні ймовірності гіпотез P_1 та P_2 і не задані ваги прийняття рішень C_{ij} , то для рішення задачі використовують критерій Неймана-Пірсона та значення ймовірностей помилок першого та другого роду.

Алгоритми прийняття рішень на основі критеріїв Байєса, Неймана-Пірсона та мінімаксу щодо класифікації об'єктів навчання передбачають, що N завдань, які видаються для об'єктів навчання, та X – число вірно виконаних завдань фіксовані. Якщо кількість вірно виконаних завдань не фіксовано, то прийняття рішень щодо класифікації тестованих, не перевіряючи всіх завдань, здійснюється на основі послідовного аналізу відповідей з використанням критерію Вальда.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

На основі методів, поданих у роботах [2, 6, 7], розроблено алгоритм для чотирьохальтернативної задачі класифікації учасників навчального процесу. Пропонується класифікувати об'єкти навчання за рівнем знань: I клас – об'єкти навчання, які володіють «високим» рівнем знань (A, від 90 до 100 балів); II клас – «достатнім»

(BC від 65 до 89 балів); III клас – «середнім» (DE від 50 до 64 балів); IV клас – «початковим» (F, FX від 1 до 49 балів).

Сутність класифікації полягає в розбитті інтервалу тестових завдань N на чотири області: N_1, N_2, N_3, N_4 . Якщо число невірних виконаних завдань d_h потрапило в область N_1 , то приймається гіпотеза H_1 – об'єкт навчання має «високий» рівень знань; якщо в N_2 , то приймається гіпотеза H_2 (відповідає «достатньому» рівню знань); якщо в N_3 – гіпотеза H_3 (відповідає «середньому» рівню знань); інакше – приймається гіпотеза H_4 (відповідає «початковому» рівню знань).

Розроблений алгоритм базується на використанні дво-хальтернативного критерію послідовного аналізу в декілька етапів. Якщо p_i визначає відносне число невиконаних завдань на деякому діапазоні h , то ймовірність отримання вибірки $(x_i, \dots, x_h)$ обчислюється за формулою:

$$p_h = p^{d_h} (1-p)^{h-d_h}. \quad (3)$$

На першому етапі рішення задачі визначимо гіпотези оцінки рівня навчальних досягнень тестованих. Оскільки ймовірність невиконання завдань p_i є випадковою величиною, то приймаємо наступні гіпотези: H_1 : якщо ймовірність невиконання завдання дорівнює p_1 ($p = p_1$) і тестований зараховується до класу I; H_2 : якщо ймовірність невиконання завдання дорівнює p_2 ($p = p_2$) і тестований зараховується до класу II; H_3 : якщо ймовірність невиконання завдання дорівнює p_3 ($p = p_3$) і тестований зараховується до класу III; H_4 : якщо ймовірність невиконання завдання дорівнює p_4 ($p = p_3$) і тестований зараховується до класу IV.

Допустима доля невірних відповідей для кожного класу p_i встановлюється на основі попередніх досліджень перевірки знань у контрольній групі або виходячи з ефективності контролю. При цьому перевірка здійснюється наступним чином. Із загальної кількості n завдань вибирається група g_1 , яка містить h завдань.

Перевірка закінчується прийняттям гіпотези про атестацію тестованого, якщо в групі g_1 для відповідного класу виконується умова: $a_h \geq d_h$. Перевірка закінчується прийняттям гіпотези про неатестацію тестованого, якщо в групі g_1 для відповідного класу виконується умова:

$r_h \leq d_h$. Якщо $a_h < d_h < r_h$, обирається друга група g_2 , яка містить наступні h завдань. Знову тестований атестується позитивно, якщо загальне число невиконаних завдань у двох групах d_{2h} менше або дорівнює a_{2h} ; тестований неатестується, якщо $d_{2h} \geq r_{2h}$ та береться третя група g_3 із h запитань, якщо $a_{2h} < d_{2h} < r_{2h}$. Процес продовжується, поки тестований буде атестований або неатестований. Таким чином, коли спостереження проводяться над групами по h завдань, число визначених невірних виконаних завдань d_m порівнюється з відповідним приймальним числом a_m , або неприймальним числом r_m тільки при $m = h, 2h, 3h, \dots, n$.

Блок-схему ОТ перевірки рівня знань на основі методу послідовного аналізу наведено на рис. 1.

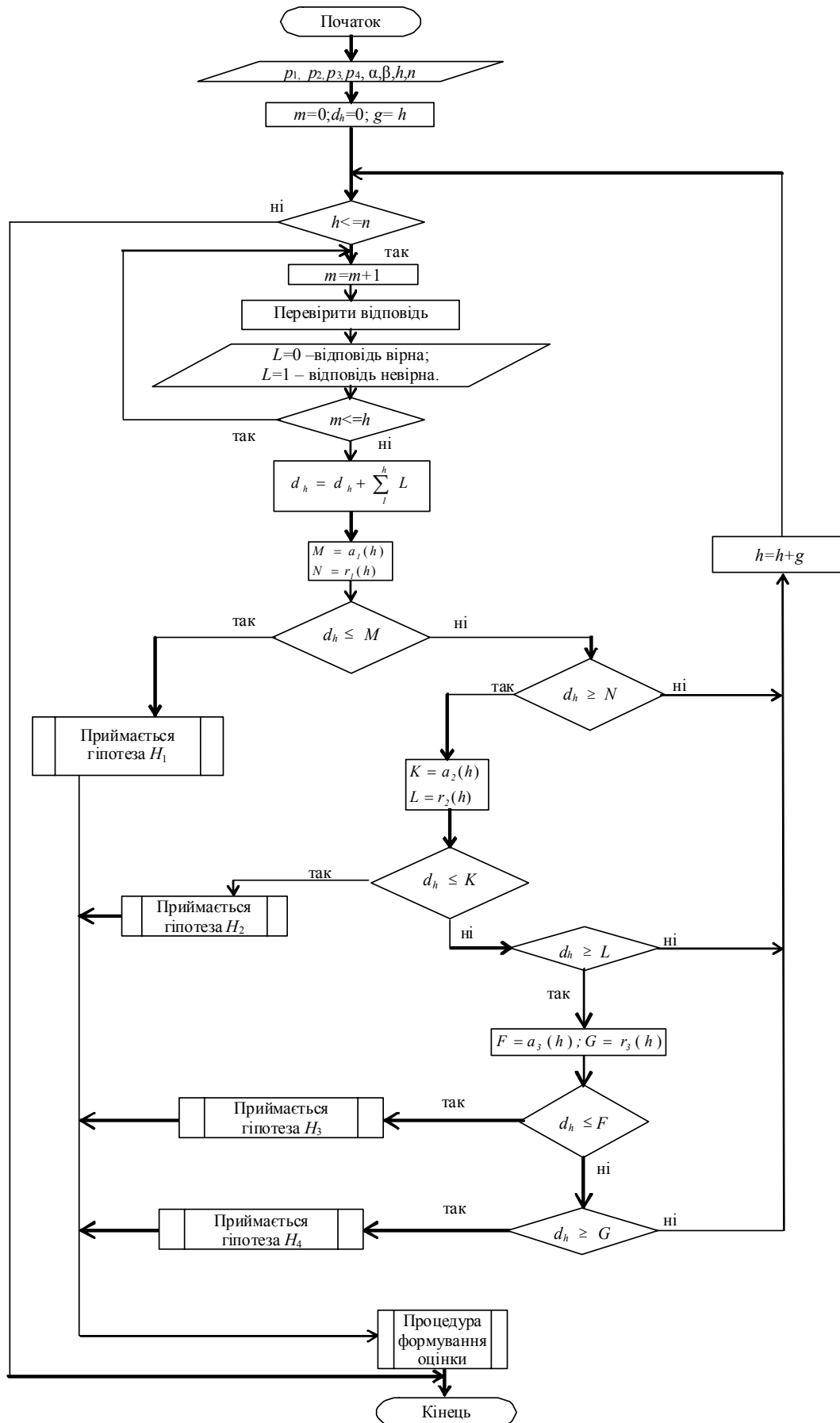


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму ОТ перевірки рівня знань на основі методу послідовного аналізу

Алгоритм ОТ передбачає виконання наступних етапів:

Етап 1. Уведення меж розбивки вихідного параметра – ймовірностей $p_i, i = \overline{1,4}$ невиконання завдань для кожного рівня навчальних досягнень.

Етап 2. Введення α, β, n, h .

Етап 3. Цикл за всіма діапазонами. Визначається на поточному діапазоні виконаних завдань h значення вихідного параметру d_h . Послідовно в поточному діапазоні обчислюються пороги прийняття $a_i(h), i = \overline{1,3}$ або неприйняття $r_i(h), i = \overline{1,3}$ гіпотези щодо зарахування об'єкта навчання до одного з чотирьох класів навченості за формулами:

$$a_i(h) = \frac{\ln \frac{\beta}{1-\alpha}}{\ln \frac{p_{r_i}}{p_{a_i}} - \ln \frac{1-p_{r_i}}{1-p_{a_i}}} + \frac{h \cdot \ln \frac{1-p_{a_i}}{1-p_{r_i}}}{\ln \frac{p_{r_i}}{p_{a_i}} - \ln \frac{1-p_{r_i}}{1-p_{a_i}}};$$

$$r_i(h) = \frac{\ln \frac{1-\beta}{\alpha}}{\ln \frac{p_{r_i}}{p_{a_i}} - \ln \frac{1-p_{r_i}}{1-p_{a_i}}} + \frac{h \cdot \ln \frac{1-p_{a_i}}{1-p_{r_i}}}{\ln \frac{p_{r_i}}{p_{a_i}} - \ln \frac{1-p_{r_i}}{1-p_{a_i}}}, i = \overline{1,3}.$$

Етап 4. Перевіряється, в яку область попадає значення d_h . Якщо значення d_h не попадає в границі відповідної області, здійснюється перехід до наступного діапазону питань $g_i(x_{h+1}, \dots, x_{ih})$ де $i = 2, \dots$. Якщо $h = n$, а рішення ще не прийнято, відбувається усічення послідовного критерію з використанням наступного правила: у випадку коли $d_h \geq (a_i(h) + r_i(h))/2$ приймається рішення щодо перевірки гіпотез $H_{i+1}, \dots, H_4$, а при $d_h < (a_i(h) + r_i(h))/2$, приймається гіпотеза H_i , тестування завершується.

Для визначення ймовірності невиконання завдань $p_i, i = \overline{1,4}$ необхідно здійснити вибір стандарту оцінювання q_i . Методи вибору тестового стандарту засновані на експертних оцінках змісту тестового завдання. На основі дослідження даних методів, описаних у роботах [8–10], обрано метод Ангофф, який заснований на послідовних експертних оцінках змісту тестових завдань. Спочатку виконується вибір стандарту оцінювання для IV класу. Експерт-викладач для кожного завдання тесту встановлює ймовірність того, що мінімально компетентний студент дасть на нього вірну відповідь. Для однозначності експерту (або групі експертів) пропонується обрати значення ймовірності P_i зі значень 0,9, 0,8, ..., 0,1. Визначивши суму значень даних ймовірностей отримаємо критеріальний бал: $K = \sum_{i=1}^n P_i$. Стандарт оцінювання виз-

начається за формулою: $q = \frac{K}{n}$.

Тоді ймовірність невиконання завдань $p = 1 - q$. Після вибору критеріального балу для «початкового» рівня навченості, експерт проводить оцінку кожного тестового завдання вже на більш високий стандарт «середній», «достатній» та «високий».

Процедура контролю знань потребує вирішення задачі оцінки придатності тесту, що полягає у виборі таких критеріїв класифікації ($\alpha, \beta, p_i, i = \overline{1,4}$), які б зробили помилки першого та другого роду мало ймовірними та забезпечили визначення обсягу завдань достатнього для досягнення бажаного рівня якості тесту (ймовірність віднесення об'єктів навчання, які мають індивідуальний бал вищий або нижчий критеріального на величину не більше 10%, до певного класу навченості не повинна бути меншою за 0,8). Для розв'язку даної задачі використовується метод, що базується на побудові функції оперативної характеристики послідовного критерію відношення ймовірностей, яка дозволяє встановити зв'язок між очікуваною ймовірністю прийняття гіпотези та випадковим значенням параметра ймовірності появи у виборці з 1, 2, ... питань приймального числа невірних виконаних завдань:

$$L(p) = P_0 + P_1 + \dots + P_C = \sum_{d=0}^C P_n(d). \quad (4)$$

Якість обраних критеріїв класифікації визначається рівняннями: $L(p) \geq 1 - \alpha$, якщо $p = p_{a_i}$; $L(p) \leq \beta$, якщо $p = p_{r_i}$. Значення оперативної характеристики статистичного критерію для кожного класу обчислюється за формулою:

$$L(p) \approx ([(1-\beta)/\alpha]^l - 1) / ([(1-\beta)/\alpha]^l - [\beta/(1-\alpha)]^l),$$

де параметр l змінюється від $-\infty$ до $+\infty$ та визначається із рівняння:

$$p_i = \left[1 - \left((1-p_{r_i}) / (1-p_{a_i}) \right)^l \right] / \left[(p_{r_i}/p_{a_i})^{l-1} - \left((1-p_{r_i}) / (1-p_{a_i}) \right)^l \right], i = \overline{1,3}.$$

Максимальний обсяг завдань, відповіді на які необхідно перевірити для прийняття рішень щодо наявності відповідної гіпотези H_1, H_2, H_3 , пропонується обчислювати за формулою:

$$n_{\text{ср max}} = \sum_{i=1}^3 \left[- \left(\ln \frac{\beta}{1-\alpha} \right) \cdot \left(\ln \frac{1-\beta}{\alpha} \right) \right] / \left[3 \cdot \ln \frac{p_{r_i}}{p_{a_i}} \cdot \ln \frac{1-p_{a_i}}{1-p_{r_i}} \right].$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для проведення експерименту необхідно виділити контрольну групу студентів та з використанням СППР «ManageEdu» [11] або власноруч розробленого програмного продукту, який реалізовуватиме запропонований алгоритм класифікації тестованих, провести підсумковий контроль знань з будь-якої дисципліни за традиційною методикою та з використанням запропонованої обчислювальної технології перевірки рівня знань на ос-

нові методи послідовного аналізу. Програмний додаток повинен реалізовувати наступні функції: розраховувати ймовірнісні характеристики можливого віднесення тестованого до того чи іншого класу навченості ($p_1, p_2, p_3, p_4, \alpha, \beta, n, h$), формувати границі прийняття рішень для чотирьох гіпотез, для перевірки якості обраних параметрів будувати оперативні характеристики послідовного критерію для гіпотез H_1, H_2, H_3 , проведення контролю знань з використанням запропонованої ОТ та стандартним методом.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для проведення експерименту було задіяно контрольну групу студентів (23 чоловіка) ВНЗ «Міжнародний технологічний університет «Миколаївська політехніка» III курсу економічного факультету з дисципліни «Фінансовий облік».

З використанням модуля «Последовательный анализ» СППР «ManageEdu» були сформовані ймовірнісні характеристики можливого віднесення тестованого до того чи іншого класу навченості: $p_1=0,1$; $p_2=0,35$; $p_3=0,6$; $p_4=0,75$; $\alpha=0,05$; $\beta=0,01$; $n=100$; $h=10$.

Значення параметрів границь прийняття рішень, сформовані на основі запропонованого алгоритму, наведено на рис. 2. в табличному та графічному вигляді.

Для перевірки якості обраних параметрів побудовано оперативні характеристики послідовного критерію для гіпотез H_1, H_2, H_3 . Аналіз графіка оперативної характеристики $L(p)$ для гіпотези H_1 підтверджує оптимальність обраних α, β , приймального числа p_1 та неприймального числа p_2 : очікуваний відсоток студентів, які будуть атестовані «на відмінно» при 10–16% невірних відповідей з масиву тестових завдань складає 80%, $L(p) > 80\%$. Оптимальна кількість завдань для даної класифікації – 24.

Для даного тесту середній обсяг завдань, який є достатнім для досягнення бажаного рівня якості процедури

$$\text{тестування, складає } n_{\text{ср}} = \frac{(n_{\text{срI}} + n_{\text{срII}} + n_{\text{срIII}})}{3} = 45.$$

Якщо при постійній кількості завдань збільшувати приймальне число відповідей, то контроль буде менш «жорстким» – збільшуються ймовірності атестації об'єктів навчання за відповідними рівнями навченості. Та навпаки: якщо при постійному значенні приймального числа збільшувати кількість завдань, – контроль буде більш «жорстким».

Після збереження отриманих значень вихідних параметрів процедури послідовного аналізу в діалоговому вікні налаштування параметрів теми на стороні клієнтської частини програмного комплексу відбувається процес контролю знань.

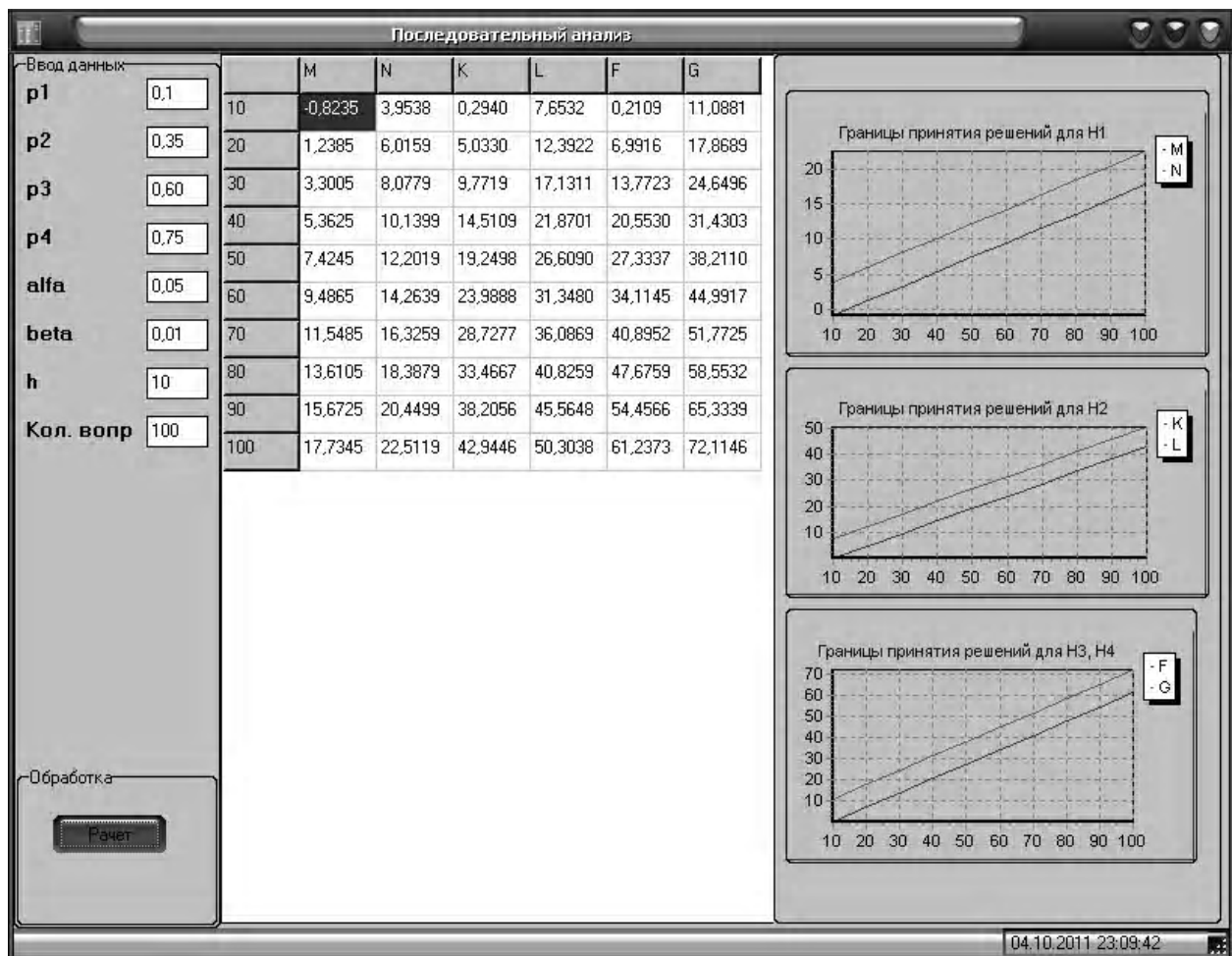


Рисунок 2 – Діалогове вікно формування границь прийняття рішень

На рис. 3. наведено приклад вирішення задачі тестування на основі процедури послідовного аналізу для одного об'єкта навчання.

Таким чином, якщо тестований з десяти завдань отриманих на першому етапі тестування виконав вірно підряд вісім, то згідно з правилами прийняття рішень йому буде видана наступна вибірка з десяти питань та продовжена перевірка гіпотези H_1 . Після перевірки гіпотези H_1 , буде прийняте рішення про перевірку гіпотези H_2 , відповідно до якої студент отримає наступні десять завдань, оскільки $K < d_h < L$. Після виконання 30 завдань приймається рішення щодо прийняття гіпотези H_2 при $d_h = 7$ та зарахування студента до класу II, оскільки $d_h \leq K$. Тестований отримає оцінку «BC» за системою ECTS або «4» за 5-ти бальною системою.

6 ОБГОВОРЕННЯ

В порівнянні з двоохальтернативною класифікацією тестованих на дві групи: «атестовані» та «неатестовані», представленою в роботі [1], запропонована чотирьохальтернативна класифікація дозволяє здійснювати оцінку навчальних досягнень диференційовано, є адаптованою для автоматизованого контролю знань у вищих закладах освіти.

На рис. 4. зображено розподіл студентів за класами навченості за результатами перевірки знань з використанням ОТ послідовного аналізу та стандартного режимів тестування.

Оцінка якості класифікації виконується шляхом визначення наскільки тісно розташовані об'єкти в класах у порівнянні з розташуванням об'єктів у всій групі для стандартного та адаптивного режимів перевірки. Для IV класу

(«початковий» рівень навченості) відхилення результатів «адаптивного» режиму тестування від стандартного складає +4%, для III – –4%, для II та I – 0%. Отже, класифікації рівнозначні, при цьому для стандартного режиму тестування середня кількість завдань, яку виконує кожний студент дорівнює «50», а для адаптивного – «30».

Запропонована обчислювальна технологія дає можливість системі тестування приймати рішення щодо класифікації поведінки студента, не перевіряючи всі n завдань, що скорочує число завдань, які необхідно перевірити, та забезпечує індивідуальну мінімізацію часу навчання.

Додатковими умовами забезпечення високої ефективності застосування запропонованої технології контролю знань є:

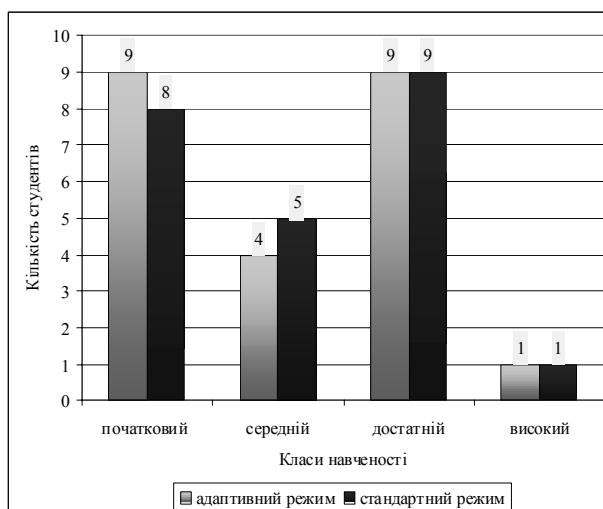
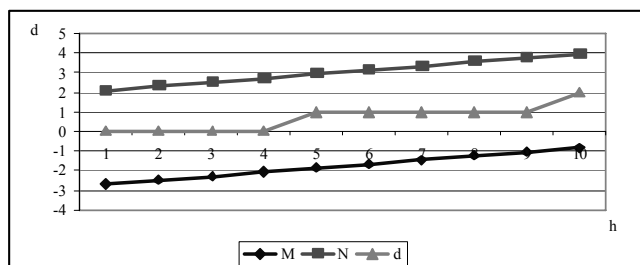
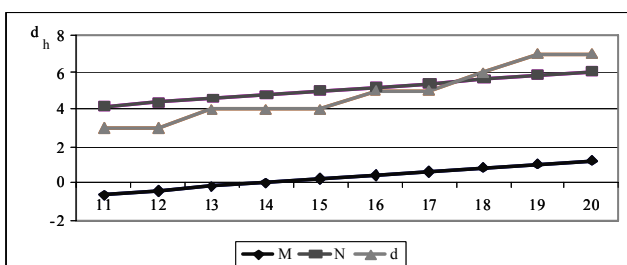


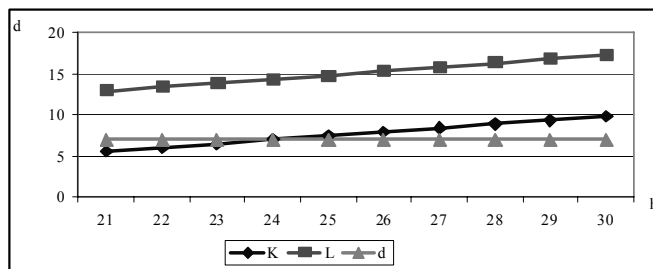
Рисунок 4 – Розподіл студентів за класами навченості на основі ОТ послідовного аналізу та стандартного режиму тестування



а



б



в

$$d_h = (000011111233444556777777777777)^T$$

$$h = (1234567891011121314151617181920212223242526272829,30)^T$$

Рисунок 3 – Графіки границь прийняття рішень:

а – відносно гіпотези H_1 при $h = 10$; б – відносно гіпотези H_1 при $h = 20$; в – відносно гіпотези H_2 при $h = 30$

1. Вимога підвищення якості тестових завдань, основними показниками якої є валідність і надійність тестів. Дані показники характеризують, відповідно, стабільність отриманих результатів тестування і їх здатність правильно відображати рівень підготовки.

2. Можливість у процесі тестування не тільки визначення рівня навченості слухачів, але й швидкого відновлення знань шляхом перегляду правильної відповіді і отримання (при необхідності) іншої додаткової дидактичної інформації з предмета.

ВИСНОВКИ

В роботі розглянуто задачу оцінки знань тестованих як задачу їх класифікації за рівнем знань, умінь та навичок, для рішення якої використано послідовну процедуру перевірки гіпотез і правила прийняття рішень на основі критерію Вальда. Розроблено обчислювальну процедуру класифікації тестованих на чотири класи, які відповідають рівням навченості: «початковий», «середній», «достатній», «високий».

Проаналізовані обчислювальні технології підтримки прийняття рішень під час контролю знань об'єктів навчання, які базуються на методах теорії статистичних рішень. Обґрунтовано вибір методу послідовного аналізу для оцінки рівня знань у комп'ютерній системі підтримки навчальної діяльності.

Досягнуто підвищення ефективності процесу підтримки прийняття рішень під час статистичного контролю знань за рахунок удосконалення методу послідовного аналізу відповідей шляхом класифікації учасників навчального процесу на чотири групи, які відповідають рівням навченості, що забезпечило індивідуальну мінімізацію часу перевірки знань та дозволило виконати диференційовану оцінку їхнього обсягу в задачах контролю за альтернативною ознакою.

Здійснено апробацію процедури підтримки прийняття рішень на основі методу послідовного аналізу з використанням СППР «ManageEdu», в результаті чого сформовані результуючі оцінки навчальних досягнень студентів III курсу ВНЗ МТУ «Миколаївська політехніка» економічного факультету з дисципліни «Фінансовий облік» та здійснено їх класифікацію за групами, які відповідають рівням навченості. За підсумками оцінки відхилення результатів адаптивного режиму тестування від стандартного підтверджено достатню якість запропонованої класифікації.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на розробку методики встановлення стандарту оцінювання кваліфікації (ймовірності вірно виконаних завдань для кожного класу), методика оцінки рівня помилок цього критерію, застосування запропонованої обчислюваль-

ної технології для вирішення практичних задач контролю рівня знань в системах тестування.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри комп'ютерної інженерії й кафедри комп'ютерних наук та прикладної математики Миколаївського національного університету ім. В. О. Сухомлинського. Результати досліджень здійснювались у рамках науко-дослідної роботи за темою: «Моделі та методи інтелектуального аналізу даних в предметно-орієнтованій інформаційній системі» (номер реєстрації 0115U001249).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кузьма К. Т. Інформаційні технології контролю та оцінки знань / К. Т. Кузьма // Труды IX Міжнародної наук.-практ. конференції студентів та молодих учених «Політ». – К. : Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друку», 2009. – С. 221.
2. Васильев В. И. Основы культуры адаптивного тестирования / В. И. Васильев, Т. Н. Тягунова. – М. : Издательство ИКАР, 2003. – 584 с.
3. Galeev I. A Learning Model in MONAP / I. Galeev, V. Ivanov, M. Akhmadullin // Human-Computer Interaction. The 6th International Conference. EWHCI'96. Moscow, 1996. – P. 320–323.
4. Автоматизация контроля обученности в процессе подготовки специалистов для систем безопасности / [А. Н. Членов, И. Г. Дровникова, Т. А. Буцынская, П. А. Орлов] // Научный информационный сборник «Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций». – М. : Винити, 2009. – № 4. – С. 107–116.
5. Переверзев В. Ю. Критериально-ориентированные педагогические тесты для итоговой аттестации студентов / В. Ю. Переверзев. – М. : НМЦ СПО Минобразования РФ, 1999. – 152 с.
6. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М. : Физматгиз, 1960. – 328 с.
7. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. В трех книгах. Книга вторая / Б. Р. Левин. – М. : Сов. радио, 1975. – 392 с.
8. Люсин Д. В. Основы разработки и применения критериально-ориентированных педагогических тестов / Д. В. Люсин. – М. : Исследовательский центр, 1993. – 51 с.
9. Angoff W. H. Scales, norms, and equivalent scores / W. H. Angoff. – Princeton, NJ: ETS, 1984. – P. 153. – URL: <http://www.ets.org/Media/Research/pdf/Angoff.Scales.Norms.Equiv.Scores.pdf>.
10. Kaftandjieva F. Methods for Setting Cut Scores in Criterion-referenced Achievement Tests / F. Kaftandjieva. – Cito, Arnhem: EALTA, 2010. – P. 170. – URL: http://www.ealta.eu.org/documents/resources/FK_second_doctorate.pdf.
11. А. с. 39905 України Комп'ютерна програма підтримки навчальної діяльності студентів «ManageEdu» / Кузьма К. Т., Байбуз О. Г. – № 40241; заявл. 30.06.2011; опуб. 01.09.2011.

Стаття надійшла до редакції 16.12.2017.

Після доробки 22.02.2017.

Кузьма К. Т.

Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерной инженерии, Николаевский национальный университет им. В. А. Сухомлинского, Николаев, Украина

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВЕРКИ УРОВНЯ ЗНАНИЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА

Актуальность. Решена актуальная задача повышения эффективности процесса поддержки принятия решений при статистическом контроле знаний.

Цель работы – разработка вычислительной процедуры решения четырехальтернативной задачи классификации тестируемых по уровню обученности, что позволяет осуществлять контроль знаний дифференцированно, минимизирует объем задач, необходимый для выполнения.

Метод. Предложено вычислительную процедуру классификации тестируемых на четыре класса, которые соответствуют уровням обученности: «начальный», «средний», «достаточный», «высокий», основанную на использовании двухальтернативного критерия последовательного анализа в несколько этапов и обеспечивающую выполнение контроля знаний в процессе выполнения заданий, минимизируя таким образом время проверки знаний, что позволяет автоматизировать процесс проверки статистических гипотез в системах тестирования и обучения с целью дифференциальной оценки знаний участников учебного процесса. Для решения задачи оценки пригодности теста предложен метод, основанный на построении функции оперативной характеристики последовательного критерия, которая позволяет определить объем задач достаточный для достижения желаемого уровня качества теста за счет установления связи между ожидаемой вероятностью принятия гипотезы и случайным значением параметра вероятности появления в выборке из 1,2 ... n вопросов приемочного числа неверно выполненных заданий.

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную вычислительную процедуру, использованное при проведении вычислительных экспериментов тестового контроля знаний.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенной процедуры и программного обеспечения, которое ее реализует, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач автоматизированной проверки уровня знаний.

Ключевые слова: последовательный анализ, проверка уровня знаний, классификация тестируемых по уровню знаний, проверка гипотез, критериально-ориентированный тест.

Kuzma K. T.

Ph.D., Senior Lecturer of Department of Computer Engineering, V. O. Sukhomlynsky Mykolaiv National University, Mykolaiv, Ukraine

COMPUTER TECHNOLOGIES OF VERIFICATION OF KNOWLEDGE BASED ON THE METHOD OF SEQUENTIAL ANALYSIS
Context. The actual task of increasing the effectiveness of decision support in the statistical control of knowledge has been solved.

Objective is a development of a computational procedure for solving the problem of classification the educational process participants into four groups, according to their trainability level that allows to control knowledge differently, minimizing the amount of tasks required to accomplished.

Method. The computer technology for classification the educational process participants into four groups, according to their trainability level: "initial", "medium", "sufficiently", "high", has been proposed, based on the use of sequential hypothesis testing procedure and allows to perform the controlling of the knowledge while accomplishing tasks, thus minimizing the time for testing and provides the automation of the process of verification the statistical hypotheses in a testing and learning systems with the purpose of differential assessment of knowledge the educational process participants. To solve the problem of definition the assessment standard the method based on creation the function of operational characteristics of sequential criteria is used. The function allows to establish a link between the expected probability of the hypothesis and random probability of the fact of presence in the sample with 1.2 ... n questions appropriate number of incorrect answers.

Results. The software implementing proposed computational procedure have been developed and used in computational experiments of knowledge testing.

Conclusions. The experiments confirmed the efficiency of the proposed procedure and software. The experiments also allow to recommend them for use in practice to solve the problems of automated assessment of knowledge.

Keywords: sequential analysis, the assessment of knowledge, classification the educational process participants according to their trainability level, testing of hypotheses, criterion-referenced test.

REFERENCES

1. Kuz'ma K.T. Informacijni tehnologii kontrolju ta ocinki znan', *Trudi IX Mizhnarodnoï nauk.-prakt. konferencii studentiv ta molodih uchenih «Polit»*. Kyiv, Vid-vo Nac. aviac. un-tu «NAU-druk», 2009. – S. 221.
2. Vasil'ev V. I., Tjagunova T. N. Osnovy kul'tury adaptivnogo testirovaniya. Moscow: Izdatel'stvo IKAR, 2003, 584 p.
3. Galeev I., Ivanov V., Akhmadullin M. A Learning Model in MONAP, *Human-Computer Interaction. The 6th International Conference, EWHCI'96*. Moscow, 1996, pp. 320–323.
4. Chlenov A.N., Drovnikova I.G., Bucynskaja T.A., Orlov P.A. Avtomatizacija kontrolja obuchennosti v processe podgotovki specialistov dlja sistem bezopasnosti, *Nauchnyj informacionnyj sbornik «Problemy bezopasnosti i chrezvychajnyh situacij»*. Moscow, Viniti, 2009. No. 4, pp. 107–116.
5. Pereverzev V. Ju. Kriterial'no-orientirovannye pedagogicheskie testy dlja itogovoj attestacii studentov. Moscow, NMC SPO Minobrazovaniya RF, 1999, 152 p.
6. Val'd A. Posledovatel'nyj analiz. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 328 p.
7. Levin B. R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. V treh knigah. Kniga vtoraja. Moscow, Sov. radio, 1975, 392 p.
8. Ljusin D.V. Osnovy razrabotki i primeneniya kriterial'no-orientirovannyh pedagogicheskikh testov. Moscow, Issledovatel'skij centr, 1993, 51 p.
9. Angoff W. H. Scales, norms, and equivalent scores. Princeton, NJ, ETS, 1984, P. 153. URL: <http://www.ets.org/Media/Research/pdf/Angoff.Scales.Norms.Equiv.Scores.pdf>.
10. Kaftandjieva F. Methods for Setting Cut Scores in Criterion-referenced Achievement Tests. Cito, Arnhem: EALTA, 2010, P. 170. URL: http://www.ealta.eu.org/documents/resources/FK_second_doctorate.pdf.
11. Kuz'ma K. T., Bajbuz O. G. A. s. 39905 Ukraïni Komp'juterna programa pidtrimki navchal'noï dijtal'nosti studentiv «ManageEdu» / № 40241; zajavl. 30.06.2011; opub. 01.09.2011.

ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДИРОВАНИЕ С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК

Актуальность. Факториальное кодирование данных позволяет совмещать операции крипто- и имитозащиты, а также помехоустойчивого кодирования, что приводит к уменьшению вносимой передатчиком избыточности, повышению быстродействия и увеличению эффективной пропускной способности. Вместе с тем описанные методы факториального кодирования не позволяют исправлять ошибки, что ограничивает область их использования.

Целью данной работы является разработка метода факториального кодирования с восстановлением данных по перестановке, обеспечивающего комплексное решение задач криптографической защиты и помехоустойчивого кодирования и позволяющего совместить функции исправления и обнаружения ошибок канала связи.

Метод. Основная идея предложенного метода кодирования состоит в увеличении расстояния между разрешенными кодовыми словами, представляющими собой перестановки, вычисленные по всем информационным битам блока данных и представленные в двоичном виде. Исследованы методы увеличения расстояния на основе метрик Эвклида и Хэмминга. Для каждого из этих методов определены основные свойства факториального кода с исправлением ошибок, в том числе выполнена оценка достоверности передачи при независимости и биномиальном распределении возникающих в канале связи ошибок, разработаны структурные схемы приемника. Правила декодирования, реализованные в приемнике, основываются на критерии максимального правдоподобия и предусматривают как прямое исправление ошибок, так и их обнаружение с последующим исправлением путем переспроса поврежденного блока.

Результаты. Реализованы факториальные коды с исправлением ошибок, использующие метрики Эвклида и Хэмминга. Для этих кодов выполнен сравнительный анализ вероятности необнаруженной ошибки, остаточной вероятности ошибочного приема, энергетического выигрыша и относительной скорости передачи. Показано, что характеристики кода не являются инвариантными по отношению к множеству разрешенных кодовых слов, а из рассмотренных в работе кодов более эффективными являются коды, использующие метрику Хэмминга.

Выводы. Получил дальнейшее развитие метод факториального кодирования с восстановлением данных по перестановке, который за счет совмещения функций исправления и обнаружения ошибок позволяет повысить динамическую составляющую потери скорости и, как следствие, относительную скорость передачи, по сравнению с обнаруживающим ошибки факториальным кодированием за счет снижения его помехоустойчивости. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность факториальных кодов с исправлением ошибок.

Ключевые слова: избыточность, факториальный код, перестановка, помехоустойчивое кодирование, исправление ошибок, обнаружение ошибок, достоверность передачи, относительная скорость передачи.

НОМЕНКЛАТУРА

FCDR – Factorial Code with Data Recovery by permutation;

FCDRec – FCDR with error correction;

РОС – решающая обратная связь;

СКК – сигнально-кодовая конструкция;

ФКВД – факториальный код с восстановлением данных по перестановке;

ФКВДио – факториальный код с восстановлением данных и исправлением ошибок;

ΔP – энергетический выигрыш при применении помехоустойчивого кода;

α – показатель избыточности кода (по мощности);

v_2 – динамическая составляющая потери скорости;

$A(x)$ – представленное в двоичном виде информационное слово;

D_i – эвклидово расстояние от нуля до сигнальной точки i ;

$D_{i,j}$ – эвклидово расстояние между сигнальными точками i и j ;

$D_{\min}$ – минимальное эвклидово расстояние между сигнальными точками;

$d_{i,j}$ – расстояние Хэмминга между сигнальными точками i и j ;

$d_{\min}$ – минимальное расстояние Хэмминга между кодовыми словами;

$f_{per}^{EC}(i, t)$ – количество ошибок веса t , исправляемых для i -ой сигнальной точки;

$f_{per}^{ud}(i, t)$ – количество ошибок веса t , приводящих к ошибочному декодированию i -ого сигнального вектора
 k – число двоичных символов в информационном блоке данных;

l_r – число бит для кодирования одного символа перестановки;

M – порядок перестановки;

P_{det} – вероятность обнаруженной ошибки;

P_{EC} – вероятность того, что ошибка будет исправлена, а кодовая комбинация принята верно;

P_{res} – остаточная вероятность ошибочного приема;

P_{ud} – вероятность необнаруженной ошибки;

$P_{ud}(FCDR(ec), p_0)$ – вероятность не обнаруженной ФКВД (или ФКВДио) ошибки;

$P_w(i)$ – вероятность применения источником i -ого слова;

p_0 – переходная вероятность симметричного двоичного постоянного канала;

P_{0eq} – эквивалентная вероятность битовой ошибки;

Q – вероятность приема блока данных без ошибок

$R_{FCDR}(x)$ – представленное в двоичном виде кодовое слово ФКВД;

r – длина кодового слова;

r_i – расстояние Хэмминга между принятым вектором и i -ым сигнальным вектором;

S_F – синдром перестановки.

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы повышения эффективности систем передачи данных, включая повышение достоверности передачи и пропускной способности, всегда привлекали внимание специалистов информационных технологий и телекоммуникаций. В данном контексте перспективными являются методы факториального кодирования информации [1–6], позволяющие совместить операции помехоустойчивого кодирования, крипто- и имитозащиты и тем самым уменьшить вносимую передатчиком избыточность, повысить быстродействие и увеличить эффективную пропускную способность. Вместе с тем возможности факториального кодирования, изложенные в [1–6], далеко не исчерпаны, что и определяет круг решаемых в данной работе задач.

В работе [4] предложен, а в работе [5] получил дальнейшее развитие метод факториального кодирования с восстановлением данных по перестановке (ФКВД, FCDR). Данный метод направлен на комплексную защиту информации от несанкционированного чтения и ошибок, возникающих в канале связи. При этом ФКВД решает задачу обнаружения ошибок, а их исправление достигается повторной передачей искаженного помехой кодового слова. Вместе с тем при определенных обстоятельствах относительная скорость передачи информации в системах с решающей обратной может оказаться чрезмерно малой. Для ее повышения (а также в системах реального масштаба времени) целесообразно использовать коды с исправлением ошибок. Кроме того, как сказано в [7], комбинирование процедур обнаружения и исправления ошибок является зачастую более эффективной, чем либо только исправление ошибок, либо только обнаружение ошибок с повторной передачей. Поэтому актуальной задачей является задача совмещения процедур криптографического преобразования информации, а также обнаружения и исправления ошибок.

Целью данной работы является разработка метода факториального кодирования информации, который реализует функцию защиты информации от несанкционированного доступа, а также функцию помехоустойчивого кодирования, сочетающего обнаружение и исправление ошибок, возникающих в канале связи.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть информация от источника поступает на вход кодера блоками из k бит. Тогда мощность множества информационных слов составляет 2^k . Обозначим через $A(x)$ представленное в двоичном виде информационное слово (вектор). ФКВД реализует биективное преобразование множества информационных слов $A(x)$ в разрешенное множество из 2^k перестановок $R_{FCDR}(x)$ порядка M ($M! \geq 2^k$).

Задачей синтеза метода факториального кодирования информации, сочетающего защиту информации от несанкционированного чтения, а также обнаружение и исправление ошибок заключается в определении и анализе структуры множества из 2^k векторов $R_{FCDR}(x)$, позволяющей выделить для каждого из них область возможных значений $\hat{R}_{FCDR}(x)$ на входе приемника, расстояние до которых в заданной метрике не превышает заданного значения, а также область значений $\hat{R}_{FCDR}(x)$, находящихся на одинаковом расстоянии до двух или более векторов $R_{FCDR}(x)$ из 2^k возможных.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Согласно [4], перестановка $R_{FCDR}(x)$ представляет собой последовательность закодированных равномерным двоичным кодом чисел $\{0; 1; \dots; M-1\}$, очередность следования которых определяется информационной последовательностью и алгоритмом кодирования. Если порядок формирования перестановки по информационному слову источника держится в секрете, ФКВД, помимо обнаружения ошибок в канале связи, обеспечивает защиту данных от несанкционированного чтения. Кроме того, такой код является самосинхронизирующимся и не требует разделителя кодовых слов.

Как показано в [4], приемник содержит блок проверки корректности принятой из канала кодовой комбинации и декодер ФКВД. Проверка корректности сводится к проверке того факта, что в принятой кодовой комбинации каждый символ множества $\{0; 1; \dots; M-1\}$ применяется ровно по одному разу. В случае, если принятая последовательность является некорректной, она не допускается к декодированию, а на передающую станцию по обратному каналу связи передается запрос повторной передачи блока.

Корректная последовательность подлежит декодированию – обратному преобразованию $f_{FCDR}^{-1} : R_{FCDR}(x) \rightarrow A(x)$. Согласно [4], поскольку $M! > 2^k$ при $k > 1$, множество перестановок на входе декодера состоит из двух подмножеств – разрешенного и запрещенного. К разрешенному подмножеству относятся 2^k перестановок (в простейшем случае их синдромы S_F соответствуют целым числам $[0; 2^k - 1]$ числовой оси), а к запрещенному – подмножество из $(M! - 2^k)$ остальных перестановок (в простейшем случае их синдромы S_F соответствуют целым числам $[2^k; M! - 1]$ числовой оси). Прием любой перестановки из неразрешенной части множества также инициирует команду переспроса.

В работе [5] для ФКВД введен показатель избыточности (по мощности) α :

$$\alpha = M! / 2^k. \quad (1)$$

В [5] также показано, что при $k > 1$ справедливо $M! > 2^k$ и, соответственно, $\alpha > 1$, что приводит к избыточности кода. При этом введение дополнительных проверочных бит перед преобразованием информационного вектора в перестановку позволяет повысить обнаруживающую способность ФКВД. С другой стороны, избыточность ФКВД обеспечивает возможность увеличения расстояния между перестановками – носителями информации и создает предпосылки для создания факториального кода с исправлением ошибок. Такой код будем называть факториальным кодом с восстановлением данных и исправлением ошибок – ФКВДио (FCDRс – FCDR with error correction).

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем следующие определения.

Определение 1. Сигнальными векторами называются представленные в двоичном виде перестановки разрешенного множества.

Множество сигнальных векторов образует сигнально-кодую конструкцию (СКК).

Определение 2. Сигнальными точками называются точки на числовой оси $[0; M!-1]$, которые соответствуют сигнальным векторам кода.

Множество сигнальных точек кода образует его сигнальное созвездие.

Рассмотрим два способа формирования СКК для ФКВДио:

- 1) СКК, основанная на минимальном расстоянии Эвклида между сигнальными точками. Такие СКК будем называть СКК первого типа и обозначать через СКК-1;
- 2) СКК, основанная на минимальном расстоянии Хэмминга между сигнальными векторами. Такие СКК будем называть СКК второго типа и обозначать через СКК-2.

Рассмотрим ФКВДио с СКК-1.

Минимальное расстояние между сигнальными точками на оси $[0; M!-1]$

$$D_{\min} \leq [(M!-1)/(2^k-1)]. \quad (2)$$

В простейшем случае 2^k сигнальных точек располагаются на числовой оси $[0; 2^k-1]$ с шагом $D_{\min} = 1$. Такой код не предназначен для исправления ошибок. Он может быть применен для обнаружения ошибок, причем только тех, которые приводят к преобразованию перестановки в «не перестановку» или в перестановку из запрещенного множества.

Напомним, что для ФКВД $k \leq \lceil \log_2 M! \rceil$. Выполним оценку $D_{\min}$ при $k = \lceil \log_2 M! \rceil$, для которого достигается максимальная скорость кода. Поскольку $\log_2 M! - 1 < \lceil \log_2 M! \rceil \leq \log_2 M!$, имеет место $M!/2 < 2^k \leq M!$. Тогда $1 \leq (M!-1)/(2^k-1) < 2 + 2/(M!-2)$. Поэтому при $k = \lceil \log_2 M! \rceil$ минимальное расстояние между сигнальными точками $D_{\min} \leq 2$. Такой ФКВД не

способен исправлять все ошибки, приводящие даже к минимальному смещению сигнальных векторов по числовой оси, и поэтому его целесообразно применять для обнаружения ошибок. При этом, как и для $D_{\min} = 1$, обнаруживаются только те ошибки, которые приводят к преобразованию переданной перестановки в «не перестановку» или в перестановку из запрещенного множества.

Исправление ошибок возможно при $D_{\min} \geq 3$. Для увеличения $D_{\min}$ необходимо увеличивать показатель α .

Очевидно, что $\alpha = M!/2^k$ монотонно возрастает по M и убывает по k . Поэтому увеличение может быть достигнуто как увеличением M , так и уменьшением k . При этом, как показано в [5], уменьшение длины информационного вектора на Δk бит при фиксированном M приводит к увеличению показателя α в $2^{\Delta k}$ раз.

Графически расположение сигнальных точек на числовой оси представлено на рис. 1. При этом расстояние от нуля до сигнальной точки i будем обозначать через D_i , а между сигнальными точками i и j – через $D_{i,j} = D_j - D_i$.

Положение сигнальных точек на числовой оси определяется СКК. В простейшем случае сигнальные точки располагаются равномерно с шагом $D_{\min}$, при этом $D_{i,i+1} = D_{\min}$ для $i \in [0; 2^k-2]$. В более общем случае

$$D_{i,i+1} \neq \text{const}, \text{ а } D_{i,j} \geq D_{\min}, i, j \in [0; 2^k-1], i \neq j.$$

При передаче сигнального вектора действующая в канале связи помеха может сместить сигнальную точку передатчика в любую другую точку отрезка $[0; M!-1]$, которая может быть как сигнальной, так и не сигнальной, а принятая перестановка может относиться как к разрешенному, так и к запрещенному множеству.

Приемник принимает решение о переданном сигнальном векторе на основании критерия максимального правдоподобия путем нахождения сигнальной точки, ближайшей (в метрике Эвклида) к точке, соответствующей принятому вектору. Для этого декодер вычисляет расстояния от соответствующей принятому вектору точке числовой оси до соседних сигнальных точек. При равенстве этих расстояний формируется сигнал переспроса.

Таким образом, если помеха сместила сформированный передатчиком i -ый вектор не более чем на $-[(D_{i-1,i}-1)/2]$ и $[(D_{i,i+1}-1)/2]$ точек, эта ошибка исправляется, а принятый вектор корректируется приемником в перестановку, соответствующую i -ой сигнальной точке. Если смещение равняется $-[D_{i-1,i}/2]$ (или $+ [D_{i,i+1}/2]$) и при этом $D_{i-1,i}/2 \in \mathbb{Z}$ ($D_{i,i+1}/2 \in \mathbb{Z}$), ошибка обнаруживается кодом и исправляется пере-

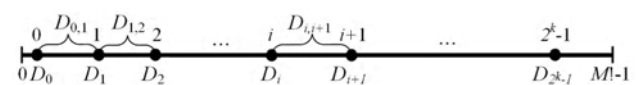


Рисунок 1 – Расположение сигнальных точек на числовой оси

спросом. Если же смещение превышает $-[D_{i-1,i}/2]$ (или $+ [D_{i,i+1}/2]$), такие ошибки код исправить не может. В этом случае, если расстояния от соответствующей принятому вектору точки до соседних сигнальных точек одинаковы, ошибка обнаруживается, в противном случае возникает ошибка декодирования и, как следствие, не обнаруженная кодом ошибка.

Если принятый вектор соответствует точке из диапазона $[D_0 - [(D_{\min} - 1)/2]; D_0 - 1]$, приемник корректирует ее в нулевую сигнальную точку, если же точке из диапазона $[D_{2^k-1} + 1; D_{2^k-1} + [(D_{\min} - 1)/2]]$ – в $(2^k - 1)$ сигнальную точку, остальные точки диапазонов $[0; D_0 - 1]$ или $[D_{2^k-1} + 1; M! - 1]$ являются запрещенными.

Таким образом, все ошибки, приводящие к смещению сигнальной точки на расстояние $D \leq [(D_{\min} - 1)/2]$, исправляются кодом.

Положим $D_{i,i+1} = D_{\min}$ для $\forall i \in [0; 2^k - 2]$, $D_0 = [(D_{\min} - 1)/2]$, а $M! - 1 - D_{2^k-1} \geq [(D_{\min} - 1)/2]$. В этом случае имеет место оценка

$$(2^k - 1)D_{\min} + 2[(D_{\min} - 1)/2] + 1 \leq M!. \quad (3)$$

При заданных k и M $D_{\min} \leq \max(D): (2^k - 1)D + 2[(D - 1)/2] + 1 \leq M!$. Например, если $k = 40$, а $M = 16$, то $D_{\min} \leq 19$. Поэтому выбор параметров k и M однозначно определяют максимальную исправляющую способность кода. Выражение (3) также может служить для выбора k или M при других известных параметрах. Например, если $k = 16$, $D_{\min} = 3$, то $M \geq 9$; если $M = 8$, $D_{\min} = 6$, то $k \leq 12$. Кроме того, выражение (3) показывает, что все точки, лежащие правее пороговой точки $(2^k - 1)D_{\min} + 2[(D_{\min} - 1)/2] + 1$, относятся к запрещенной части числового множества. Поэтому все принятые кодовые комбинации после проверки корректности проходят сравнение с пороговым значением. Если соответствующая кодовой комбинации точка расположена выше пороговой точки, производится переспрос блока данных, в противном случае выполняется поиск ближайшей сигнальной точки и отождествление с ней принятой кодовой комбинации.

Структурная схема приемника ФКВДио представлена на рис. 2, где введены следующие обозначения: БПК – блок проверки корректности принятой комбинации; БИИ – блок извлечения информации из перестановки; БОМ – блок оценки принадлежности принятой перестановки к разрешенному множеству; БО – блок отождествления принятой перестановки с ближайшим разрешенным вектором данных.

Определим вероятностные характеристики ФКВДио с СКК-1.

Примем, что канал связи – симметричный двоичный постоянный с переходной вероятностью p_0 , а битовые ошибки возникают в нем независимо. Тогда вероятность не обнаруженной ФКВД или ФКВДио ошибки

$$P_{ud}(FCDR(ec), p_0) = \sum_{i=0}^{2^k-1} \left(P_w(i) \cdot \sum_{t=1}^r f_{per}^{ud}(i, t) p_0^t q_0^{r-t} \right). \quad (4)$$

Доля ошибок, приводящих к ошибочному декодированию: $(2^k - 1)/M!$ для ФКВД и $(2^k - 1)(2[(D_{\min} - 1)/2] + 1)/M!$ для ФКВДио. Поскольку множество ошибок, приводящих к ошибочному декодированию ФКВДио, содержит множество ошибок, приводящих к ошибочному декодированию ФКВД, $P_{ud}(FCDRec, p_0) > P_{ud}(FCDR, p_0)$ при $D_{\min} \geq 3$.

Учтем, что для простейшей системы с РОС динамическая составляющая потери скорости вследствие переспросов $v_2 = Q + P_{ud}$ [8]. В случае использования ФКВДио

$$Q + P_{EC} + P_{det} + P_{ud} = 1. \quad (5)$$

Тогда динамическая составляющая потери скорости для ФКВДио:

$$v_2 = 1 - P_{det} = Q + P_{EC} + P_{ud}. \quad (6)$$

Вероятность исправления ошибок для ФКВДио:

$$P_{EC}(FCDRec, p_0) = \sum_{i=0}^{2^k-1} \left(P_w(i) \cdot \sum_{t=1}^r f_{per}^{EC}(i, t) p_0^t q_0^{r-t} \right). \quad (7)$$

Поскольку $v_2 = Q + P_{ud}$ для ФКВД меньше значения v_2 по (6) для ФКВДио, при одинаковых параметрах и $D_{\min} \geq 3$ ФКВДио обеспечивает большую относительную скорость передачи по сравнению с ФКВД, однако проигрывает в помехоустойчивости.

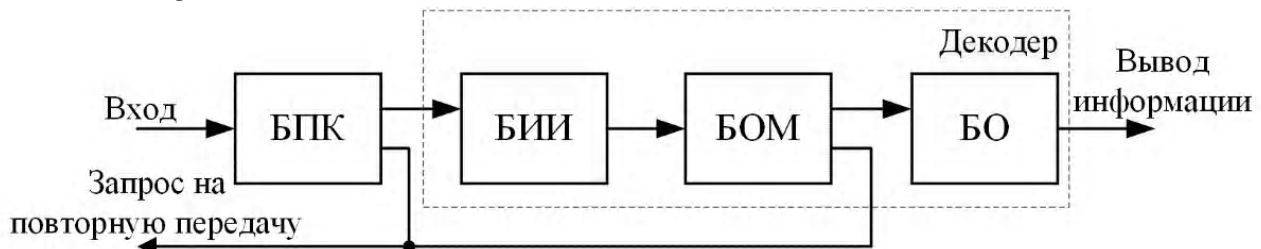


Рисунок 2 – Структурная схема приемника ФКВДио

Определим энергетический выигрыш ΔP при применении ФКВДио для некогерентного приемника, характеризующегося вероятностью битовой ошибки $p = 0,5 \cdot e^{-0,5h^2}$ [9], где h^2 – соотношение сигнал/шум. В этом случае

$$\Delta P = 10 \lg \left(\ln h_{eq}^2 / \ln h_0^2 \right) = 10 \lg \left(\ln (2p_{0eq}) / \ln (2p_0) \right), \quad (8)$$

где эквивалентная вероятность битовой ошибки p_{0eq} [8] равна

$$p_{0eq} \approx P_{ud} / (k(1 - P_{det})). \quad (9)$$

Учтем, что из (5) $1 - P_{det} = Q + P_{EC} + P_{ud}$. Тогда выражение (9) принимает вид:

$$p_{0eq} \approx P_{ud} / (k(Q + P_{EC} + P_{ud})). \quad (10)$$

Остаточная вероятность ошибочного приема [8] для ФКВДио равна

$$P_{res} = P_{ud} / (1 - P_{det}) = P_{ud} / (Q + P_{EC} + P_{ud}). \quad (11)$$

Рассмотрим ФКВДио с СКК-2.

Определенное для СКК-1 расстояние Эвклида $D_{i,j}$ между сигнальными точками i и j в общем случае не равняется расстоянию Хэмминга между кодовыми словами, соответствующими этим сигнальным точкам. Вместе с тем из теории корректирующих кодов [7] известно, что для исправления ошибки в двоичных разрядах кратности t минимальное расстояние Хэмминга между кодовыми словами $d_{min} \geq 2t + 1$.

Расстояние Хэмминга между сигнальными векторами i и j будем обозначать через $d_{i,j}$. СКК-2 для ФКВДио предусматривает выполнение условия $d_{i,j} \geq d_{min}$, $i, j \in [0; 2^k - 1]$, $i \neq j$.

Определение связи между M , k и d_{min} является актуальной задачей, однако выходит за рамки данной работы. В простейшем случае для ФКВД сигнальные вектора соответствуют сигнальным точкам с шагом $D_{i,i+1} = D_{min} = 1$ и $D_0 = 1$. Тогда $d_{min} = 2$, а ФКВД только обнаруживает ошибки, приводящие к преобразованию переданной перестановки в «не перестановку» или в

перестановку из запрещенного множества. Очевидно, что для обеспечения возможности исправления ошибок необходимо увеличивать d_{min} . Для этого необходимо увеличивать показатель α . При этом ошибки исправляются при $d_{min} \geq 3$.

При передаче сигнального вектора по каналу связи на него воздействует помеха. Модифицированный помехой вектор поступает на вход приемника ФКВДио с СКК-2, структура которого показана на рис. 3. Приемник содержит блок исправления и обнаружения ошибок БИОО и блок извлечения информации из перестановки БИИ.

БИОО реализует следующие функции: определяет расстояния Хэмминга r_i между принятым вектором и всеми сигнальными векторами, $i \in [0; 2^k - 1]$; находит минимальное расстояние $r_{min} = \min \{r_i\}$; если существует единственное $i \in [0; 2^k - 1]$: $r_i = r_{min}$, принятая комбинация отождествляется с i -ым сигнальным вектором; если существует как минимум два значения $i, j \in [0; 2^k - 1]$: $r_i = r_j = r_{min}$, формируется сигнал переспроса. Таким образом, правила декодирования основываются на критерии максимального правдоподобия.

В БИИ производится преобразование перестановки в k -битную последовательность.

Учтем, что $d_{i,j} : 2$ и, следовательно, $d_{min} : 2$. Поэтому при передаче i -го сигнального вектора ФКВДио с СКК-2 справедливы следующие утверждения:

- 1) ошибка с весом $t \leq [(d_{min} - 1)/2] = (d_{min} - 2)/2 = d_{min}/2 - 1$ исправляется, а принятый вектор корректируется приемником в переданный сигнальный вектор;
- 2) ошибка с весом $t = d_{min}/2$ может быть как исправлена (если r_{min} соответствует расстоянию только до одного i -го сигнального вектора), так и обнаружена и исправлена переспросом (если r_{min} соответствует расстоянию до двух и более сигнальных векторов);
- 3) если $t > d_{min}/2$, ошибка либо исправляется (если r_{min} соответствует расстоянию только до одного i -го сигнального вектора), либо обнаруживается (если соответствует расстоянию до двух и более сигнальных векторов), либо не обнаруживается (если соответствует расстоянию только до одного сигнального вектора, отличного от i -го).

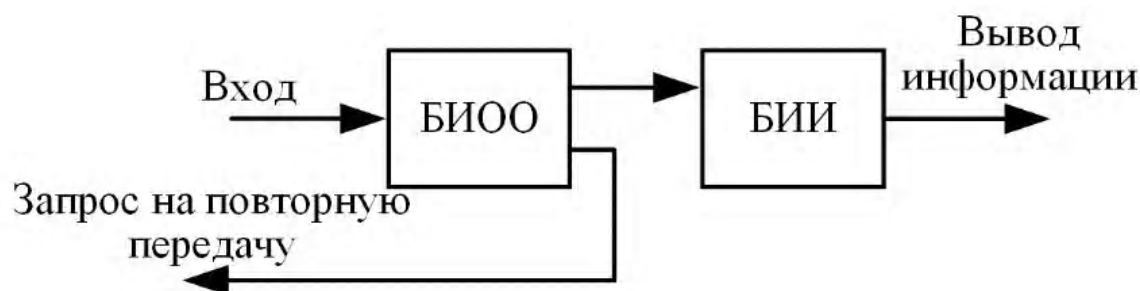


Рисунок 3 – Структурная схема приемника ФКВДио с СКК-2

Таким образом, ФКВДио с СКК-2 позволяет комбинировать исправление наиболее частых сочетаний ошибок и обнаружение с последующей повторной передачей для более редких сочетаний ошибок. Вероятностные характеристики определяются по тем же формулам, что и ФКВДио с СКК-1: (4), (6), (7), (8), (11).

Актуальным, однако выходящим за рамки данной работы, является вопрос о максимальном количестве $N_{sv}(d_{\min}, M)$ сигнальных векторов, обеспечивающих заданное $d_{\min}$ при известном M (данный вопрос тесно связан с теорией решеток и задачей наилучших упаковок шаров в пространствах различных размерностей [10]).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Примем $k=3$, а $M=4$. В соответствии с (3) для СКК-1 $D_{\min} \leq 3$. Тогда сигнальными точками для ФКВДио с СКК-1 являются точки 1, 4, 7, 10, 13, 16, 19, 22. СКК-1 для базовой перестановки $\pi(0) = \{0; 1; 2; 3\}$ представлена в табл. 1.

Ошибка не обнаруживается кодом, если кодовое слово, соответствующее i -ой сигнальной точке СКК-1, будет преобразовано помехой в комбинацию, соответствующую любой точке числовой оси, не принадлежащей диапазону $[D_i - 1; D_i + 1]$.

Примем, что все слова применяются источником с одинаковой вероятностью $P_w(i) = P_w = 1/2^k$. Для $k=3$, $M=4$: $P_w = 1/8$, $l_r = 2$, $r = 8$. Учтем, что $f_{per}^{ud}(i, t) = 0$ при $t \nmid 2$. Тогда

$P_{ud}(FCDRec, p_0) = 1/8 \sum_{i=0}^7 \sum_{t=1}^4 f_{per}^{ud}(i, 2t) p_0^{2t} q_0^{8-2t}$. Значения $f_{per}^{ud}(i, 2t)$ приведены в табл. 2.

С учетом четности ошибок, преобразующих перестановку в перестановку, для СКК-1

$$P_{EC}(FCDRec, p_0) = \sum_{i=0}^{2^k-1} \left(P_w(i) \cdot \sum_{t=1}^{[r/2]} f_{per}^{EC}(i, 2t) p_0^{2t} q_0^{r-2t} \right).$$

Таблица 2 – Значения $f_{per}^{ud}(i, 2t)$ для ФКВДио с СКК-1

t	Сигнальная точка							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	3	4	3	3	3	3	4	3
2	13	12	13	13	13	13	12	13
3	4	4	4	4	4	4	4	4
4	1	1	1	1	1	1	1	1

Таблица 1 – СКК-1 и СКК-2 для ФКВДио при $k=3$, $M=4$

СКК-1		СКК-2	
Сигнальные точки	Сигнальные вектора	Сигнальные вектора	Сигнальные точки
1	00 01 11 10	00 01 10 11	0
4	00 11 01 10	01 00 11 10	7
7	01 00 11 10	10 11 00 01	16
10	01 11 00 10	11 10 01 00	23
13	10 00 11 01	11 01 10 00	21
16	10 11 00 01	01 11 00 10	10
19	11 00 10 01	10 00 11 01	13
22	11 10 00 01	00 10 01 11	2

Значения $f_{per}^{EC}(i, 2t)$ приведены в табл. 3.

Значения $f_{per}^{ud}(i, 2t)$ для ФКВД с СКК-1 приведены в табл. 4.

В табл. 1 представлена СКК-2 с $d_{\min} = 4$. Экспериментально установлено, что ФКВДио с такой СКК исправляет только любые ошибки с $t=1$, а ошибка не обнаруживается тогда и только тогда, когда кодовое слово, соответствующее i -ому сигнальному вектору, преобразовывается помехой в комбинацию, для которой $r_j \leq 1$ для $j \in [0; 2^k - 1]$, $j \neq i$. Поэтому $f_{per}^{EC}(i, t) = 8$ при $t=1$ и $f_{per}^{EC}(i, t) = 0$ при $t \neq 1$.

Значения $f_{per}^{ud}(i, t)$ для СКК-2 не зависят от сигнальной точки i и равны: $f_{per}^{ud}(i, 3) = 24$, $f_{per}^{ud}(i, 4) = 6$, $f_{per}^{ud}(i, 5) = 24$, $f_{per}^{ud}(i, 6) = 0$, $f_{per}^{ud}(i, 7) = 8$, $f_{per}^{ud}(i, 8) = 1$, $f_{per}^{ud}(i, t) = 0$ при $t \leq 2$.

Для обнаруживающего ошибки ФКВД с СКК-2 значения $f_{per}^{ud}(i, t)$ не зависят от сигнальной точки i и равны: $f_{per}^{ud}(i, 4) = 6$, $f_{per}^{ud}(i, 8) = 1$, $f_{per}^{ud}(i, t) = 0$ при других t .

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 показаны графики зависимостей вероятностей необнаруженной ошибки от вероятности битовой ошибки p_0 для рассмотренных кодов: ФКВДио с СКК-1 (FCDRec-1) и СКК-2 (FCDRec-2), а также ФКВД с СКК-1 (FCDR-1) и СКК-2 (FCDR-2).

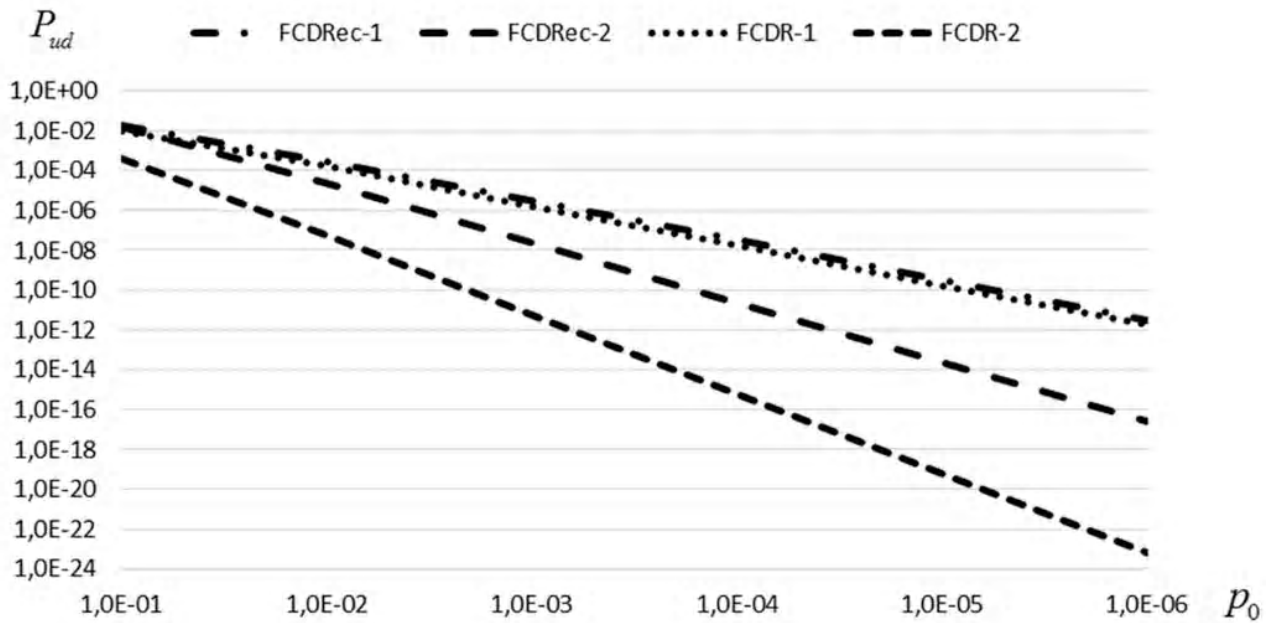
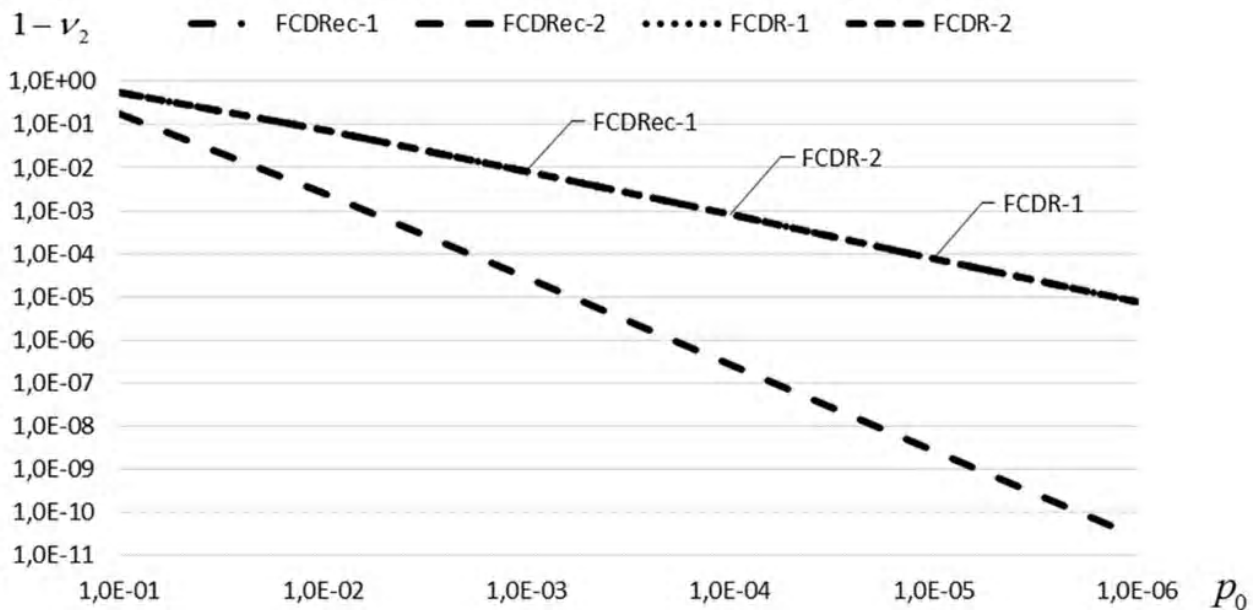
На рис. 5 для этих кодов показаны графики зависимостей величины $1 - v_2$ от p_0 .

Таблица 3 – Значения $f_{per}^{EC}(i, 2t)$ для ФКВДио с СКК-1

t	Сигнальная точка							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0	1	1	1	1	0	1
2	1	2	1	1	1	1	2	1

Таблица 4 – Значения $f_{per}^{ud}(i, 2t)$ для ФКВД с СКК-1

t	Сигнальная точка							
	0	1	2	3	4	5	6	7
1	2	2	1	1	1	1	2	2
2	2	2	4	4	4	4	2	2
3	2	2	1	1	1	1	2	2
4	1	1	1	1	1	1	1	1

Рисунок 4 – Графики зависимостей вероятностей необнаруженной ошибки от p_0 Рисунок 5 – Графики зависимостей величины $1 - v_2$ от p_0

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Из представленных графиков следует, что наименьшую достоверность передачи из рассмотренных кодов обеспечивает ФКВДио с СКК-1, для которого вероятность необнаруженной ошибки практически в два раза больше по сравнению с ФКВД с СКК-2. При этом динамическая составляющая потери скорости для ФКВДио и ФКВД с СКК-1 различаются незначительно (менее 3% при $p_0 = 0,1$). Поэтому в данном сравнении ФКВД с СКК-1 является более предпочтительным. Вместе с тем из этого пока не следует вывод в общем случае о меньшей эффективности ФКВДио по сравнению с ФКВД для СКК-1.

Наименьшую вероятность необнаруженной ошибки и наибольший энергетический выигрыш имеет ФКВД с СКК-2.

Отношение $P_{ud}(FCDDR-2, p_0)/P_{ud}(FCDDR-1, p_0)$ равно $2,4 \cdot 10^1$ при $p_0 = 0,1$ (разница в энергетическом выигрыше $\Delta P = 2,42$ дБ) и $2,9 \cdot 10^5$ при $p_0 = 0,001$ ($\Delta P = 2,84$ дБ), указывая на большую эффективность СКК-2 для ФКВД.

Использование СКК-2 для ФКВДио увеличивает по сравнению с ФКВД вероятность необнаруженной ошибки: $P_{ud}(FCDRec-2, p_0)/P_{ud}(FCDDR-2, p_0)$ равно $3,7 \cdot 10^1$

при $p_0 = 0,1$ ($\Delta P = 2,23$ дБ) і $4 \cdot 10^3$ при $p_0 = 0,001$ ($\Delta P = 1,65$ дБ). Вместе с тем $v_2(FCDR - 2, p_0) \approx v_2(FCDR(ec) - 1, p_0)$, в то время, как $v_2(FCDRec - 2, p_0)$ может значительно превосходить $v_2(FCDR - 2, p_0)$: их разность при $p_0 = 0,1$ равна $0,828 - 0,431 \approx 0,4$ (более 92%) и увеличивается с увеличением p_0 . Применение СКК-2 вместо СКК-1 для ФКВДио позволяет увеличить v_2 до 82,9% при $p_0 = 0,1$, при этом $P_{уд}$ уменьшается в 1,23 раза.

Приведенный анализ указывает, что для рассмотренных кодов ФКВД(ио) с СКК-1 и СКК-2 большей эффективностью обладают ФКВД(ио) с СКК-2. Вместе с тем из этого пока не следует вывод в общем случае о меньшей эффективности СКК-1 по сравнению с СКК-2.

ВЫВОДЫ

В процессе проведенного исследования показана возможность факториального кодирования информации, совмещающей функции исправления и обнаружения ошибок, возникающих в канале связи при передаче сообщения. Такое совмещение позволяет повысить динамическую составляющую потери скорости и, как следствие, относительную скорость передачи, по сравнению с обнаруживающим ошибки факториальным кодированием за счет снижения помехоустойчивости кода.

Установлено также, что показатели помехоустойчивости факториального кодирования с восстановлением данных, а также с восстановлением данных и исправлением ошибок не являются инвариантными по отношению к выбору сигнально-кодовой конструкции, если в качестве сигнальных векторов используется некоторое собственное подмножество множества векторов всех возможных перестановок порядка M .

Фауре Е. В.

Канд. техн. наук, доцент, докторант, доцент кафедры інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна

ФАКТОРИАЛЬНОЕ КОДУВАННЯ З ВИПРАВЛЕННЯМ ПОМИЛОК

Актуальність. Факторіальне кодування даних дозволяє поєднувати операції крипто- й імітозахисту, а також завадостійкого кодування, що призводить до зменшення внесеної передавачем надлишковості, підвищення швидкодії та збільшення ефективної пропускну здатності. Разом з тим описані методи факторіального кодування не дозволяють виправляти помилки, що обмежує область їх використання.

Метою роботи є розробка методу факторіального кодування з відновленням даних за перестановкою, що забезпечує комплексне вирішення задач криптографічного захисту та завадостійкого кодування і дозволяє поєднати функції виправлення та виявлення помилок каналу зв'язку.

Метод. Основна ідея запропонованого методу кодування полягає в збільшенні відстані між дозволеними кодовими словами, які являють собою перестановки, обчислені за всіма інформаційними бітами блоку даних і представлені в двійковому вигляді. Досліджено методи збільшення відстані на основі метрик Евкліда і Хеммінга. Для кожного з цих методів визначено основні властивості факторіального коду з виправленням помилок, у тому числі виконано оцінку достовірності передавання при незалежності і біноміальному розподілі помилок у каналі зв'язку, розроблено структурні схеми приймача. Правила декодування, реалізовані в приймачі, ґрунтуються на критерії максимальної правдоподібності і передбачають як пряме виправлення помилок, так і їх виявлення з наступним виправленням шляхом перезапиту пошкодженого блоку.

Результати. Реалізовано факторіальні коди з виправленням помилок, які використовують метрики Евкліда і Хеммінга. Для цих кодів виконано порівняльний аналіз ймовірності невиявленої помилки, залишкової ймовірності помилкового прийому, енергетичного виграшу та відносної швидкості передавання. Показано, що характеристики коду не є інваріантними щодо множини дозволених кодових слів, а з розглянутих кодів більш ефективними є коди, які використовують метрику Хеммінга.

Висновки. Отримав подальший розвиток метод факторіального кодування з відновленням даних за перестановкою, який за рахунок поєднання функцій виправлення та виявлення помилок дозволяє підвищити динамічну складову втрати швидкості і, як наслідок, відносну швидкість передавання, в порівнянні з виявляючими помилки факторіальним кодуванням за рахунок зниження його завадостійкості. Проведені експерименти підтвердили ефективність факторіальних кодів з виправленням помилок.

Ключові слова: надлишковість, факторіальний код, перестановка, завадостійке кодування, виправлення помилок, виявлення помилок, достовірність передавання, відносна швидкість передавання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фауре Э. В. Контроль целостности информации на основе факториальной системы счисления / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, А. И. Щерба // Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science. – 2016. – № 2. Т. 4. – (В печати).
2. Фауре Э. В. Метод формирования имитовставки на основе перестановок / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, В. А. Щерба // Захист інформації. – 2014. – №4, Т. 16. – С. 334–340. DOI: 10.18372/2410-7840.16.7620.
3. Фауре Э. В. Комбинированное факториальное кодирование и его свойства / Э. В. Фауре, В. В. Швыдкий, В. А. Щерба // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – №3. – С. 80–86. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-10.
4. Фауре Э. В. Факториальное кодирование с восстановлением данных / Э. В. Фауре // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – № 2. – С. 33–39.
5. Фауре Э. В. Метод повышения эффективности факториального кодирования с восстановлением данных / Э. В. Фауре // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2016. – №4. – (В печати).
6. Фауре Э. В. Факториальное кодирование с несколькими контрольными суммами / Э. В. Фауре // Вісник Житомирського державного технологічного університету. – 2016. – № 3. – С. 104–113.
7. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон ; пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина, С. И. Самойленко] – М. : Мир, 1976. – 590 с. – (Редакция литературы по новой технике).
8. Финк Л. М. Теория передачи дискретных сообщений / Л. М. Финк. – Изд. 2-е. – М. : Советское радио, 1970. – 728 с.
9. Теплов Н. Л. Помехоустойчивость систем передачи дискретной информации / Н. Л. Теплов. – М. : Связь, 1964. – 360 с.
10. Конвей Дж. Упаковки шаров, решетки и группы : в 2 т. / Дж. Конвей, Н. Слоэн ; при участии Э. Баннаи и др. ; [перевод с англ. С. Н. Лицына и др.] – М. : Мир, 1990. – 2 т.

Статья поступила в редакцию 09.02.2017.

После доработки 25.03.2017.

Faure E. V.

PhD, Associate Professor, Post-Doctoral Associate, Associate Professor of Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

FACTORIAL CODING WITH ERROR CORRECTION

Context. Factorial data coding allows combining operations of cryptographic protection, intentional alteration of data, and error-correcting coding which leads to the decrease of redundancy introduced by transmitter and to the increase of data rate and effective throughput. At the same time, the described methods of factorial coding do not correct errors, which limits their use.

Objective of this work is to develop a method of factorial coding with data recovery that provides a comprehensive solution of cryptographic protection and error control coding and allows combining the functions of communication channel errors detecting and correcting.

Method. The basic idea of the proposed coding method is to increase the distance between the allowed code words that represent permutations calculated for all information bits of a data block and represented in a binary form. The methods of distance increasing based on Euclidean and Hamming metrics are investigated. The basic properties of factorial code with error correction are defined for each of these methods. The estimate of probability characteristics is done on the condition of independence of communication channel errors and their binomial distribution. The receiver structures are developed. Decoding rules implemented in receiver are based on the maximum likelihood criteria and provide both forward error correction and error detection with further correction by retransmission of damaged data block.

Results. The factorial error-correcting codes using Euclidean and Hamming metrics are implemented. The comparative analysis of the probability of an undetected error, the residual probability of erroneous reception, energy gain, and the relative transmission rate is done for these codes. It is shown that code characteristics are not invariant to the set of allowed code words, and the codes that use Hamming metric are the most efficient codes between the presented codes.

Conclusions. The method of factorial coding data recovery by permutation has been further developed. Due to the combination of error correction and detection functions, it can increase the rate loss dynamic component and, consequently, the relative transmission rate, compared to error-detecting factorial coding by reducing its noise immunity. The experiments confirmed the effectiveness of the factorial error-correcting codes.

Keywords: redundancy, factorial code, permutation, error control coding, error correction, error detection, reliability of data transmission, relative transmission rate.

REFERENCES

1. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba A. I. Kontrol' celostnosti informacii na osnove faktorial'noj sistemy schisleniya, *Journal of Qafqaz University. Mathematics and computer science*, 2016, No. 2, Vol. 4. (V pechati).
2. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba V. A. Metod formirovaniya imitovstavki na osnove perestavok, *Zaxist informacii*, 2014, No. 4, Vol. 16, pp. 334–340. DOI: 10.18372/2410-7840.16.7620.
3. Faure E'. V., Shvydkij V. V., Shherba V. A. Kombinirovannoe faktorial'noe kodirovanie i ego svojstva, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 80–86. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-10.
4. Faure E'. V. Faktorial'noe kodirovanie s vosstanovleniem dannyx, *Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, 2016, No. 2, pp. 33–39.
5. Faure E'. V. Metod povysheniya e'ffektivnosti faktorial'nogo kodirovaniya s vosstanovleniem dannyx, *Visnyk Cherkas'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, 2016, No. 4. (V pechati).
6. Faure E'. V. Faktorial'noe kodirovanie s neskol'kimi kontrol'nymi summami, *Visnyk Zhytomyrs'kogo derzhavnogo tehnologichnogo universytetu*, 2016, No. 3, pp. 104–113.
7. Piterson U., Ue'ldon E'.; [per. s angl. pod red. R. L. Dobrushina, S. I. Samojlenko] Kody, ispravlyayushhie oshibki. Moscow, Mir, 1976, 590 p. (Redakciya literatury po novoj texnike).
8. Fink L. M. Teoriya peredachi diskretnyx soobshhenij. [Izd. 2-e, pererab. i dopoln.]. Moscow, Sovetskoe radio, 1970, 728 p.
9. Teplov N. L. Pomexoustojchivost' sistem peredachi diskretnoj informacii. Moscow, Svyaz', 1964, 360 p.
10. Konvej Dzh., Sloe'n N. ; pri uchastii E'. Bannai i dr.; [perevod s angl. S. N. Licyna i dr.] Upakovki sharov, reshetki i gruppy : v 2 t. Moscow, Mir, 1990, 2 t.

UDC 004.272.26: 004.93

Oliinyk A.¹, Subbotin S.², Skrupsky S.³, Lovkin V.⁴, Zaiko T.⁵

¹PhD., Associate Professor of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

²Dr.Sc, Head of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

³PhD, Associate Professor of Computer Systems and Networks Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

⁴PhD, Associate Professor of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

⁵PhD., Senior Lecture of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

INFORMATION TECHNOLOGY OF DIAGNOSIS MODELS SYNTHESIS BASED ON PARALLEL COMPUTING

Context. The problem of diagnosis models synthesis in the big data processing based on parallel computing is solved. The object of the research is the process of diagnosis models synthesis. The subject of the research are the methods and information technologies for diagnosis models synthesis.

Objective. The research objective is to develop diagnosis models synthesis information technology.

Method. The paper deals with information technology of diagnosis models synthesis which is a set of diagrams graphically describing structural elements of the system as well as the behavioral aspects of their interaction at various stages of diagnostics objects models construction. The developed information technology enables to perform the construction of distributed diagnostics systems where computationally complex stages of diagnosis models synthesis are performed on high-performance server equipment, which makes it possible to significantly increase the practical threshold for using diagnostics systems in the processing of big data sets for solving of the tasks of training sample data reduction, rules extraction, diagnosis models construction and retraining.

Results. The software which implements the proposed information technology and allows to synthesize diagnosis models based on the given data samples has been developed.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the proposed information technology operability and allow to recommend it for solving the problems of big data processing for technical and biomedical diagnostics in practice. The prospects for further researches may include the modification of the developed information technology by introducing of other methods of diagnosis models synthesis.

Keywords: data sample, diagnosis, rule extraction, feature selection, parallel computing, model synthesis.

NOMENCLATURE

CPU – Central Processing Unit;

GPU – Graphical Processing Unit;

IGA – Island Genetic Algorithm;

UML – Unified Modeling Language;

E_{IGA} – efficiency of the computer system in the implementation of the IGA method;

E_p – efficiency of the computer system in the implementation of the proposed method;

M – number of features in the sample of observations S ;

$Overhead_{IGA}$ – communication and synchronization costs of the IGA method;

$Overhead_p$ – communication and synchronization costs of the proposed method;

P – set of features (attributes) of observations in the given sample;

Q – number of observations in the given sample of observations S ;

S – sample of observations (training sample);

S_{IGA} – speedup of the IGA method;

S_p – speedup of the proposed method;

T – set of output parameter values;

T_{IGA} – execution time of the IGA method;

T_p – execution time of the proposed method.

INTRODUCTION

Solving of technical and medical diagnostics tasks, as well as the task of nondestructive product quality control, is connected with the task of diagnosis models construction

[1–6]. Such models enable to classify samples which are diagnosed with high accuracy, and at that the target classes are sufficiently convenient for perception and analysis by experts in the application areas.

Methods which enable to solve training sample data reduction, rules extraction, diagnosis models detection and retraining problems are presented in the papers [7–16]. However such methods based on sequential computing require significant time costs, which makes it difficult to use such methods for diagnostic decision making process automation in practice. So it is necessary to develop information technology which is capable to accelerate diagnosis models synthesis process based on parallel computing [17–20].

The research objective is to develop diagnosis models synthesis information technology which enables to build distributed diagnostics systems where computationally complex stages of model synthesis are performed on high-performance server equipment, which makes it possible to significantly increase the practical threshold for using diagnostic systems in big data sets processing.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose we have data sample $S = \langle P, T \rangle$, which consists of Q samples. Every sample is characterized by values of attributes $P_{q1}, P_{q2}, \dots, P_{qm}$ and output parameter t_q , where P_{qm} is a value of the m -th attribute of the q -th sample, $q = 1, 2, \dots, Q$, $m = 1, 2, \dots, M$; M – overall number of attributes in the set S . Then the problem of diagnosis models synthesis is to define model DM for

the sample $S = \langle P, T \rangle$, which allows to approximate the set S with acceptable error level E . Error E [2, 21–23] of recognition using synthesized model DM can be evaluated as ratio of incorrectly recognized samples number N_{er} to overall samples number Q in the sample $S = \langle P, T \rangle$:

$$E = \frac{N_{er}}{Q}.$$

2 REVIEW OF THE LITERATURE

As stated above, in the papers [7–16] methods, which enable to solve problems concerning diagnosis models synthesis, are proposed. However such methods based on sequential computing require significant time costs which makes it difficult to use such methods for diagnostic decision making process automation in practice.

Feature selection methods, which were proposed in the papers [7–9], enable to select informative feature combinations based on evolutionary [24–26] and multi-agent technologies [27] of computational intelligence. The proposed methods use aprioristic information about individual self-descriptiveness, reducing search space and decreasing time of informative feature combination selection. Nevertheless such methods require significant time costs for implementation during processing of high dimensionality data.

Productional rules extraction methods [10–12] enable to find the most significant replications $X \rightarrow Y$ from the given data samples $S = \langle P, T \rangle$. It provides improvement of cumulative properties of diagnosis models which are synthesized, as well as increases interoperability of models, decreases its dimensionality (structural and parametrical complexity), utilized storage capacity and response speed.

The method of parametrical identification of neuro-fuzzy networks based on parallel random search, which was proposed in [13–16], uses stochastic optimization for synthesized models parameters setting (parameters of membership functions and weight coefficients of neuroelements), forms initial solution set subject to training sample information (significance of feature terms according to the compactness of training set samples arrangement in the corresponding term and the degree of its effect on output parameter value). It makes it possible to move initial search points near optimal values and to accelerate optimization process.

It is necessary to develop information technology which enables to use the methods proposed in the papers [7–16] in practice for construction of distributed diagnostics systems where computationally complex stages of diagnosis models synthesis are performed on high-performance server equipment, significantly increasing the practical threshold for using diagnostic systems.

3 MATERIALS AND METHODS

As it was mentioned above, diagnosis models construction based on available data sets generally requires considerable computational resources. Therefore the developed information technology is implemented based on «client-server» architecture [28–30]. At that it is proposed to implement complex computational processes concerning training sample processing, big data storing, model

synthesis etc., on server side, organizing client access according to their access permissions. Clients are understood as people and computer systems which solve practical tasks concerning construction and application of diagnosis models.

The diagram describing main system functions of information technology front-end and back-end is presented in Fig. 1.

As it is described in Fig. 1, main functions of information system are divided between server and client sides. Client side of information system provides implementation of user interface, processing of data, entered by user (verification of data format correctness), and calculation of diagnostics object output parameter value based on the synthesized model. Server side of the system should use high-performance equipment for solving of the tasks concerning diagnosis models construction. Computationally complex processes concerning reduction of training sample dimensionality, rules extraction, synthesis and retraining of diagnosis models are processed on the server side. Besides it is proposed to use database for storage and processing of training samples from different users and also of synthesized models, extracted rules, reduced samples and other results of system operation.

For the design and development possibility of diagnosis models synthesis software system, corresponding information technology presented as the set of UML-models [31–33] is proposed. UML-models are represented as diagrams (Fig. 2–7), graphically describing structural and behavioral aspects of construction of distributed diagnostics systems, which enable to solve the tasks of training sample data reduction, rules extraction, diagnosis models construction and retraining.

Based on the main functions of the system (Fig. 1) and also on the chosen architecture of diagnosis models synthesis information technology, it is possible to define general configuration and topology of the system as the model presented in deployment diagram (Fig. 2).

System consists of three nodes: server, client computer and database server. Software implementation of intellectual methods which are used at various stages of diagnosis models synthesis (data reduction, rules extraction, model construction, model retraining) is contained on the server. Set of client computers with installed software can interact with the server. Work of database server is organized through interaction between database management system and database. Interaction of user (client computers) with database is performed indirectly through the server, where user access permissions for corresponding data sets are verified.

For representation of different user interactions with the system the model was figured as use case diagram (Fig. 3).

As can be seen from the Fig. 3, there are two user kinds which interact with the system: user and administrator. Interaction between them is realized in the use case «Registration», when administrator approves user permissions for access to the other system functions.

System user is a person which uses information technology for solving practical diagnostics tasks. User should be registered in the system to provide access of

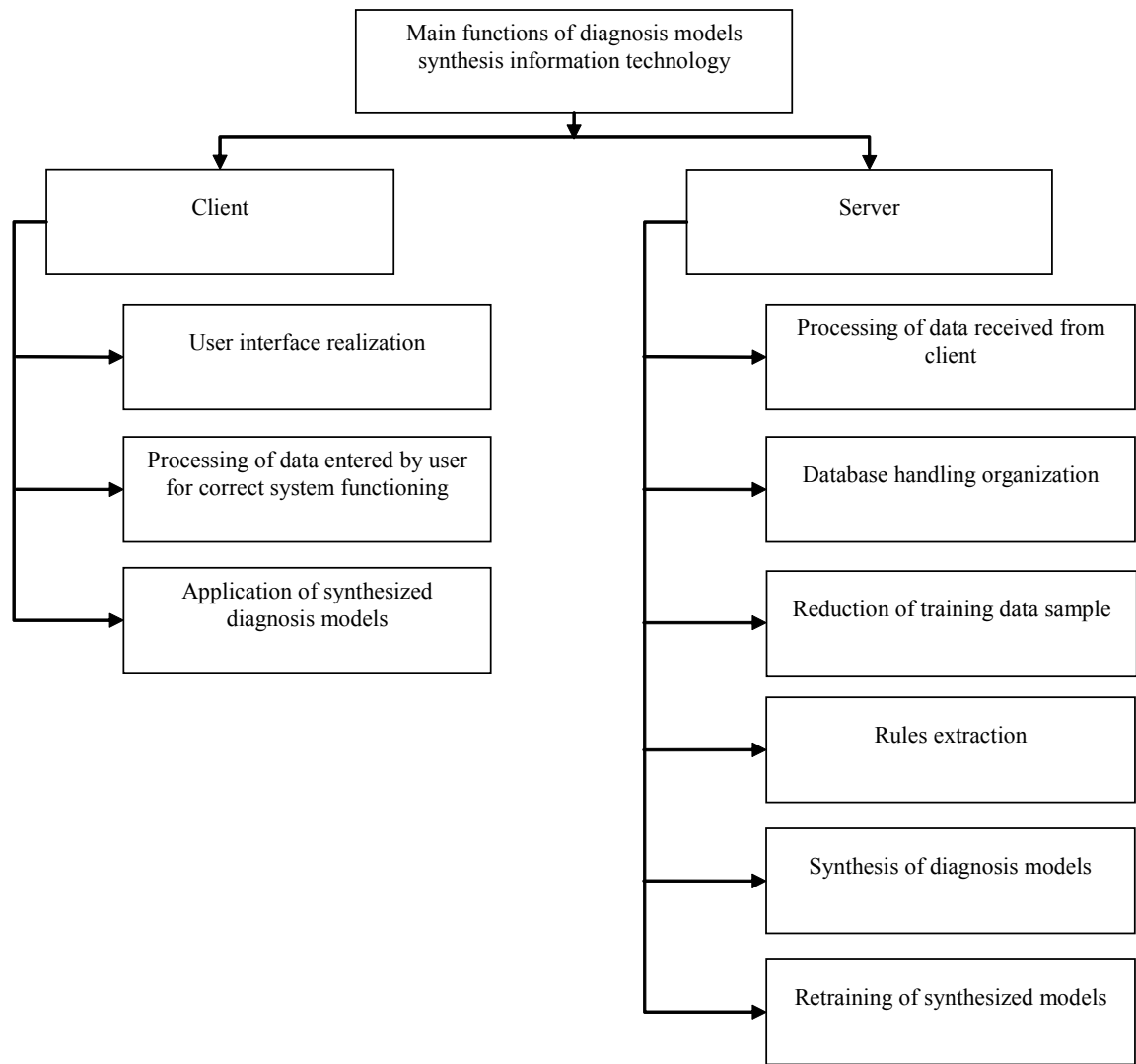


Figure 1 – Main functions of diagnosis models synthesis information technology

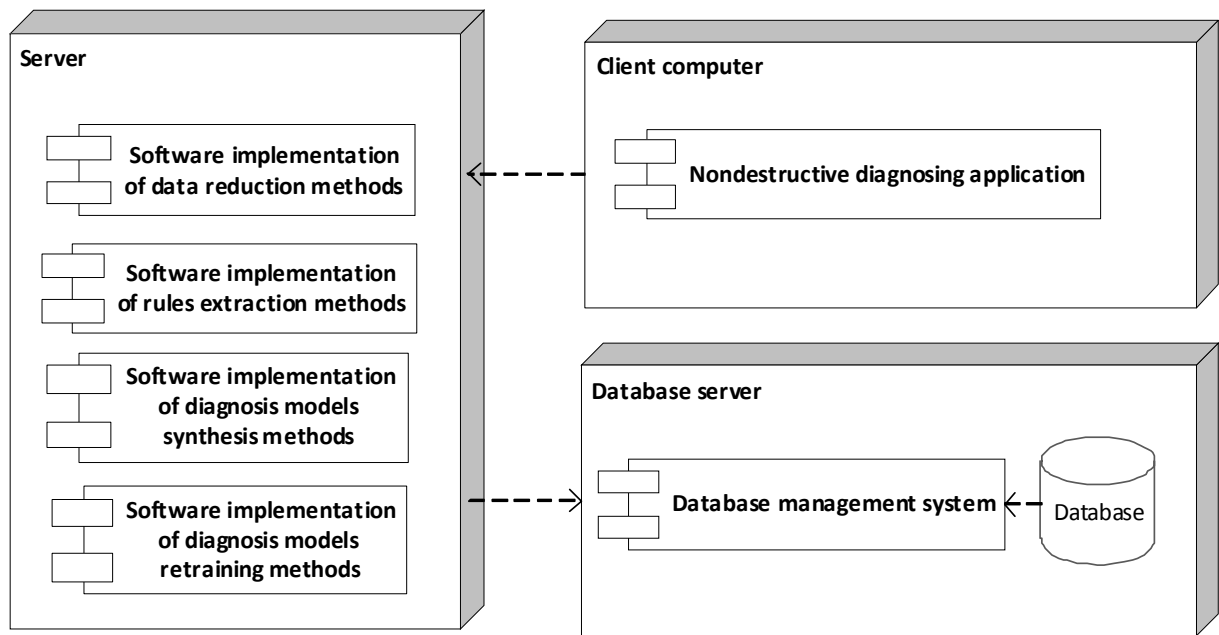


Figure 2 – Deployment diagram of diagnosis models synthesis information technology (UML 2.5 notation)



Figure 3 – Use case diagram of diagnosis models synthesis information technology

different users to the corresponding data samples. User can interact with the system during registration, input and editing of training sample, solving of diagnostics tasks (training sample dimensionality reduction, extraction of new knowledge about the dependencies which are researched, synthesis or diagnostics model retraining, diagnostics based on the synthesized model).

System administrator provides user registration through input and editing of information about users and user registration confirmation, and also provides access to the database for removal or archiving of information which is not used during long period of time and reduction in such a way of physical volume of the disk space which is in use.

With the object of modeling of logical operation and actions performed in the diagnosis models synthesis information system, the corresponding model was created and is presented in the Fig. 4 as activity diagram.

As it is presented in the Fig. 4, user enters account data at the beginning of system usage. After that system proposes to choose one of the following operating modes:

- diagnosis model synthesis – computationally complex process, which is realized on server, performing stages of training sample data reduction, rules extraction, diagnosis model construction;
- retraining of the synthesized model;

– diagnosing using the synthesized model – calculation of diagnostics object output parameter value using the model based on the measured input parameters.

Then user can continue to use the system or can quite.

The model of distribution of interaction between information system objects and users in time is represented as sequence diagram (Fig. 5–7). In the diagram the process of interaction between system components through calls of procedures, which realize corresponding use cases, is presented.

In the sequence diagram, presented in the Fig. 5, system use cases concerning user registration, input, editing of training sample and removing of irrelevant data (Fig. 3) are represented. As can be seen, not only users but also system administrator takes part in these processes.

Processes connected with preliminary processing of training sample for diagnosis model synthesis (reduction of data sample and rules extraction) are performed on user request (through client computer) on the server, and the results are saved in the database (Fig. 6). Processes, presented in the sequence diagram (Fig. 6), correspond to the system use cases “Sample reduction” and “Rules extraction” (Fig. 3), which are performed by user without administrator participation.

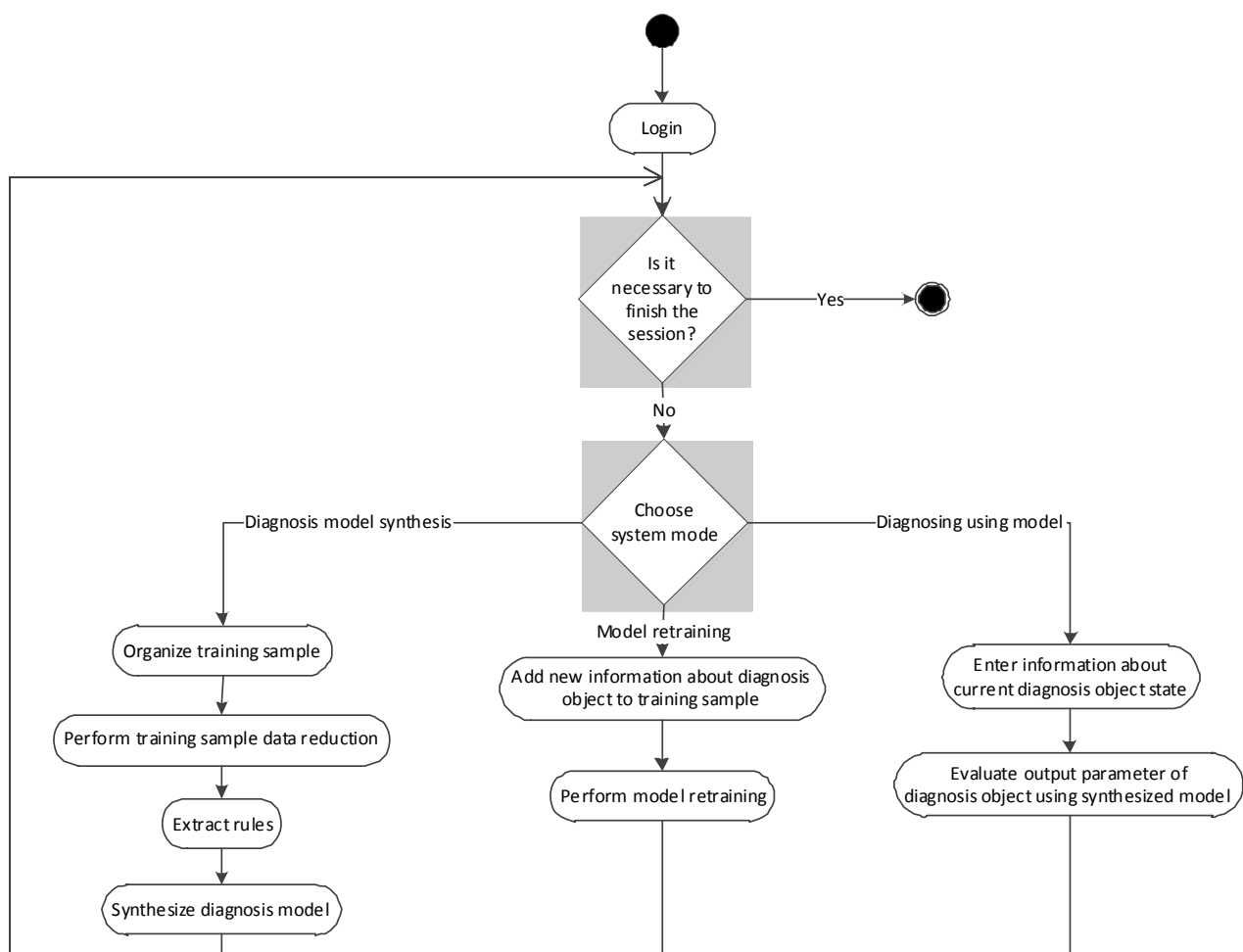


Figure 4 – Activity diagram of diagnosis models synthesis information technology

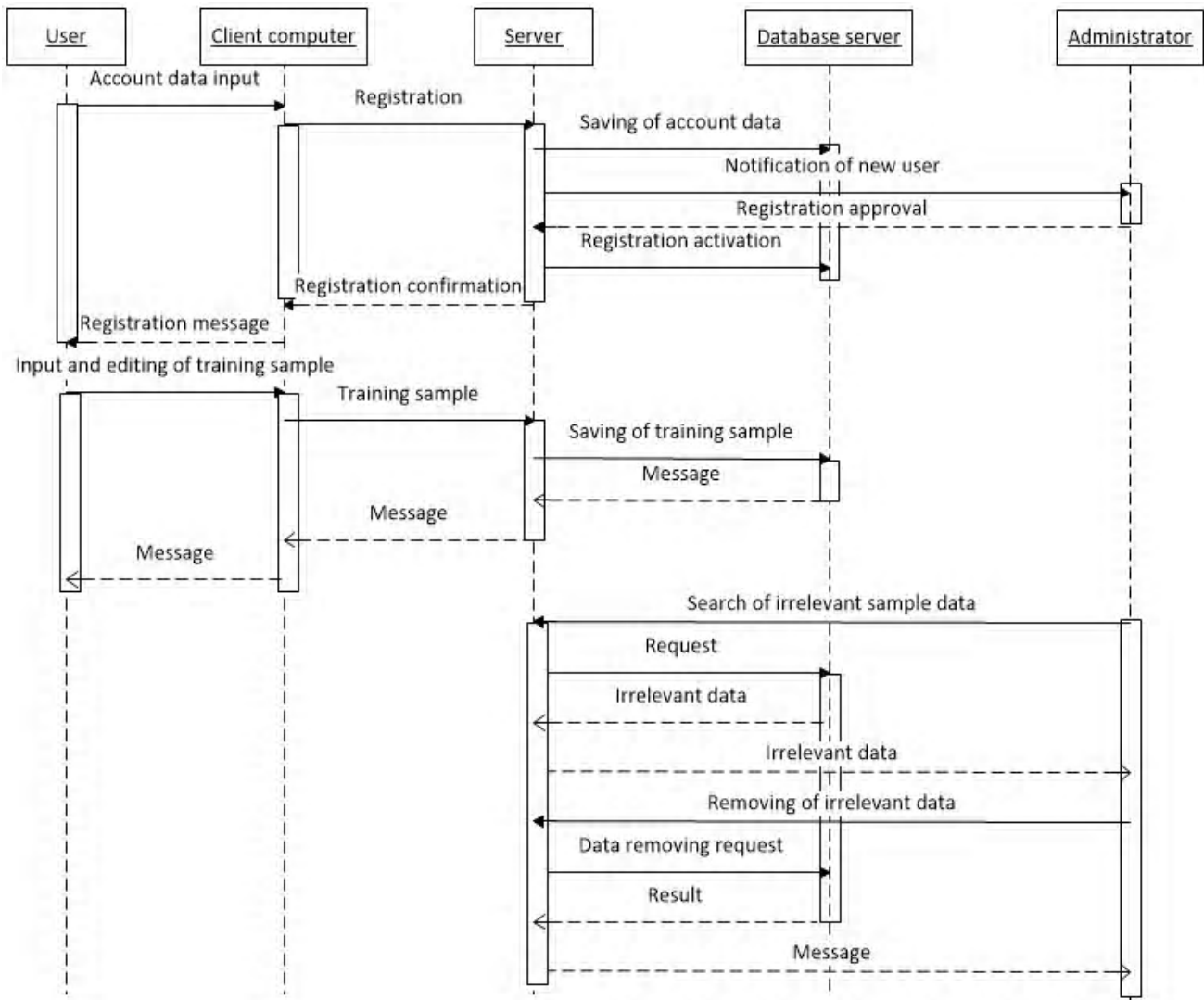


Figure 5 – Sequence diagram of user registration and training sample processing

Computationally complex processes of model synthesis and retraining are also performed on the server on user request (Fig. 7) with saving of results to the database. The result of these processes (synthesized diagnosis model) is transmitted to client computer. It enables further usage of the synthesized model for diagnosis object or process output parameter value calculation. Such approach provides diagnostics process execution on client computer without server access.

Thus the developed information technology of diagnosis models synthesis is represented by the set of diagrams (Fig. 3–8), which graphically describe structural elements of the system, and also behavioral aspects of its interaction at various stages of diagnostics objects models construction. The proposed information technology allows to construct distributed diagnostics systems, where computationally complex stages of diagnosis models synthesis are performed on the high-performance server equipment, which enables to significantly increase the practical threshold for using diagnostic systems which are capable of solving the tasks of training sample data reduction, rules extraction, diagnosis models construction and retraining.

As it was mentioned above, it is supposed to use database for storage and processing of information about objects or processes which are researched (training samples) and also for system operation results (synthesized models, extracted rules, reduced samples etc.) in the developed diagnosis models synthesis information technology. Database contains set of tables, which are connected in some way and contain information about users and samples of data representing objects and processes which are researched [34–36]. ER-model of the developed diagnosis models synthesis information technology database supposes availability of the following entities:

- Users – contains information about system users. Entity fields: id – user number (unique identifier); userLogin – login of user; userPass – password of user; info – information about user;
- Groups – reflects user groups and group data. Fields: id – primary key, name – group name, info – group description;
- UserGroups – describes correspondence between users and their groups. At that idGroup, idUser are foreign keys pointing at the corresponding entities;

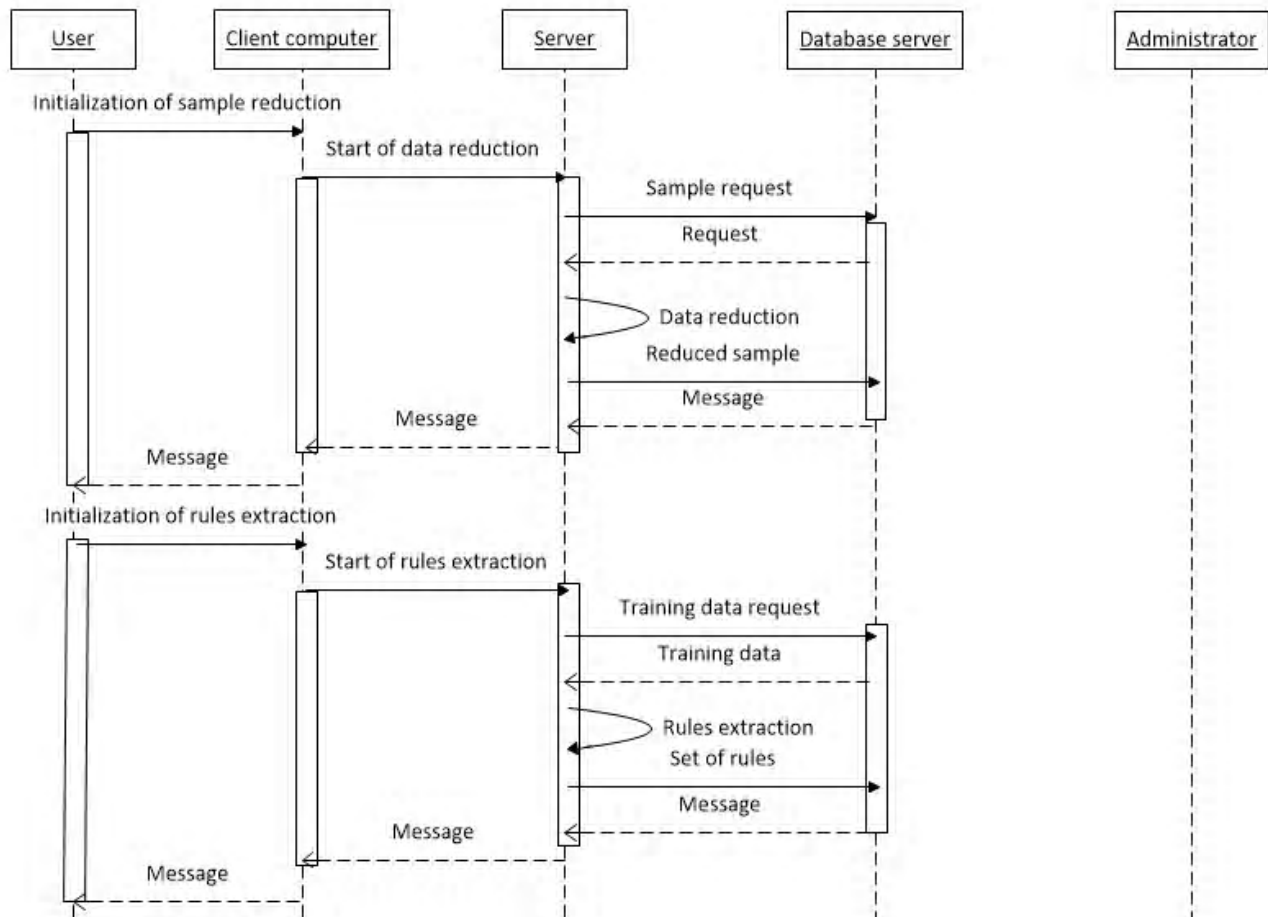


Figure 6 – Sequence diagram of training sample reduction and rules extraction

– Samples – contains information about training samples. Entity fields: id – unique identifier of the corresponding data sample; ref – reference to the file with the table which contains training sample $S = \langle P, T \rangle$ with the identifier id; info – description of training sample; idGroups – reference to the user group which has permissions for access to the sample id;

– SamplesRed – contains information about the samples which were reduced using the methods implemented in the system through the reduction of training samples from the entity Samples. Fields: id – unique identifier of reduced data sample; ref – reference to the file with the table which contains reduced sample, corresponding to the identifier id; info – description of reduced sample (particularly reduction method); idSample – identifier (foreign key) of the training sample which was the base for getting of the reduced sample;

– Rules – contains information about productional rules, which were extracted using methods implemented in the system through the processing of training samples from the entity Samples. Entity fields: id – unique identifier of rules set; ref – reference to the file which contains set of rules $P \rightarrow T$, corresponding to the identifier id; info – description of rules set (particularly rules extraction method); idSample – identifier (foreign key) of the training sample $S = \langle P, T \rangle$, which was the base for getting of the set of rules $P \rightarrow T$;

– Models – contains information about diagnosis models, which were synthesized based on the given (idSample) or reduced (idSampleRed) samples, and also on the extracted rules (idRules) using the methods which were implemented in the system. Fields: id – unique identifier of diagnosis model; ref – reference to the file which contains structure and parameters of the model with identifier id; info – description of the synthesized model (for example, synthesis method); idSample, idSampleRed, idRules – identifiers (foreign keys) of the training sample, reduced sample and rules set correspondingly, which were the base for the synthesis of the model id. At the same time if only one data set is used in the synthesis of the model id, it is necessary to use reference to the dummy record in the other entities Samples, SamplesRed, Rules as values of the other foreign keys; idParentModel – model which was used as the base for synthesis of the model id (this parameter is not required, because it is necessary only if synthesized model is retrained); idGroups – reference to the group of users having access to the implementation of the synthesized model.

Database scheme is presented in the Fig. 8.

As it is presented in the Fig. 8, connections between entities are created from foreign to primary key, and integrity control is provided by database management system tools.

The developed database supports storage and processing of information about objects and processes which are researched (training samples) and also system

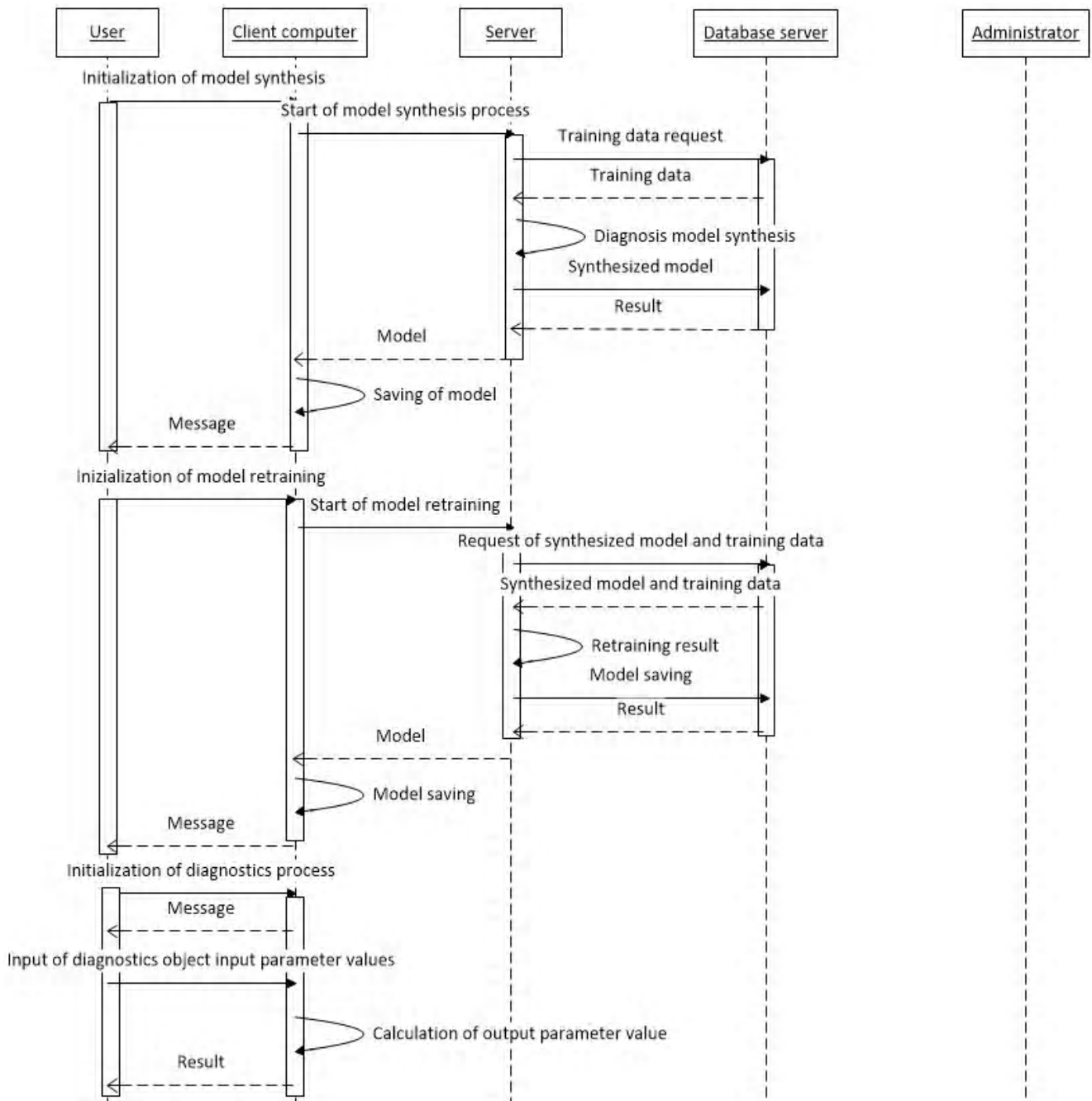


Figure 7 – Sequence diagram of synthesis and usage of diagnosis models

operation results (structure and parameters of synthesized models, extracted rules, reduced samples etc.) in the developed diagnosis models synthesis information technology.

4 EXPERIMENTS

For efficiency examination of the proposed information technology corresponding software system for diagnosis models synthesis was developed.

The software was developed based on Java programming language and architecture pattern MVC. Graphic part (View) was implemented using SWING package. The application has the following class structure. Class Model represents classes which describe entities of database

ER-model (Fig. 8). Fields of these classes are identical with fields of database tables. It enables to apply modern programming frameworks, for example, Hibernate. Every row of database table can be got as one class instance in the application. At that several table rows form collection. Classes View are frames (forms, dialog boxes), which contain graphical user interface and allow user to interact with the application. Classes Controller connect to the server, realize event service and handling of user actions. Class LoginController enables to connect to the server using login and password or to register (to create user account which is inserted to the database). MainController enables to handle user instructions of calling appropriate forms. It sends instruction to the server and gets permission (according to

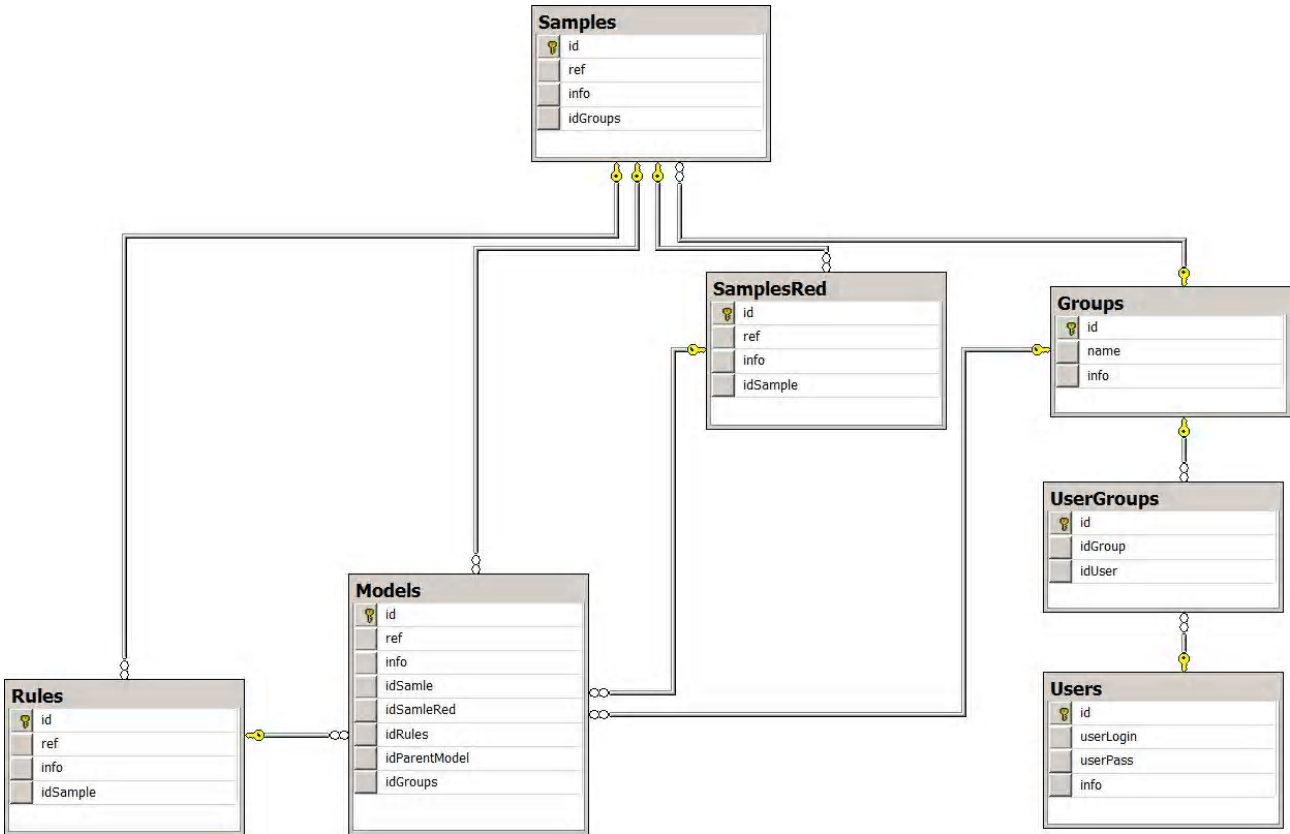


Figure 8 – Diagnosis models synthesis information technology database scheme

user access permissions) to call appropriate function, for example, diagnostics or synthesis. Class WorkWithSampleController gives methods, which enable to load sample from the file with the following sending of it to the server through ConnectionController. Besides it enables to edit sample and to reduce it. Class SynthesisController downloads samples and synthesis methods which are available for user from database and also performs models synthesis. Class AdditionalTrainingController gives methods, which get models and retraining methods available for user from database, besides it enables to extend sample and to retrain model. DiagnosisController enables to access diagnosis models, to input model parameters and to diagnose with the following saving of the result to the file.

Numerical experiments on the efficiency of the proposed information technology and the corresponding software system were performed by solving of different practical diagnostics problems [37–39], particularly the task of hypertensive patient health status prediction [37]. Applying

the developed mathematical (methods [7–16] and the proposed information technology) and software support the tasks of learning sample reduction (informative attributes identification and production rules extraction) and diagnosis models synthesis were solved sequentially. Numerical results of the developed information technology application for neuro-fuzzy diagnosis models definition using the proposed parallel method based on stochastic computation [24–27, 40] and island method of evolutionary search (Island Genetic Algorithm, IGA) [24–26] are presented. Experiments were executed on 1, 2, 4, 8 and 16 cores of CPU cluster [41] as well as on graphic engine GPU [42].

5 RESULTS

Experimental results using CPU cluster are presented in the table 1.

The results of experiments using graphic engine GPU NVIDIA GTX 285+, which was programmed based on CUDA technology [43], are presented in the table 2. Speedup of computational process was measured regarding one CPU.

Table 1 – The results of experiments using CPU cluster

CPU number	T_p, s	T_{IGA}, s	S_p	S_{IGA}	Overhead _p , s	Overhead _{IGA} , s	E_p	E_{IGA}
1	101.18	128.5	1	1	0	0	1	1
2	57.67	74.53	1.75	1.72	8.07	11.92	0.88	0.86
4	30.61	39.19	3.31	3.28	6.43	8.62	0.83	0.82
8	18.09	23.61	5.59	5.44	7.78	11.1	0.7	0.68
16	11.45	15.34	8.84	8.38	9.27	13.96	0.55	0.52

Table 2 – The results of experiments realized on GPU

Number of GPU threads	T_p , s	T_{IGA} , s	S_p	S_{IGA}	Overhead _p , s	Overhead _{IGA} , s
60	39.8	60.22	2.54	2.13	4.46	7.05
80	33.49	50.86	3.02	2.53	4.09	6.41
100	30.33	46.18	3.34	2.78	4.0	6.23
120	28.89	44.25	3.5	2.9	4.13	6.64
140	28.55	44.7	3.54	2.87	4.37	6.93
160	29.05	45.72	3.48	2.81	4.74	7.73
180	30.29	47.96	3.34	2.68	5.24	8.63
200	31.0	48.92	3.26	2.63	5.7	9.15
240	31.26	51.37	3.24	2.5	6.56	13.36

6 DISCUSSION

As it is presented in the tables 1 and 2, the proposed technology of diagnosis models synthesis allows to synthesize models with productivity similar to the models described in [3, 10, 13]. Thus, the method proposed in [13] due to application of new solution search operators modifications decreases number of processor operations, including communicatory costs, and so random search is realized quicker than in the IGA method [24–26] (for example, time of model synthesis for 16 cores of CPU equaled 11.45 s for the proposed method and 15.34 s for IGA method). At that the proposed diagnosis models synthesis technology provides construction of neuro-fuzzy models with acceptable accuracy. That is productivity rise is not provided due to decrease of diagnosis models approximating and resumptive properties level.

The efficiency of CPU cluster, which was used by the method proposed in [13] and the IGA method, is acceptable (particularly parallel system efficiency reaches 0.7 for the proposed method and 0.68 for the IGA method using 8 cores of CPU). Application of more than 8 cores of CPU isn't justified, because it greatly decreases system efficiency due to transmission and synchronization. If number of GPU threads rises above 140, speedup of computing process will decrease, because overheads considerably rise and at the same time threads begin to stand.

Thus diagnosis models synthesis technology which was proposed in the paper allows to efficiently apply modern parallel computing architectures for getting the result with appropriate accuracy in acceptable time. Usage of cross-platform language considerably extends scope of the proposed technology.

CONCLUSIONS

In this paper actual problem of diagnosis models synthesis process automation was solved.

Scientific novelty of the paper is in the proposed information technology of diagnosis models synthesis, which consists of the set of methods and diagrams which connect methods with each other, graphically describe structural elements of diagnostics systems and also behavioral aspects of its communication at various stages of diagnostics objects models construction. The proposed information technology enables to construct distributed diagnostics systems where computationally complex stages of diagnosis model synthesis are performed on high-performance server equipment, which makes it possible to significantly increase the practical threshold for using diagnostic systems in big data sets processing, solving the

tasks of training sample data reduction, rules extraction, building and retraining of diagnosis models.

Practical significance of the paper consists in the solution of practical problems. Experimental results showed that the proposed information technology allowed to significantly increase the speed of diagnosis models synthesis process and it could be used in practice for solving of practical tasks concerning diagnostics and nondestructive product quality control.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed as part of research work “Methods and means of computational intelligence and parallel computing for processing large amounts of data in diagnostic systems” (number of state registration 0116U007419) of software tools department of Zaporizhzhia National Technical University with partial support of international project “Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications” (ALIOT, Ref. No. 573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP) co-funded by the Erasmus+ programme of the European Union.

REFERENCES

1. Price C. Computer based diagnostic systems / C. Price. – London : Springer, 1999. – 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
2. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing / S. Bow. – New York : Marcel Dekker Inc., 2002. – 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
3. Encyclopedia of machine learning / [eds. C. Sammut, G. I. Webb]. – New York: Springer, 2011. – 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
4. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms / J. C. Bezdek. – N.Y.: Plenum Press, 1981. – 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1.
5. Sobhani-Tehrani E. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach / E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani. – New York: Springer, 2009. – 265 p. – (Lecture notes in control and information sciences ; № 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.
6. Bodyanskiy Ye. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova // Information Sciences. – 2013. – Vol. 220. – P. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
7. Subbotin S. The Dimensionality Reduction Methods Based on Computational Intelligence in Problems of Object Classification and Diagnosis / S. Subbotin, A. Oliynyk // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 543. – P. 11–19. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_2.
8. Subbotin S. The Sample and Instance Selection for Data Dimensionality Reduction / S. Subbotin, A. Oliynyk // Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 543. – P. 97–103. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_13.

9. Oliinyk A. A. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition / A. A. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, O. Blagodariov // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2017. – № 2. – С. 82–92.
10. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection / A. Oliinyk // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2016. – № 1. – P. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
11. Oliinyk A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*. – 2015. – Vol. 24, № 1. – P. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
12. Oliinyk A. A stochastic approach for association rule extraction / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // *Pattern Recognition and Image Analysis*. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 419–426. DOI: 10.1134/S1054661816020139.
13. Oliinyk A. O. Using Parallel Random Search to Train Fuzzy Neural Networks / A. O. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, S. A. Subbotin // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2014. – Vol. 48, Issue 6. – P. 313–323. DOI: 10.3103/S0146411614060078.
14. Oliinyk A. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing / A. Oliinyk, S. Skrupsky, S. Subbotin, O. Blagodariov, Ye. Gofman // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2016. – № 4. – P. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
15. The model for estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations / [A. A. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, S. A. Subbotin] // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2017. – № 1. – С. 142–152. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-16.
16. Oliinyk A. Parallel Computer System Resource Planning for Synthesis of Neuro-Fuzzy Networks / A. Oliinyk, S. Skrupsky, S. Subbotin // *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2017. – Vol. 543. – P. 88–96. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_12.
17. David Kirk Programming Massively Parallel Processors 3rd Edition. A Hands-on Approach / Kirk David, Hwu Wen-mei, 2016. – 576 p. ISBN: 9780128119860.
18. A comparison of approaches to large-scale data analysis / [Andrew Pavlo, Erik Paulson, Alexander Rasint et al] // *International Conference on Management of Data*. – 2009. – P. 165–178. DOI: 10.1145/1559845.1559865
19. Luiz Andre Barroso The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines / Luiz Andre Barroso, Urs Hoelzle // *Synthesis Lectures on Computer Architecture*. – 2009. – Volume 4, Issue 1. – P. 154. DOI: 10.2200/S00193ED1V01Y200905CAC006
20. Zaigham Mahmood Data Science and Big Data Computing: Frameworks and Methodologies / Zaigham Mahmood // *Springer International Publishing*. – 2016. – P. 332. DOI: 10.1007/978-3-319-31861-5
21. Salfner F. A survey of online failure prediction methods / F. Salfner, M. Lenk, M. Malek // *ACM computing surveys*. – 2010. – Vol. 42, Issue 3. – P. 1–42. DOI: 10.1145/1670679.1670680.
22. Shin Y. C. Intelligent systems : modeling, optimization, and control / C. Y. Shin, C. Xu. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – 456 p. DOI: 10.1201/9781420051773.
23. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
24. Gen M. Genetic algorithms and engineering design / M. Gen, R. Cheng. – New Jersey : John Wiley & Sons, 1997. – 352 p. DOI: 10.1002/9780470172254.
25. Yu X. Introduction to Evolutionary Algorithms (Decision Engineering) / X. Yu, M. Gen. – London : Springer, 2010. – 418 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5.
26. Ayala H. V. Cascaded evolutionary algorithm for nonlinear system identification based on correlation functions and radial basis functions neural networks / H. V. Ayala, L. D. Coelho // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2016. – Vol. 68, Issue 6. – P. 376–378. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.05.022.
27. Abraham A. Swarm intelligence in data mining / A. Abraham, G. Grosan. – Berlin : Springer, 2006. – 267 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34956-3.
28. Haroon Shakirat Oluwatosin Client-Server Model / Haroon Shakirat Oluwatosin // *IOSR Journal of Computer Engineering*. – 2014. – Volume 16, Issue 1. – P. 67–71. DOI: 10.9790/0661-16195771
29. Taylor R.N. Software Design and Architecture. The once and future focus of software engineering / R.N. Taylor, A. van der Hoek // *International Conference on Software Engineering*, 2007. – P. 226–243. DOI: 10.1109/FOSE.2007.21
30. An object-oriented architecture for extensible structural design software / [Rory Clune, Jerome J. Connor, John A. Ochsendorf, Denis Kelliher] // *Computers & Structures*. – 2012. – P. 1–17. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.02.002
31. Bernd Bruegge Object-Oriented Software Engineering Using UML, Patterns, and Java (3rd Edition) / Bernd Bruegge, Allen H. Dutoit. – Pearson, 2009. – 800 p. ISBN: 978-0136061250.
32. Qing Li Modeling and Analysis of Enterprise and Information Systems: From Requirements to Realization / Qing Li, Yu-Liu Chen. – Springer Berlin Heidelberg, 2009. – 405 p. DOI: 10.1007/978-3-540-89556-5
33. Hassan Gomaa Designing Software Product Lines with UML 2.0: From Use Cases to Pattern-Based Software Architectures / Hassan Gomaa. – Springer, 2006. – 440 p. DOI: 10.1109/SPLINE.2006.1691600
34. Making database systems usable / [H. V. Jagadish, Adriane Chapman, Aaron Elkiss, et al] // *International Conference on Management of Data*. – 2007. – P. 13–24. DOI: 10.1145/1247480.1247483
35. Sumathi S. Fundamentals of Relational Database Management Systems / S. Sumathi, S. Esakkirajan. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – 792 p. DOI: 10.1007/978-3-540-48399-1
36. Lu Qin Keyword search in databases: the power of RDBMS / Lu Qin, Jeffrey Xu Yu, Lijun Chang // *International Conference on Management of Data*. – 2009. – P. 681–693. DOI: 10.1145/1559845.1559917
37. Subbotin S. Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence / S. Subbotin, A. Oliinyk, S. Skrupsky // *Information and Digital Technologies : International Conference IDT'2015, Zilina, 7–9 July 2015 : proceedings of the conference*. – Zilina : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. – P. 336–344. DOI: 10.1109/DT.2015.7222996.
38. Oliinyk A. O. Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search / A. O. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, S. A. Subbotin // *Automatic Control and Computer Sciences*. – 2015. – Vol. 49, Issue 1. – P. 11–20. DOI: 10.3103/S0146411615010071.
39. Intelligent information technology of automated diagnostic and pattern recognition systems development: Monograph / [S. A. Subbotin, A. Oliinyk, Ye. Gofman et al]. – Kharkov : “Company Smith”, 2012. – 317 p. (In russian).
40. Smith S. Genetic and Evolutionary Computation: Medical Applications / S. Smith, S. Cagnoni. – Chichester : John Wiley & Sons, 2011. – 250 p. DOI: 10.1002/9780470973134.
41. Michael Creel Multi-core CPUs, Clusters, and Grid Computing: A Tutorial / Michael Creel, William L. Goffe // *Computational Economics*, 2008. – Volume 32, Issue 4. – P. 353–382. DOI: 10.1007/s10614-008-9143-5
42. Kshitij Gupta A study of Persistent Threads style GPU programming for GPGPU workloads / Kshitij Gupta, Jeff A. Stuart, John D. Owens // *Parallel Computing*. – 2012. – P. 1–14. DOI: 10.1109/InPar.2012.6339596
43. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5. Santa Clara : NVIDIA Corporation, 2014. – 117 p.

Article was submitted 28.08.2017.
After revision 15.10.2017.

Олійник А. О.¹, Субботін С. О.², Скруський С. Ю.³, Льовкін В. М.⁴, Зайко Т. А.⁵

¹Канд.техн.наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

²Д-р техн. наук, завідувач кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

³Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

⁴Канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

⁵Канд. техн.наук, ст. викладач кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ СИНТЕЗУ ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Актуальність. Вирішено задачу автоматизації процесу синтезу діагностичних моделей при обробці великих масивів даних на основі паралельних обчислень. Об'єкт дослідження – процес синтезу діагностичних моделей. Предмет дослідження – методи та інформаційні технології синтезу діагностичних моделей.

Мета роботи полягає в створенні інформаційної технології синтезу діагностичних моделей.

Метод. Запропоновано інформаційну технологію синтезу діагностичних моделей, що представляє собою сукупність діаграм, які описують у графічному вигляді структурні елементи системи, а також поведінкові аспекти їх взаємодії на різних етапах побудови моделей об'єктів діагностування. Запропонована інформаційна технологія дозволяє виконувати побудову розподілених систем діагностування, в яких обчислювально складні етапи синтезу діагностичних моделей виконуються на високопродуктивному серверному обладнанні, що дозволяє істотно підвищити практичний поріг використання систем діагностування при обробці великих масивів даних, здатних вирішувати завдання редукції даних навчальної вибірки, видобування правил, побудови і донавчання діагностичних моделей.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану інформаційну технологію і дозволяє синтезувати діагностичні моделі на основі заданих наборів даних.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованої інформаційної технології і дозволяють рекомендувати її для використання на практиці при обробці великих масивів даних для технічного і біомедичного діагностування. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в модифікації розробленої технології шляхом впровадження в неї інших методів синтезу діагностичних моделей.

Ключові слова: вибірка даних, діагностування, видобування правил, відбір ознак, паралельні обчислення, синтез моделей.

Олейник А. А.¹, Субботин С. А.², Скруцкий С. Ю.³, Левкин В. Н.⁴, Зайко Т. А.⁵

¹Канд.техн.наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

²Д-р техн. наук, заведующий кафедрой программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

³Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

⁴Канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

⁵Канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СИНТЕЗА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Актуальность. Решена задача автоматизации процесса синтеза диагностических моделей при обработке больших массивов данных на основе параллельных вычислений. Объект исследования – процесс синтеза диагностических моделей. Предмет исследования – методы и информационные технологии синтеза диагностических моделей.

Цель работы заключается в создании информационной технологии синтеза диагностических моделей.

Метод. Предложена информационная технология синтеза диагностических моделей, представляющая собой совокупность диаграмм, описывающих в графическом виде структурные элементы системы, а также поведенческие аспекты их взаимодействия на различных этапах построения моделей объектов диагностирования. Предложенная информационная технология позволяет выполнять построение распределенных систем диагностирования, в которых вычислительно сложные этапы синтеза диагностических моделей выполняются на высокопродуктивном серверном оборудовании, что позволяет существенно повысить практический порог использования систем диагностирования при обработке больших массивов данных, способных решать задачи редукции данных обучающей выборки, извлечения правил, построения и дообучения диагностических моделей.

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную информационную технологию и позволяет синтезировать диагностические модели на основе заданных наборов данных.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенной информационной технологии и позволяют рекомендовать ее для использования на практике при обработке больших массивов данных для технического и биомедицинского диагностирования. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в модификации разработанной технологии путем внедрения в нее других методов синтеза диагностических моделей.

Ключевые слова: выборка данных, диагностирование, извлечение правил, отбор признаков, параллельные вычисления, синтез моделей.

REFERENCES

- Price C. Computer based diagnostic systems. London, Springer, 1999, 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
- Bow S. Pattern recognition and image preprocessing. New York, Marcel Dekker Inc., 2002, 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
- Sammur C., Webb G. I. eds. Encyclopedia of machine learning. New York, Springer, 2011, 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
- Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. N.Y., Plenum Press, 1981, 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1.
- Sobhani-Tehrani E., Khorasani K. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach. New York, Springer, 2009, 265 p. (Lecture notes in control and information sciences ; № 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.
- Bodyanskiy Ye., Vynokurova O. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification, Information Sciences, 2013, Vol. 220, pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
- Subbotin S., Oliynyk A. The Dimensionality Reduction Methods Based on Computational Intelligence in Problems of Object Classification and Diagnosis, *Recent Advances in Systems, Control*

- and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 543, pp. 11–19. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_2.
8. Subbotin S., Oliinyk A. The Sample and Instance Selection for Data Dimensionality Reduction, *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 543, P. 97–103. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_13.
9. Oliinyk A. A., Skrupsky S. Yu., Shkaruplyo V. V., Blagodariov O. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 82–92.
10. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 1, pp. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
11. Oliinyk A., Subbotin S. A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2015, Vol. 24, No. 1, pp. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
12. Oliinyk A., Subbotin S. A. A stochastic approach for association rule extraction, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, Vol. 26, No. 2, pp. 419–426. DOI: 10.1134/S1054661816020139.
13. Oliinyk A. O., Skrupsky S. Yu., Subbotin S. A. Using Parallel Random Search to Train Fuzzy Neural Networks, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, Vol. 48, Issue 6, pp. 313–323. DOI: 10.3103/S0146411614060078.
14. Oliinyk A., Skrupsky S., Subbotin S., Blagodariov O., Gofman Ye. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 4, pp. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
15. Oliinyk A. A. Skrupsky S. Yu., Shkaruplyo V. V., Subbotin S. A. The model for estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 1, pp. 142–152. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-16.
16. Oliinyk A., Skrupsky S., Subbotin S. Parallel Computer System Resource Planning for Synthesis of Neuro-Fuzzy Networks, *Recent Advances in Systems, Control and Information Technology. Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 543, pp. 88–96. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_12.
17. David Kirk, Hwu Wen-mei Programming Massively Parallel Processors 3rd Edition. A Hands-on Approach, 2016, 576 p. ISBN: 9780128119860.
18. Andrew Pavlo, Erik Paulson, Alexander Rasin, Daniel J. Abadi, David J. DeWitt A comparison of approaches to large-scale data analysis, *International Conference on Management of Data*, 2009, pp. 165–178. DOI: 10.1145/1559845.1559865
19. Luiz Andre Barroso, Urs Hoelzle The Datacenter as a Computer: An Introduction to the Design of Warehouse-Scale Machines, *Synthesis Lectures on Computer Architecture*, 2009, Volume 4, Issue 1, pp. 154. DOI: 10.2200/S00193ED1V01Y200905CAC006
20. Zaigham Mahmood Data Science and Big Data Computing: Frameworks and Methodologies, *Springer International Publishing*, 2016, P. 332. DOI: 10.1007/978-3-319-31861-5
21. Salfner F., Lenk M., Malek M. A survey of online failure prediction methods, *ACM computing*, 2010, Vol. 42, Issue 3, pp. 1–42. DOI: 10.1145/1670679.1670680.
22. Shin Y. C., Xu C. Intelligent systems : modeling, optimization, and control. Boca Raton, CRC Press, 2009, 456 p. DOI: 10.1201/9781420051773.
23. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. New York, Springer, 2006, 738 p.
24. Gen M., Cheng R. Genetic algorithms and engineering design. New Jersey, John Wiley & Sons, 1997, 352 p. DOI: 10.1002/9780470172254.
25. Yu X., Gen M. Introduction to Evolutionary Algorithms (Decision Engineering). London, Springer, 2010, 418 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5.
26. Ayala H. V., Coelho L. D. Cascaded evolutionary algorithm for nonlinear system identification based on correlation functions and radial basis functions neural networks, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, Vol. 68, Issue 6, pp. 376–378. DOI: 10.1016/j.ymssp.2015.05.022.
27. Abraham A., Grosan G. Swarm intelligence in data mining. Berlin, Springer, 2006, 267 p. DOI: 10.1007/978-3-540-34956-3.
28. Haroon Shakirat Oluwatosin Client-Server Model, *IOSR Journal of Computer Engineering*, 2014, Volume 16, Issue 1, pp. 67–71. DOI: 10.9790/0661-16195771
29. Taylor R. N., A. van der Hoek Software Design and Architecture. The once and future focus of software engineering, *International Conference on Software Engineering*, 2007, pp. 226–243. DOI: 10.1109/FOSE.2007.21
30. Rory Clune, Jerome J. Connor, John A. Ochsendorf, Denis Kelliher An object-oriented architecture for extensible structural design software, *Computers & Structures*, 2012, pp. 1–17. DOI: 10.1016/j.compstruc.2012.02.002
31. Bernd Bruegge, Allen H. Dutoit. Object-Oriented Software Engineering Using UML, Patterns, and Java (3rd Edition). Pearson, 2009, 800 p. ISBN: 978-0136061250.
32. Qing Li, Chen Yu-Liu Modeling and Analysis of Enterprise and Information Systems: From Requirements to Realization. Springer Berlin Heidelberg, 2009, 405 p. DOI: 10.1007/978-3-540-89556-5
33. Hassan Gomaa Designing Software Product Lines with UML 2.0: From Use Cases to Pattern-Based Software Architectures. Springer, 2006, 440 p. DOI: DOI: 10.1109/SPLINE.2006.1691600
34. Jagadish H. V., Adriane Chapman, Aaron Elkiss, Magesh Jayapandian, Yunyao Li Making database systems usable, *International Conference on Management of Data*, 2007, pp. 13–24. DOI: 10.1145/1247480.1247483
35. Sumathi S., Esakkirajan S. Fundamentals of Relational Database Management Systems. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, 792 p. DOI: 10.1007/978-3-540-48399-1
36. Lu Qin, Jeffrey Xu Yu, Lijun Chang Keyword search in databases: the power of RDBMS, *International Conference on Management of Data*, 2009, pp. 681–693. DOI: 10.1145/1559845.1559917
37. Subbotin S., Oliinyk A., Skrupsky S. Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence, *Information and Digital Technologies : International Conference IDT'2015, Zilina, 7–9 July 2015 : proceedings of the conference*. Zilina, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015, pp. 336–344. DOI: 10.1109/DT.2015.7222996.
38. Oliinyk A. O., Skrupsky S. Yu., Subbotin S. A. Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, Vol. 49, Issue 1, pp. 11–20. DOI: 10.3103/S0146411615010071.
39. Subbotin S. A., Oliinyk A., Gofman Ye., Zaitsev S., Oliinyk O. Intelligent information technology of automated diagnostic and pattern recognition systems development : Monograph. Kharkov, “Company Smith”, 2012, 317 p. (In russian).
40. Smith S., Cagnoni S. Genetic and Evolutionary Computation: Medical Applications. Chichester, John Wiley & Sons, 2011, 250 p. DOI: 10.1002/9780470973134.
41. Michael Creel, William L. Goffe Multi-core CPUs, Clusters, and Grid Computing: A Tutorial, *Computational Economics*, 2008, Volume 32, Issue 4, pp. 353–382. DOI: 10.1007/s10614-008-9143-5
42. Kshitij Gupta, Jeff A. Stuart, John D. Owens A study of Persistent Threads style GPU programming for GPGPU workloads, *Parallel Computing*, 2012, pp. 1–14. DOI: 10.1109/InPar.2012.6339596
43. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5. Santa Clara, NVIDIA Corporation, 2014, 117 p.

NO-REFERENCE QUANTITATIVE ASSESSMENT OF GENERALIZED CONTRAST FOR COMPLEX IMAGES

Context. Nowadays the task of automatically measuring of image quality in real time is extremely relevant for the vast majority of practical applications. No-reference quantitative assessment of image quality is one of the most pressing and difficult problems of image processing. Generalized contrast is the most important quantitative characteristic which determines the objective quality of the image. Currently, the development of new effective methods of no-reference measuring of generalized contrast for complex image in automatic mode which have the level of computing costs, which are acceptable to implement the processing in real time, is one of the most urgent tasks of image pre-processing.

Objective. Development of new histogram-based method for no-reference measurement of generalized contrast of complex images on the basis of the mean value for all contrast values of all pairs of image elements (objects and background) for various definitions of contrast kernel.

Method. Analysis of known approaches to measurement of a local contrast of the image elements, of known methods of the quantitative assessment of generalized contrast of complex images as well of the results of experimental research for a series of complex real and test images allowed to reveal inherent patterns (accordance to basic requirements to the definition of contrast, the nature and the dynamic of contrast changes at the linear transformations of the brightness scale), which are manifested depending on the use of the different definitions of the contrast kernels and the metrics of generalized contrast of images.

Results. New histogram-based method for no-reference measurement of generalized contrast for complex images is proposed. No-reference contrast metrics for the histogram-based measuring of generalized contrast of complex images on the basis of the average contrast of image elements for different definitions of contrast kernel is proposed.

Conclusions. Proposed no-reference metrics on the basis of the average contrast of image elements for proposed contrast kernels allow providing accurate quantitative assessment of generalized contrast of the real complex images and enable to evaluate (predict) with reasonable accuracy the perceived image quality at carrying out of subjective (qualitative) expert estimates.

Keywords: image processing, image quality assessment, contrast measurement, no reference metric, generalized contrast, complex image, histogram.

NOMENCLATURE

$C(L_1, L_2)$ is a contrast for two contiguous image elements;

C_{ave} is an averaged value of contrast of current image;

C_{gen} is a value of the generalized contrast of current image;

$C^N(L_1, L_2)$ is a weighted contrast of Nesteruk for two image elements;

$C^{wei}(L_1, L_2)$ is a weighted contrast of image elements;

$C^{rel_1}(L_1, L_2)$ is a relative contrast of image elements;

$C^{rel_2}(L_1, L_2)$ is a relative contrast of image elements;

$C^{Vrb}(L_1, L_2)$ is an absolute contrast of Vorobel for two image elements;

$C^{VB}(L_1, L_2)$ is an absolute contrast of Vorobel and Berehulyak for two image elements;

$C^Y(L_1, L_2)$ is a linear contrast of image elements;

$C_{gen}^N(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Nesteruk for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^{wei}(L_0)$ is a generalized contrast for weighted contrast kernel for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^V(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Vorobel for adaptation level L_0 ;

$C_{gen}^{VB}(L_0)$ is a generalized contrast for contrast kernel of Vorobel and Berehulyak;

C_{ave}^N is an averaged contrast for weighted contrast kernel of Nesteruk;

C_{ave}^{wei} is an averaged contrast for weighted contrast kernel;

C_{ave}^V is an averaged contrast for absolute contrast kernel of Vorobel;

C_{ave}^{VB} is an averaged contrast for absolute contrast kernel of Vorobel and Berehulyak;

C_{ave}^Y is an averaged contrast for linear contrast kernel;

$f(C, p(L))$ is a function of averaging of contrast values of image elements;

$g(C, r(C))$ is a function of generalized contrasts of image elements;

$L(S)$ is a function of brightness values of pixels of image X ;

L is an average value of brightness L of image pixels;

L_0 is a value of the adaptation level for current image;

L_i is a value of brightness of i -th element of image X ;

L_{min} is a minimum brightness values of elements of initial image X ;

L_{max} is a maximum brightness values of elements of initial image X ;

$LMAX$ is a maximum possible value of brightness L ;

$p(L_i)$ is a density distribution function of values of brightness L ;

$p(L_i, L_j)$ two-dimensional probability density function of values of brightness L ;

$r(C)$ is a density distribution of values of contrast of image elements;

S is a closed set of pixels of initial image X ;

S_i is a nonempty connected i -th subsets of pixels of initial image X ;

$X(S, L)$ is the initial image.

INTRODUCTION

Currently, the development of new effective techniques of image quality assessment is one of the most urgent and important tasks in imaging, pre-processing and analysis of images [1, 2].

The object of study is the process of contrast measurement for image quality assessment.

The image quality usually defined on the basis of main objective characteristics (parameters) of current image [3, 4]. The main characteristic which defines the objective quality of image is its generalized contrast [3, 5]. At present, however, quantitative assessment and measurement of values of generalized contrast for complex images are not defined uniquely in the literature.

The generalized contrast of complex images is usually defined basing on the values of quantitative assessments of contrast for all individual pairs of image elements (objects and background) [6, 7]. Contrast of two image elements (of two objects or an object and the background) is a dimensionless function, which characterizes the difference between the values of their brightness [7].

The choice of contrast definition of image elements (of contrast kernel) is very important problem and appreciably defines the effectiveness (the accuracy) of measurement of the generalized contrast of complex (multi-element) images [8]. Definitions of the contrast of image elements shall meet the basic requirements to the contrast definition [8] and should ensure reasonably accurate quantitative assessment (measurement) of contrast of image elements for the real complex images and should allow evaluate (predict) the perceived values of image contrast at carrying out of subjective (qualitative) expert assessments [4].

The various definitions of contrast of image elements are known [8]. However, the known definitions of contrast have several very significant disadvantages [8, 9]. The main disadvantages of the most of the known definitions of contrast are the uncertainty and the multiplicity of the conditions under which the extreme values of contrast are achieved. Also, the essential disadvantage of known contrast of contrast is great changes (non-invariance) of their values under linear transformations of the brightness scale of image.

Currently, the development of new efficient contrast metrics for the accurate quantitative assessment (of measurement) of the objective quality of images is an extremely urgent task in imaging, image processing and analysis. For elimination of these disadvantages the metric of generalized contrast of image on the basis of the averaged contrast for all pairs of image elements (objects and background) with the using various definitions of contrast kernels is proposed. This will also improve the accuracy of

measurements of the generalized contrast of multi-element images with a complex structure. Histogram-based method for no-reference measuring of generalized contrast of complex images is also proposed.

The subject of study is the histogram-based methods of no-reference contrast measurement for complex images.

The purpose of the work is to increase the accuracy of formation of quantitative assessments (of measurement) of contrast of multi-element images with complex structure by development of new metrics of the generalized contrast.

1 PROBLEM STATEMENT

Let's suppose that given the initial image $X = \{ X(S, L) \}$, where L is a function of brightness which is defined on the closed set S of image pixels, where $L : S \rightarrow [0, 1] \subset R$.

We suppose there is a partition $S = \{ S_1, S_2, \dots, S_k \}$ of the closed set S of pixels of image X on k ($k \geq 2$) the nonempty connected subsets (regions) S_i , $i = \overline{1, k}$ which correspond to the image elements (to the objects and the

background), and $S_i \subset S$, $\bigcup_{i=1}^k S_i = S$, $S_i \cap S_j = \emptyset$
 $\forall i \neq j, \quad i, j \in [1, k], \quad k \in N \wedge k \geq 2, \quad L_i = L(z | z \in S_i),$
 $L : S_i \rightarrow L_i \in [0, 1] \subset R, \quad i = \overline{1, k}.$

Also the probability density $p(L)$ of brightness L of image X is known,

where $p(L_i) = |S_i| / |S| = |S_i| / \sum_{j=1}^k |S_j|$, $L_i \in [0, 1]$, $1 \leq i \leq k$.

Suppose given the definition of the contrast $C(\cdot, \cdot)$ of two contiguous image elements, $C : L \times L \rightarrow [-1, 1] \subset R$, which is the asymmetric dimensionless function and satisfies the main requirements to contrast definition, namely:

$C(L_i, L_j) = -C(L_j, L_i), \quad C(L_i, L_j) = 0 \quad \text{only when}$
 $L_i = L_j, \quad |C(L_i, L_j)| = \max_{(n, m)} |C(L_n, L_m)| \quad \text{only when}$
 $|L_i - L_j| = \max_{(n, m)} |L_n - L_m|.$

The purpose of the work is the measurement of generalized contrast of multi-element images with complex structure. The generalized contrast C_{gen} is defined as average value of contrasts $C(\cdot, \cdot)$ at the boundaries of the objects and background, where $r(\cdot)$ is density distribution of contrast $C(\cdot, \cdot)$

$$C_{gen} = g(C, r(C)) = \int_{-\infty}^{\infty} |C(L_i, L_j)| \cdot r(C(L_i, L_j)) dC(L_i, L_j),$$

where $g : (C, r(C)) \rightarrow [0, 1]$.

However, the edges detection and the assessment of distribution $r(\cdot)$ of contrast values $C(\cdot, \cdot)$ on the boundaries of objects and background are very challenging.

For a given definition of $C(\cdot, \cdot)$ and the known values $\{p(L_i)\}_{i=\overline{1, k}}$ the problem of measuring the generalized contrast C_{gen} can be presented as the problem of measurement

of the mean of the all values of contrast for all pairs of elements on current image, $C_{gen} = f(C, p(L))$. In turn, the problem of measurement of the mean of the all values of contrast for all pairs of image elements is to find such function $f: (C, \{p(L)\}) \rightarrow [0, 1] \subset R$, which satisfy to all main requirements to the definition of contrast and is invariant under the linear transformations of the brightness scale of the image.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The unambiguous and generally accepted definition of the generalized contrast for complex images is currently unknown. The contrast measurement for complex images is usually carried out by analyzing of contrast values of image elements. Contrast of image elements is usually defined as the difference of brightness values on the boundary of the two image elements (of two objects or object and background). Currently, the various definitions of the contrast of pairs of image elements for various applications are known [8]. In [6] Nesteruk (1970) proposed a definition of the weighted contrast for two elements of a complex image for adaptation level L_0 :

$$C^N(L_1, L_2) = (L_1 \cdot L_2 - L_0^2) / (L_1 \cdot L_2 + L_0^2). \quad (1)$$

The value L_0 of the level of adaptation is most often equal to the average brightness of the current image [6], $L_0 = \bar{L}$. The most wide practical application is characteristic for the definition of a weighted contrast of image elements [10, 11]:

$$C^{wei}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (L_1 + L_2). \quad (2)$$

Another known definition of contrast is relative contrast, which is defined as [8]:

$$C^{rel_1}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / \max(L_1, L_2), \quad (3)$$

$$C^{rel_2}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (1 - \min(L_1, L_2)). \quad (4)$$

The main disadvantages of contrast definitions (1)–(4) are the uncertainty and the multiplicity of the conditions under which the extreme values of weighted contrast are achieved [8]. In [8] Vorobel (1999) has offered the linear definition of the absolute contrast of image elements which provides performance of the basic (discussed earlier) requirements to contrast:

$$C^{Vrb}(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / LMAX. \quad (5)$$

In [9] Vorobel and Berehulyak (2007) have proposed a generalized definition for absolute contrast (where $n > 0$):

$$C^{VB}(L_1, L_2) = \text{sign}(L_1^n - L_2^n) \cdot |L_1^n - L_2^n|^{1/n}. \quad (6)$$

The linear definition of contrast, which satisfies the conditions of asymmetry and equivalence of impact of the arguments, of unambiguity and certainty of the conditions under which the equality to zero and the extreme values of contrast are achieved, and which is invariant to the linear transformations of the brightness scale, has the form:

$$C^Y(L_1, L_2) = (L_1 - L_2) / (L_{\max} - L_{\min}). \quad (7)$$

The definitions (1)–(7) of the contrast of image elements are called the contrast kernels [8] and are the basis for the construction of metrics of contrast for complex images.

The assessment of generalized contrast for complex (multi-element) images is usually carried out by measuring of contrast values of image elements (of objects and background) [6]. The various approaches to the measurement of the generalized contrast of complex image are known [6, 8]. Currently, as a measure of generalized contrast of complex image most often used the averaged value of the contrast of image elements in relation to the preset value of adaptation level.

For example, in [6] Nesteruk (1970) proposed the definition of the generalized contrast for anisotropic images on the base of the weighted contrast C^N (1):

$$C_{gen}^N(L_0) = \int_0^1 |(L^2 - L_0^2) / (L^2 + L_0^2)| \cdot p(L) dL. \quad (8)$$

Currently, for the contrast measurement of image elements the definition of weighted contrast is most widely used, which has the form [8]:

$$C_{gen}^{wei}(L_0) = \int_0^1 |(L - L_0) / (L + L_0)| \cdot p(L) dL. \quad (9)$$

However, contrast definitions (1)–(4) have significant disadvantages. Their main disadvantages are the uncertainty and the multiplicity of conditions of equality the extreme values.

To address the shortcomings specific to definitions (1) and (2) of weighted contrast, Vorobel (1999) has proposed the definition of generalized contrast on the base of the contrast C^{Vrb} (5) [8]:

$$C_{gen}^V(L_0) = \frac{1}{2LMAX} \int_0^1 |2 \cdot (L - L_0) + LMAX - |2 \cdot (L - L_0) - LMAX|| \cdot p(L) dL. \quad (10)$$

In [9] Vorobel and Berehulyak (2007) have proposed the generalized definition of the contrast for complex image:

$$C_{gen}^{VB}(L_0) = \frac{1}{2} \int_0^{LMAX} \left| \sqrt[n]{2(L^n - L_0^n)} + 1 - \left| \sqrt[n]{2(L^n - L_0^n)} - 1 \right| \right| \cdot p(L) dL. \quad (11)$$

The known definitions (8)–(11) are no-reference metrics for measurement of image contrast. The choice of concrete value of adaptation level L_0 for current image is a very difficult problem to the practical implementation of this approach to measurement of contrast and largely determines the accuracy of measuring of image contrast with the using (8)–(11).

3 MATERIALS AND METHODS

In this paper the no-reference method of assessment of generalized contrast of complex image by finding the mean of all values of generalized contrast for all possible values L_0 of the level of adaptation for the current image is proposed.

As an assessment of the generalized contrast we propose the using of the average value from all possible values of

generalized contrast which correspond to all possible values of the level of adaptation for the current image:

$$C_{age} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} C_0(L_i) \cdot p(L_i) dL_i. \quad (12)$$

In this case we propose to define the generalized contrast of complex image at a given value of a level of adaptation as:

$$C_0(L_0) = \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j, L_0) / p(L_0) dL_j, \quad (13)$$

$$L_0 \in [L_{\min}, L_{\max}],$$

$$p(L_0) = \int_0^1 p(L_j, L_0) dL_j. \quad (14)$$

The proposed method of no-reference assessment of generalized contrast of complex image is defined in accordance with (12) and (13). The expressions (12), (13) define the metric for the contrast measurement of multi-element images with using various known definitions of contrast kernels.

It should be noted that the two-dimensional distribution $p(L_j, L_0)$ of brightness values on the current image is overwhelmingly not known.

In the case where the objects on image are the equally important and independent and have no influence on each other (are independent events of relative to each other), we have:

$$p(L_j, L_0) = p(L_j) \cdot p(L_0). \quad (15)$$

In this case for (13), (12) using (15) we obtain:

$$C_0(L_0) = \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j) dL_j, \quad (16)$$

$$C_{ave} = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \int_0^1 |C(L_j, L_0)| \cdot p(L_j) \cdot p(L_0) dL_j dL_0. \quad (17)$$

The proposed method (12), (13), (16) provides the opportunity of creating the contrast metrics with using the various known definitions (1)–(7) of contrast of image elements (of contrast kernels). Accordingly, the histogram-based metrics of contrast on the basis of the definitions (12), (16) using known definitions (1), (2), (5)–(7) of contrast kernels can be defined as follows:

$$C_{ave}^N = \int_0^1 \int_0^1 |(L_i \cdot L_j - \bar{L}^2) / (L_i \cdot L_j + \bar{L}^2)| \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (18)$$

$$C_{ave}^{wei} = \int_0^1 \int_0^1 |(L_i - L_j) / (L_i + L_j)| \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (19)$$

$$C_{ave}^V = \int_0^1 \int_0^1 \frac{|L_i - L_j|}{L_{MAX}} \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (20)$$

$$C_{ave}^{VB} = \int_0^1 \int_0^1 |L_i^n - L_j^n|^{1/n} \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j, \quad (21)$$

$$C_{ave}^Y = \int_0^1 \int_0^1 \frac{|L_i - L_j|}{L_{\max} - L_{\min}} \cdot p(L_i) \cdot p(L_j) dL_i dL_j. \quad (22)$$

The known (8)–(11) and the proposed (18)–(22) definitions are no-reference contrast metric for quantitative assessment of generalized contrast of complex images. A comparison of the proposed and known histogram-based methods of contrast assessment for complex images was carried out in Sections 4, 5 and 6.

4 EXPERIMENTS

Known (8)–(11) and proposed (18)–(22) metrics of contrast were programmed in the interactive environment of programming MATLAB to carry out a subsequent comparative analysis of their effectiveness. A comparison of the known (8)–(11) and proposed (18)–(22) methods were carried out on the basis of measurement of generalized contrast for the two groups of test images. The first group consists of fifteen test images, which are the results of linear stretching of a well-known initial image (Fig. 1) for the ranges [0,00–0,40], [0,15–0,55], [0,30–0,70], [0,45–0,85], [0,60–1,00], [0,00–0,60], [0,10–0,70], [0,20–0,80], [0,30–0,90], [0,40–1,00], [0,00–0,85], [0,05–0,90], [0,10–0,95], [0,15–1,00], [0,00–1,00] (Fig. 2). The second group of the test images consists of fifteen reference images with complex structural nature (Fig. 3).

The results of measurements of generalized contrast for the two groups of test images (Fig. 2 and Fig. 3) with the use of known (8)–(11) and proposed (18)–(22) metrics are shown in Section 5.

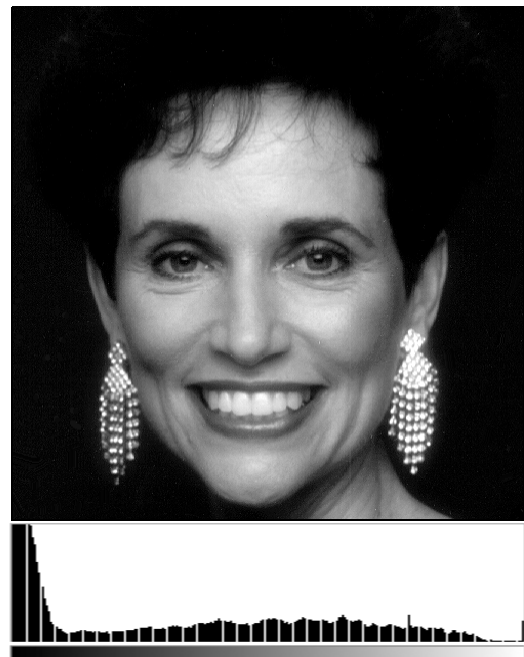


Figure 1 – Initial test image and its histogram

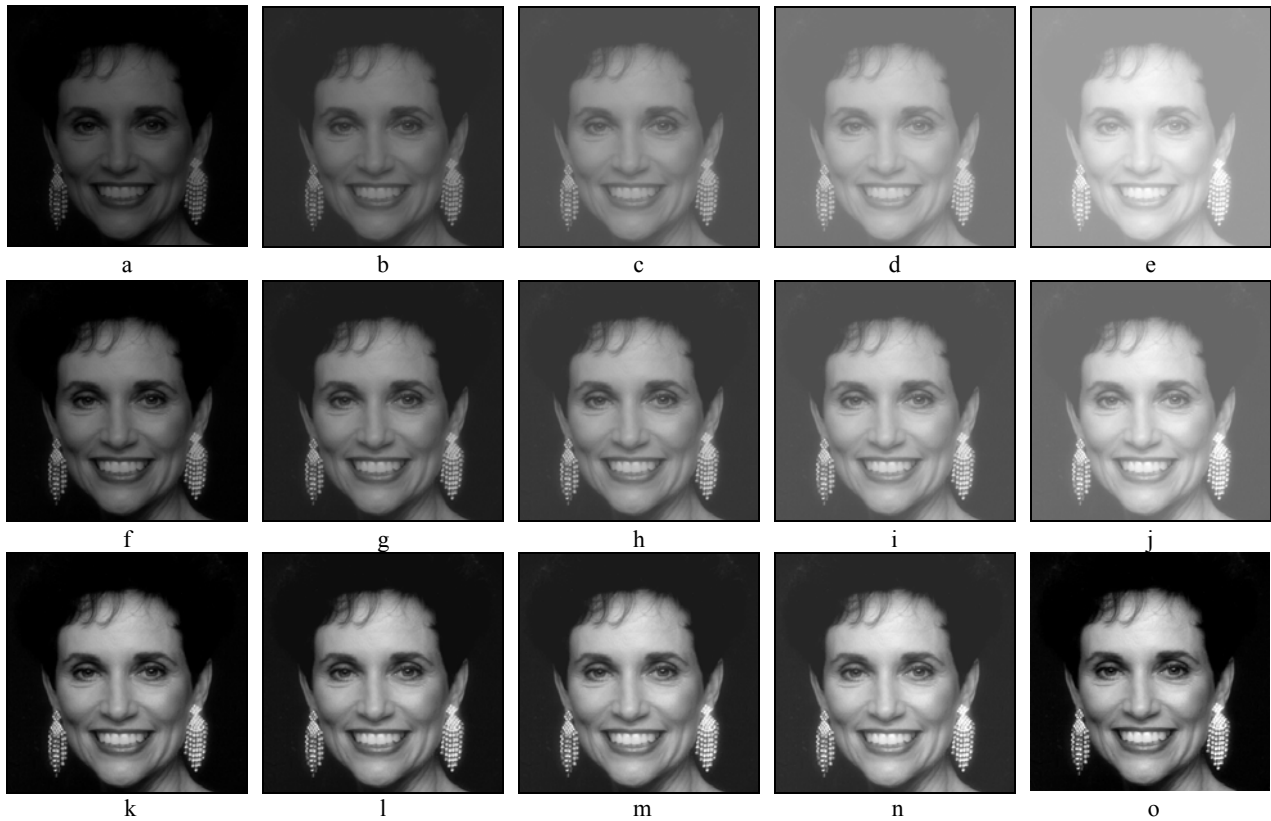


Figure 2 – The appearance of test images of the first group with the dynamic range:
 a – [0,00–0,40]; b – [0,15–0,45]; c – [0,30–0,70]; d – [0,45–0,85]; e – [0,60–1,00];
 f – [0,00–0,60]; g – [0,10–0,70]; h – [0,20–0,80]; i – [0,30–0,90]; j – [0,40–1,00];
 k – [0,00–0,85]; l – [0,05–0,90]; m – [0,10–0,95]; n – [0,15–1,00]; o – [0,00–1,00]



Figure 3 –Test images of the second group

5 RESULTS

Researches of the effectiveness of the proposed (8)–(11) and known (18)–(22) no-reference metrics of contrast were carried out by measuring (by quantitative assessment of the value) of the generalized contrast for two groups of test images with complex structure.

The results of the measurement for the first and the second groups of test images are shown in Table 1 and Table 2. Graphs of the values (Tab. 1) of generalized contrast for test images of the first group (Fig. 2) are shown in Fig. 4. Graphs of the values (Tab. 2) of generalized contrast for test images of the second group (Fig. 3) are shown in Fig. 5.

6 DISCUSSION

The results of the measurements show that the definitions (8), (9) and (18), (19) of the weighted contrast using contrast kernels (1), (2) are invariant to linear stretching of brightness range, but their values are significantly changed at additive transformations of brightness values on image (of mean value of brightness on image) (Fig. 4). The assessments (10), (20) on the basis of absolute kernel

of Vorobel (5) of absolute contrast are invariant to additive transformations and are proportional to multiplicative transformations of image brightness scale (Fig. 4). The assessments (11), (21) on the basis of non-linear absolute kernel of Vorobel and Berehulyak (6) are changed substantially under linear transformations of the image brightness (Fig. 4). The contrast assessment (22) on the basis of linear kernel (7) is invariant to linear transformations of image brightness scale (Fig. 4). The assessments of averaged contrast (20) and (22) for absolute kernel of Vorobel (5) and of linear kernel (7) coincide when analyzing pre-normalized images (Fig. 4). The values of known assessments of the generalized contrast (10), (11) on the basis of contrast kernel of Vorobel (5) and contrast kernel of Vorobel and Berehulyak (6) are proportional the proposed assessments (20), (21) of averaged contrast, however known definitions (10), (11) of the generalized contrast give the significantly overstated values of contrast assessments (Fig. 4 and Fig. 5). The assessments (20) and (22) used absolute kernel of Vorobel (5) and linear kernel (7) are the closest and are most suitable for quantitative assessment of contrast of images with complex structure (Fig. 5).

Table 1 – Results of calculating for the first group of test images

	2.a	2.b	2.c	2.d	2.e	2.f	2.g	2.h	2.i	2.j	2.k	2.l	2.m	2.n	2.o
$L_{\min}$	0.00	0.15	0.30	0.45	0.60	0.00	0.10	0.20	0.30	0.40	0.00	0.05	0.10	0.15	0.00
$L_{\max}$	0.40	0.45	0.70	0.85	1.00	0.60	0.70	0.80	0.90	1.00	0.85	0.90	0.95	1.00	1.00
C_{gen}^N	0.802	0.392	0.247	0.182	0.144	0.802	0.567	0.417	0.327	0.270	0.802	0.721	0.631	0.558	0.802
C_{gen}^{wei}	0.647	0.207	0.126	0.092	0.073	0.646	0.321	0.222	0.170	0.139	0.646	0.471	0.374	0.315	0.646
C_{gen}^V	0.207	0.207	0.206	0.206	0.207	0.310	0.309	0.310	0.310	0.310	0.436	0.436	0.435	0.437	0.504
C_{gen}^{VB}	0.205	0.252	0.276	0.295	0.310	0.307	0.347	0.373	0.392	0.408	0.431	0.456	0.474	0.489	0.496
C_{ave}^N	0.813	0.251	0.158	0.117	0.093	0.810	0.379	0.267	0.209	0.173	0.810	0.562	0.442	0.372	0.813
C_{ave}^{wei}	0.688	0.224	0.142	0.105	0.084	0.697	0.325	0.237	0.186	0.155	0.696	0.450	0.370	0.322	0.688
C_{ave}^V	0.123	0.123	0.122	0.122	0.123	0.184	0.183	0.184	0.183	0.184	0.261	0.260	0.260	0.261	0.307
C_{ave}^{VB}	0.131	0.159	0.172	0.184	0.193	0.196	0.219	0.235	0.246	0.256	0.278	0.293	0.303	0.314	0.327
C_{ave}^Y	0.307	0.307	0.305	0.306	0.307	0.307	0.306	0.307	0.306	0.307	0.306	0.306	0.307	0.307	0.307

Table 2 – Results of calculating for the second group of test images

	3.a	3.b	3.c	3.d	3.e	3.f	3.g	3.h	3.i	3.j	3.k	3.l	3.m	3.n	3.o
C_{gen}^N	0.122	0.348	0.250	0.297	0.780	0.232	0.532	0.325	0.408	0.820	0.857	0.412	0.422	0.363	0.463
C_{gen}^{wei}	0.065	0.184	0.132	0.159	0.563	0.128	0.306	0.178	0.236	0.552	0.745	0.231	0.281	0.259	0.270
C_{gen}^V	0.208	0.196	0.243	0.262	0.303	0.289	0.328	0.304	0.336	0.375	0.455	0.393	0.410	0.441	0.640
C_{gen}^{VB}	0.301	0.242	0.322	0.333	0.304	0.378	0.367	0.370	0.387	0.380	0.439	0.454	0.468	0.508	0.746
C_{ave}^N	0.102	0.238	0.186	0.220	0.678	0.194	0.386	0.253	0.329	0.623	0.920	0.318	0.441	0.432	0.366
C_{ave}^{wei}	0.092	0.229	0.176	0.213	0.537	0.184	0.345	0.246	0.311	0.434	0.618	0.292	0.368	0.358	0.321
C_{ave}^V	0.142	0.126	0.159	0.175	0.198	0.201	0.209	0.215	0.235	0.228	0.265	0.264	0.263	0.281	0.370
C_{ave}^{VB}	0.218	0.168	0.224	0.237	0.214	0.280	0.251	0.283	0.292	0.247	0.277	0.331	0.315	0.333	0.446
C_{ave}^Y	0.142	0.170	0.176	0.195	0.198	0.237	0.213	0.244	0.235	0.228	0.266	0.276	0.263	0.281	0.370

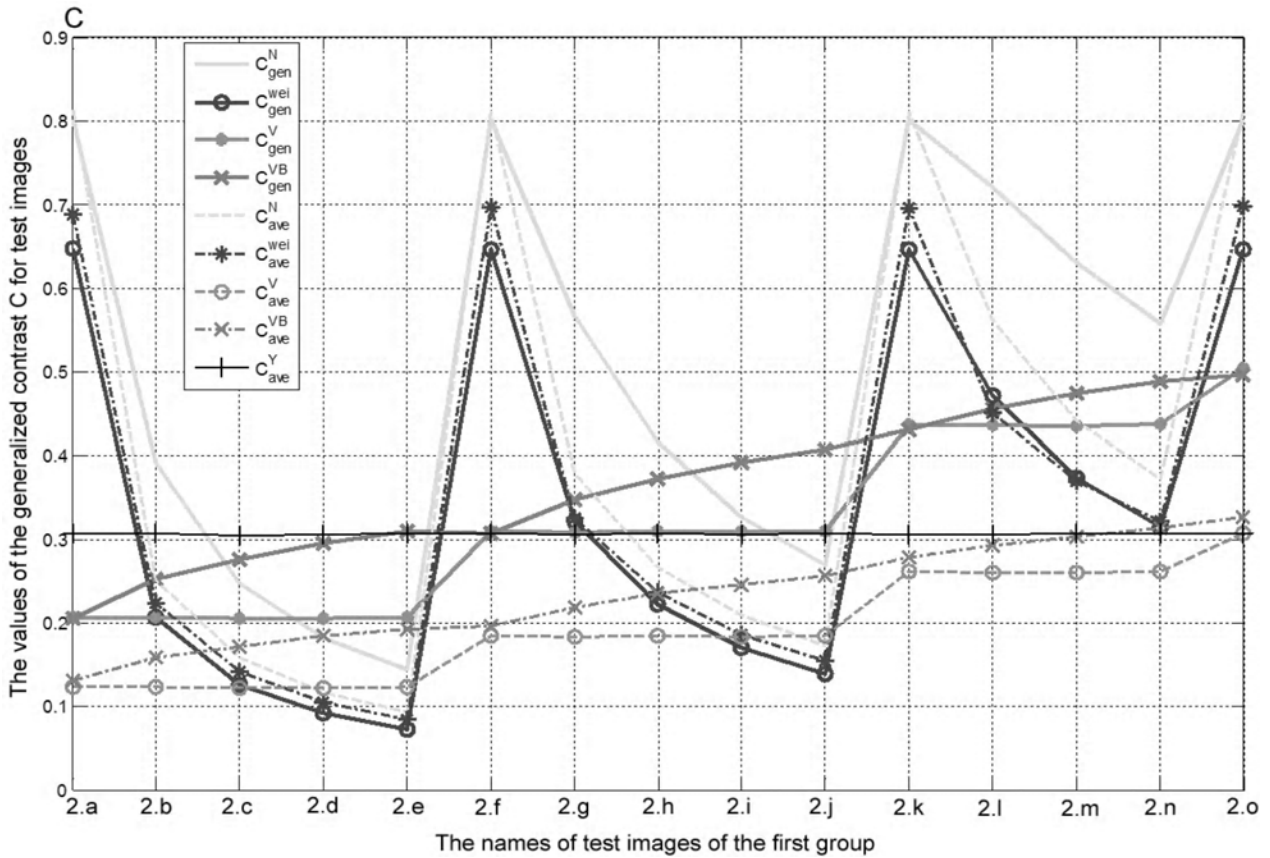


Figure 4 – Values of generalized contrast for test images of the first group

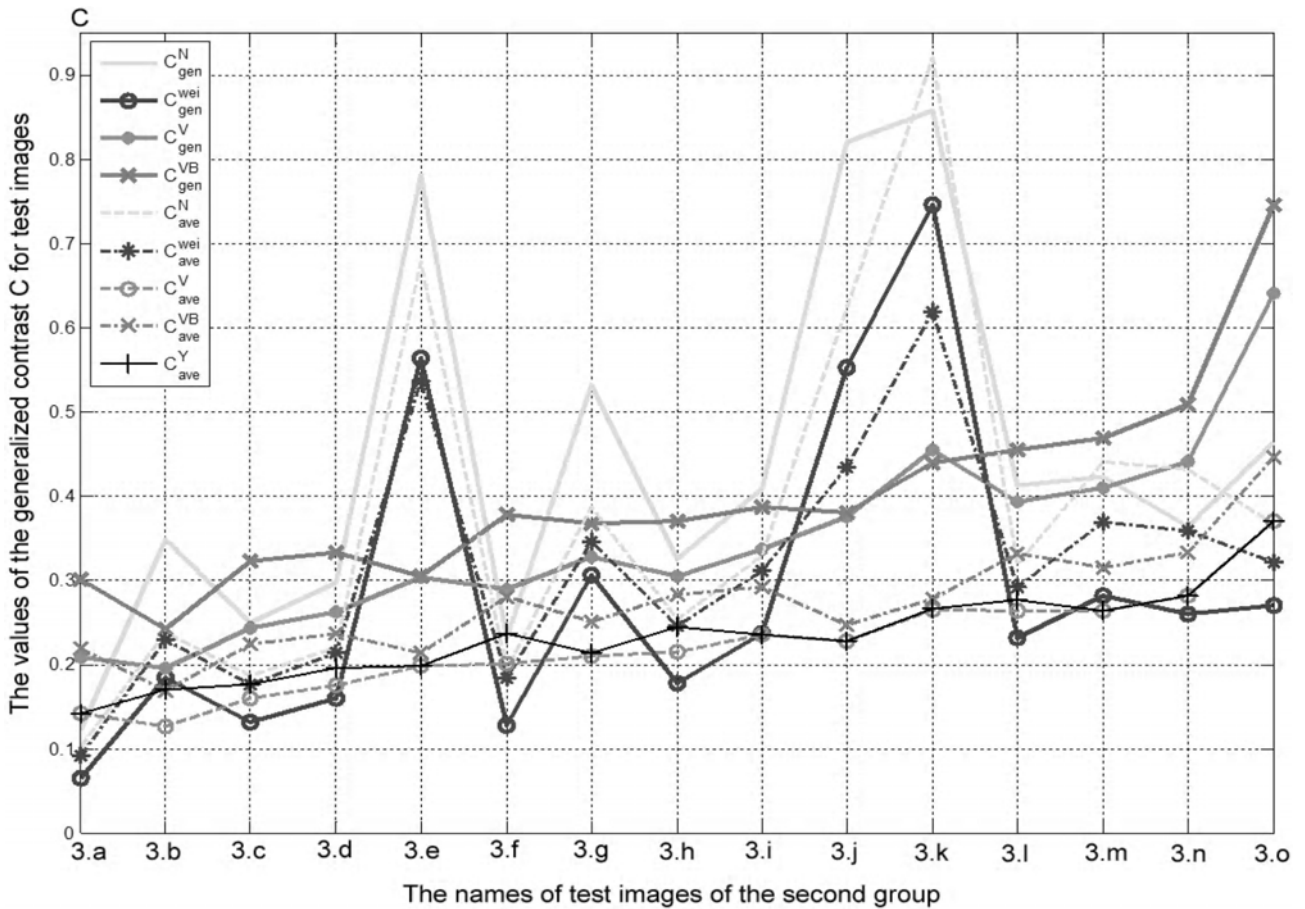


Figure 5 – Values of generalized contrast for test images of the second group

CONCLUSIONS

The problem of no-reference measuring of a generalized contrast of complex images is considered. The urgent problem of increasing the accuracy and reliability of no-reference measurements of contrast for multi-element images with complex structure is solved to improve the accuracy of the image quality assessment in automatic mode.

The histogram-based method of no-reference contrast measurement of multi-element image with complex structure by finding the mean of all values of generalized contrast for all possible values of the level of adaptation for the current image is firstly proposed. The no-reference contrast metrics on the basis of the averaged value of contrast for all pairs of image elements (objects and background) using various definitions of contrast of image elements (contrast kernels) is firstly proposed. This allows to increase the accuracy of measuring of generalized contrast for multi-element images with complex structure and, as a consequence, to improve exactness and reliability of image quality assessment for complex images. This also allows to provide the operative measurement of contrast and the assessment of image quality in the automatic mode with the level of computing costs which is acceptable to processing and image analysis in real time. The practical significance of obtained results is that software implementation of the proposed contrast metrics is developed, as well as experiments to study their properties at various definitions of contrast kernels are carried out.

The experimental results allow to recommend the proposed method of no-reference measurement of contrast to use in practice for image quality assessment in automatic mode as well as to ensure the effective choice of the definitions of contrast of image elements (of contrast kernels) and conditions of their use for various practical applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the project of Special design office of television systems (Lviv,

Ukraine) “On-board system of enhanced vision for transport vehicles” (No. 118/16).

REFERENCES

1. Wang Z. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity / Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli // IEEE Transactions on Image Processing. – 2004. – Vol. 13, № 4. – P. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
2. Wang Z. Why is image quality assessment so difficult? / Z. Wang, A. C. Bovik, L. Lu // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Orlando, FL, USA, May 2002. – Vol. 4. – P. 3313–3316. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.1004620.
3. Wang Z. A universal image quality index / Z. Wang and A. Bovik // Signal Processing Letters. – 2002. – Vol. 9, № 3. – P. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823.
4. Wang Z. Modern Image Quality Assessment / Z. Wang, A.C. Bovik. – San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2006. – 160 p. DOI: 10.2200/S00010ED1V01Y200508IVM003.
5. No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches / [M. Shahid, A. Rossholm, B. Löveström, H.-J. Zepernick] // EURASIP Journal on Image and Video Processing. – 2014. – № 1. – P. 1–32. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-40.
6. Нестерук В. Ф. Контрастный закон восприятия света / В.Ф. Нестерук, Н. Н. Порфирьева // Оптика и спектроскопия. – 1970. – Т. XXIX, вып. 6. – С. 1138–1143.
7. Peli E. Contrast in Complex Images / E. Peli // Journal of the Optical Society of America A. – October 1990. – Vol. 7, №10. – P. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.
8. Воробель Р. Логарифмічна обробка зображень / Р. Воробель. – Київ, Наукова думка, 2012. – 231 с.
9. Vorobel R. Image contrast and its connection with fuzzy logic / R. Vorobel, O. Berehulyak // Proceedings of II International Workshop on Inductive Modeling (IWIM), Prague, Czech Republic, 2007. – P. 104–110. ISBN 978-80-01-03881-9.
10. Gonzalez R. C. Digital Image Processing, 2nd Edition / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. – NY: Prentice Hall, 2002. – 976 p. ISBN 13: 978-0201180756, ISBN10: 0201180758.
11. Pratt W. K. Digital Image Processing / William K. Pratt. – New York, Chichester : John Wiley & Sons, second edition, 1993. – 720 p. DOI: 10.1002/0471221325.

Article was submitted 16.04.2017.

After revision 25.05.2017.

Слманова О. С.¹, Романишин Ю. М.²

¹Аспірант, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Д-р техн. наук, завідувач кафедри електронних засобів інформаційно-комп'ютерних технологій, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, професор кафедри, Вармінсько-Мазурський університет в Ольштині, Ольштин, Польща

КІЛЬКІСНА ОЦІНКА БЕЗ ЕТАЛОНУ ДЛЯ УЗАГАЛЬНЕНОГО КОНТРАСТУ СКЛАДНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Актуальність. В наш час вимірювання (кількісна оцінка) якості зображень у автоматичному режимі є надзвичайно актуальною проблемою для більшості практичних застосувань. Вимірювання якості зображення без еталону є одним із найбільш актуальних і складних завдань обробки та аналізу зображень. Контраст є найбільш важливою кількісною характеристикою, яка визначає об'єктивну якість зображення в цілому. В наш час розробка нових ефективних методів (метрик) для вимірювання узагальненого контрасту зображень у автоматичному режимі є однією з найбільш актуальних задач обробки і аналізу зображень.

Мета. Розробка методу вимірювання узагальненого контрасту багатоелементних зображень зі складною структурою за їх гістограмою на основі усередненого контрасту елементів зображення (об'єктів і фону) з використанням різних визначень ядра контрасту.

Метод. Аналіз відомих підходів до вимірювання локального контрасту елементів зображення, відомих методів кількісної оцінки узагальненого контрасту складних зображень, а також результатів експериментальних досліджень для ряду складних реальних і тестових зображень дозволив виявити властиві їм закономірності (відповідність основним вимогам до визначення контрасту, характер і динаміку змін контрасту при лінійних перетвореннях шкали яскравості зображення), які проявляються в залежності від використання різних визначень ядер контрасту і метрик узагальненого контрасту зображень.

Результати. Запропоновано новий метод вимірювання узагальненого контрасту без еталону для складних зображень на основі гістограм. Запропоновано метрику вимірювання узагальненого контрасту для складних зображень на основі усередненого контрасту для всіх окремих пар елементів зображення (об'єктів і фону) для різних визначень ядра контрасту.

Висновки. Запропонована нова метрика контрасту на основі середнього для всіх значень контрасту всіх елементів зображення дозволяє забезпечити точну кількісну оцінку узагальненого контрасту складних реальних зображень і оцінити (прогнозувати) якість сприйняття зображення при проведенні суб'єктивних (якісних) експертних оцінок.

Ключові слова: обробка зображень, оцінка якості зображення, вимірювання контрасту, метрика без еталону, узагальнений контраст, складне зображення, гістограма.

Елманова Е. С.¹, Романишин Ю. М.²

¹Аспирант, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

²Д-р техн. наук, заведующий кафедры электронных средств информационно-компьютерных технологий, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина, ²профессор кафедры, Университет Вармии и Мазур в Ольштыне, Ольштын, Польша

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА БЕЗ ЭТАЛОНА ДЛЯ ОБОБЩЕННОГО КОНТРАСТА СЛОЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Актуальность. В настоящее время измерение (количественная оценка) качества изображений в автоматическом режиме является чрезвычайно актуальной задачей для большинства практических приложений. Измерение качества изображения без эталона является одной из наиболее актуальных и сложных задач обработки и анализа изображений. Контраст является наиболее важной количественной характеристикой, которая определяет объективное качество изображения в целом. В настоящее время одной из наиболее актуальных задач анализа изображений является разработка новых эффективных методов (метрик) для измерения обобщенного контраста изображений в автоматическом режиме.

Цель. Разработка метода измерения обобщенного контраста многоэлементных изображений со сложной структурой по их гистограмме на основе измерения среднего значения контраста всех элементов изображения для различных определений ядра контраста.

Метод. Анализ известных подходов к измерению контраста элементов изображения и известных методов количественной оценки обобщенного контраста сложных изображений, а также результатов экспериментальных исследований для ряда сложных реальных и тестовых изображений позволил выявить существующие закономерности (соответствие требованиям к определению контраста, характер изменений контраста при линейных преобразованиях шкалы яркости), которые проявляются в зависимости от использования различных определений ядер контраста и метрик обобщенного контраста изображений.

Результаты. Предложен новый метод измерения обобщенного контраста без эталона для сложных изображений. Предложена метрика измерения обобщенного контраста сложных изображений по их гистограмме на основе усредненного контраста для всех отдельных пар элементов изображения для различных определений ядра контраста.

Выводы. Предложенная новая метрика контраста позволяет обеспечить точную количественную оценку обобщенного контраста сложных реальных изображений и оценить воспринимаемое качество изображений при проведении субъективных экспертных оценок.

Ключевые слова: обработка изображений, оценка качества изображения, измерение контраста, метрика без эталона, обобщенный контраст, сложное изображение, гистограмма.

REFERENCES

- Wang Z., Bovik A. C., Sheikh H. R., Simoncelli E. P. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, Vol. 13, No. 4, pp. 600–612. DOI: 10.1109/TIP.2003.819861.
- Wang Z., Bovik A. C., Lu L. Why is image quality assessment so difficult?, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Orlando, FL, USA, May 2002*, Vol. 4, pp. 3313–3316. DOI: 10.1109/ICASSP.2002.1004620.
- Wang Z., Bovik A. A universal image quality index, *Signal Processing Letters*, 2002, Vol. 9, No. 3, pp. 81–84. DOI: 10.1109/97.995823.
- Wang Z., Bovik A. C. Modern Image Quality Assessment. San Rafael, CA, USA, Morgan & Claypool, 2006, 160 p. DOI: 10.2200/S00010ED1V01Y200508IVM003.
- Shahid M., Rossholm A., Löfstöm B., Zepernick H.-J. No-reference image and video quality assessment: a classification and review of recent approaches, *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2014, No. 1, pp. 1–32. DOI: 10.1186/1687-5281-2014-40.
- Nesteruk V. F., Porfireva N. N. Kontrastnyiy zakon vospriyatiya sveta, *Optika i spektroskopiya*, 1970, Vol. XXIX, vyp. 6, pp. 1138–1143.
- Peli E. Contrast in Complex Images, *Journal of the Optical Society of America A*, October 1990, Vol. 7, No. 10, pp. 2032–2040. DOI: 10.1364/JOSAA.7.002032.
- Vorobel' R. Logaryfmichna obrobka zobrazhen'. Kiev, Naukova dumka, 2012, 231 p.
- Vorobel R., Berehulyak O. Image contrast and its connection with fuzzy logic, *Proceedings of II International Workshop on Inductive Modeling (IWM)*, Prague, Czech Republic, 2007, pp. 104–110. ISBN 978-80-01-03881-9.
- Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing, 2nd Edition. NY, Prentice Hall, 2002, 976 p. ISBN13: 978-0201180756, ISBN10: 0201180758.
- Pratt W.K. Digital Image Processing. New York, Chichester, John Wiley & Sons, second edition, 1993, 720 p. DOI: 10.1002/0471221325.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 001.4

Луценко И. А.¹, Фомовская Е. В.², Оксанич И. Г.³, Сердюк О. Ю.⁴

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электронных аппаратов Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой электронных аппаратов Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационно-управляющих систем Кременчугского национального университета им. М. Остроградского, Кременчуг, Украина

⁴Аспирант кафедры компьютерных систем и сетей ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ВЕРИФИКАЦИИ КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ОПЕРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Актуальность. Решена актуальная задача верификации критерия для оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами.

Цель работы – создание метода верификации оценочных критериев, обладающих высокой избирательностью и позволяющих исключить из рассмотрения те показатели, которые обеспечивают противоречивые результаты по отношению к результатам частных критериев эффективности.

Метод. Предложен метод верификации глобального критерия для оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами продуктовых потоков, который основан на формировании классов эталонных операций, идентифицированных с использованием частных критериев эффективности, которые, в свою очередь, основаны на использовании выявленных особенностей вторых интегральных параметров от интегральных функций входа и выхода глобальной модели операции, адекватность которых математически доказана, обеспечивая тем самым отбор показателя, оценочные особенности которого позволяют согласовать результаты операционной деятельности управляемых систем с целью их владельца за счет выхода в режим управления соответствующего максимуму эффективности использования ресурсов.

Результаты. Разработан алгоритм реализации метода верификации оценочных показателей, который был использован при проведении вычислительных экспериментов связанных с иллюстрацией возможностей предложенного метода.

Выводы. Впервые разработано три класса эталонных моделей операций с распределенными параметрами, каждая из которых идентифицирована с использованием частного критерия эффективности.

Разработка предложенного метода позволяет осуществлять обоснованный выбор единого показателя для использования в качестве глобального критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами любых систем, процессы которых этого требуют. Возможность выбора адекватного критерия оптимизации обеспечит повышение темпов развития производственных структур.

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода, реализованного в виде алгоритма, что позволяет рекомендовать его специалистам – практикам для отбора оценочного критерия из множества показателей, которые предлагаются исследователями в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами. Показатель, который успешно прошел верификацию, обеспечивает возможность согласования параметров операционного процесса с целью владельца (суперсистемы). При этом, предполагается, что целью суперсистемы является максимизация собственных возможностей, прямо связанных с эффективностью использования доступных ресурсов.

Ключевые слова: критерий оптимизации, верификация показателей, эталонная модель операции, операции с распределенными параметрами, оценка эффективности операций.

НОМЕНКЛАТУРА

ТО – время операции;

ЧКЭ – частный критерий эффективности;

r_i – вид модели i - входного продуктового потока;

$rq_i(t)$ – количественный параметр модели i - входного продуктового потока;

i – количество входных продуктов операции;

rs – экспертная (стоимостная) оценка единицы количественного параметра $rq_i(t)$;

$re_i(t)$ – текущее значение экспертной (стоимостной) оценки модели потока $rq_i(t)$;

$re(t)$ – глобальная функция входа;

t_{sr} – момент начала подачи первого входного продуктового потока;

t_{fr} – момент завершения выдачи последнего входного продуктового потока;

IRE – параметр интегральной оценки глобальной функции входа $re(t)$;

VRE – параметр интегральной оценки от интегральной функции входа $ire(t)$;

p_j – вид модели j - выходного продуктового потока;

$pq_j(t)$ – количественный параметр модели j -выходного продуктового потока;

j – количество выходных продуктов операции;

ps – экспертная (стоимостная) оценка единицы количественного параметра $pq_j(t)$;

$pe_j(t)$ – текущее значение экспертной (стоимостной) оценки модели потока $pq_j(t)$;

$pe(t)$ – глобальная функция выхода;

t_{sp} – момент начала подачи первого выходного продуктового потока;

t_{fp} – момент завершения выдачи последнего выходного продуктового потока;

IPE – параметр интегральной оценки глобальной функции выхода $pe(t)$;

VPE – параметр интегральной оценки от интегральной функции выхода $ipe(t)$;

$se(t)$ – текущие запасы ценностей для проведения операций;

SE_0 – начальный объем запасов ценностей;

Ψ – модель операции с распределенными параметрами во времени функций $re(t)$ и $pe(t)$;

Θ – модель простой операции с единичной продолжительностью во времени;

RL – абсолютный оценочный показатель;

EL – относительный оценочный показатель;

k – коэффициент добавленной ценности;

t_a – момент времени операции, который определяется из равенства $vre(t) = vpe(t)$;

$vre(t)$ – вторая интегральная функция от функции входа $re(t)$;

$vpe(t)$ – вторая интегральная функция от функции выхода $pe(t)$.

ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы результаты функционирования управляемой системы были максимально согласованы с целью ее владельца (суперсистемы), необходимо оптимизировать процессы управления. В настоящее время функция оптимизации крайне редко автоматизируется и связано это с тем, что в качестве критерия оптимизации используются показатели, возможности которых, как указателей на самое эффективное управление, системно не обосновываются.

Например, широко используется попытка оптимизации по критерию минимума затрат. Однако использование показателя «затраты» в качестве критерия оптимизации, не позволяет максимизировать возможности управления. Если, к примеру, рентабельность операционного процесса составляет 10%, а, повышение затрат на 1%, повышает производительность в два раза и снижает добавленную ценность на 1%, то в рамках ранее необходимого интервала времени можно провести две системные операции. При этом каждая такая операция, проведенная с добавленной ценностью 9%, практически ее удвоит за время прошлого операционного процесса.

Таким образом, для решения задачи оптимального управления среди множества показателей, которые определяются исследователями как показатели эффективности или критерии оптимизации, необходимо отобрать именно тот показатель, который позволит максимально точно согласовать результаты процессуальной деятельности управляемой системы с целью суперсистемы.

Для решения этой задачи можно воспользоваться методом верификации, основанным на использовании формальных признаков (первый этап верификации) [1] и создании классов эталонных идентифицированных моделей операций, эффективность которых предварительно определена с использованием ЧКЭ (второй этап верификации) [2].

Частными критериями эффективности в работе определены показатели, каждый из которых обеспечивает возможность рейтинговой оценки эффективности моделей эталонных операций в рамках специально созданного класса таких операций.

Тот верифицируемый показатель, который успешно прошел все множество тестовых заданий на непротиворечивость, с высокой долей вероятности может использоваться в системах автоматического управления в качестве критерия оптимизации.

В настоящее время частные показатели и классы эталонных моделей тестовых операций разработаны для верификации оценочных показателей простых моделей операций [2].

Поскольку реальные процессы имеют распределенные во времени параметры потоков ресурсопотребления и ресурсоотдачи, необходимо разработать ЧКЭ для создания классов эталонных моделей операций, которые позволяют учитывать влияние характера распределенных параметров исследуемых моделей операции на эффективность их операционных процессов.

Использование классов идентифицированных относительно рейтинговой эффективности тестовых операций, обеспечит возможность верификации оценочных показателей с целью выбора лучшего объекта для использования в качестве критерия оптимизации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения цели необходимо следующее:

1. Доказать, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами вида

$$\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)] \quad \text{и} \quad \Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)], \quad \text{где}$$

$$\int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re_1(t) dt = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re_2(t) dt, \quad \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_1(t) dt \right) dt \neq \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_2(t) dt \right) dt$$

и $pe_1(t) = pe_2(t)$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re(t)$.

2. Доказать, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами вида

$$\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)] \quad \text{и} \quad \Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)],$$

$$\text{где} \quad re_1(t) = re_2(t), \quad \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe_1(t) dt = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe_2(t) dt,$$

$$\int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe_1(t) dt \right) dt \neq \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe_2(t) dt \right) dt, \quad \text{эффективней}$$

будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe(t)$.

3. Разработать метод формирования классов эталонных синхронизированных операций для верификации показателей, которые предлагаются для отбора критерия оптимизации.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [1] установлено, что формальными признаками показателя для оценки эффективности глобальной модели операции с распределенными параметрами является двойка $(re(t), pe(t))$, а для глобальных моделей простых операций – тройка (IRE, TO, IPE) , где

$$IRE = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} re(t) dt; \quad TO = t_{fr} - t_{sr}; \quad IPE = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} pe(t) dt.$$

Так, если каждому потоку количественной оценки значимой входной продукции $rq_i(t)$ и выходной про-

дукции $pq_j(t)$ поставить в соответствие его эксперт-

ную (стоимостную) оценку rs_i и ps_j , то множество сопоставимых функций входа и выхода можно представить в виде глобальных функций входа $re(t)$, выхода

$$pe(t). \quad \text{При} \quad \text{этом}, \quad re_i(t) = rs_i \cdot rq_i(t) \quad \text{и}$$

$$pe_j(t) = ps_j \cdot pq_j(t) \quad (\text{рис. 1}).$$

Кроме того, установлено [2], что критерий оптимизации должен обладать чувствительностью к форме распределения функции входа и функции выхода. Высказана гипотеза, что такую чувствительность обеспечивает использование второго интегрального параметра от ин-

$$\text{тегральной функции входа} \quad \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re(t) dt \right) dt \quad \text{и интеграль-}$$

$$\text{ной функции выхода} \quad \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe(t) dt \right) dt.$$

Все системные операции в действительности имеют распределенные во времени потоки входных и выходных продуктов. Приведение модели операции вида $(re(t); pe(t))$ к виду (IRE, TO, IPE) повышает погрешность в определении параметров оптимального управления. Поэтому существует потребность в создании метода верификации, чувствительного к характеру глобальных функций входа и выхода и создания классов эталонных моделей операций с распределенными параметрами.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для доказательства возможности использования второго интегрального параметра функций $re(t)$ и $pe(t)$ в качестве указателей на эффективность исследуемых операций, был разработан метод не прямой оценки эффективности использования доступных ресурсов.

Суть метода состоит в том, что доступные ценности (ресурсы) $se_1(t)$ и $se_2(t)$, одинаковые на начальном этапе ($se_1(t_0) = se_2(t_0)$), по мере необходимости, передаются в системы, которые формируют модели синхронизированных операций вида Ψ_1 и Ψ_2 . При этом,

$$IRE_1(\Psi_1) = IRE_2(\Psi_2), \quad VRE_1(\Psi_1) \neq VRE_2(\Psi_2), \quad \text{а}$$

$$pe_1(t) = pe_2(t), \quad \text{где} \quad VRE_1(\Psi_1) = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_{1(\Psi_1)}(t) dt \right) dt,$$

$$VRE_2(\Psi_2) = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re_{2(\Psi_2)}(t) dt \right) dt.$$

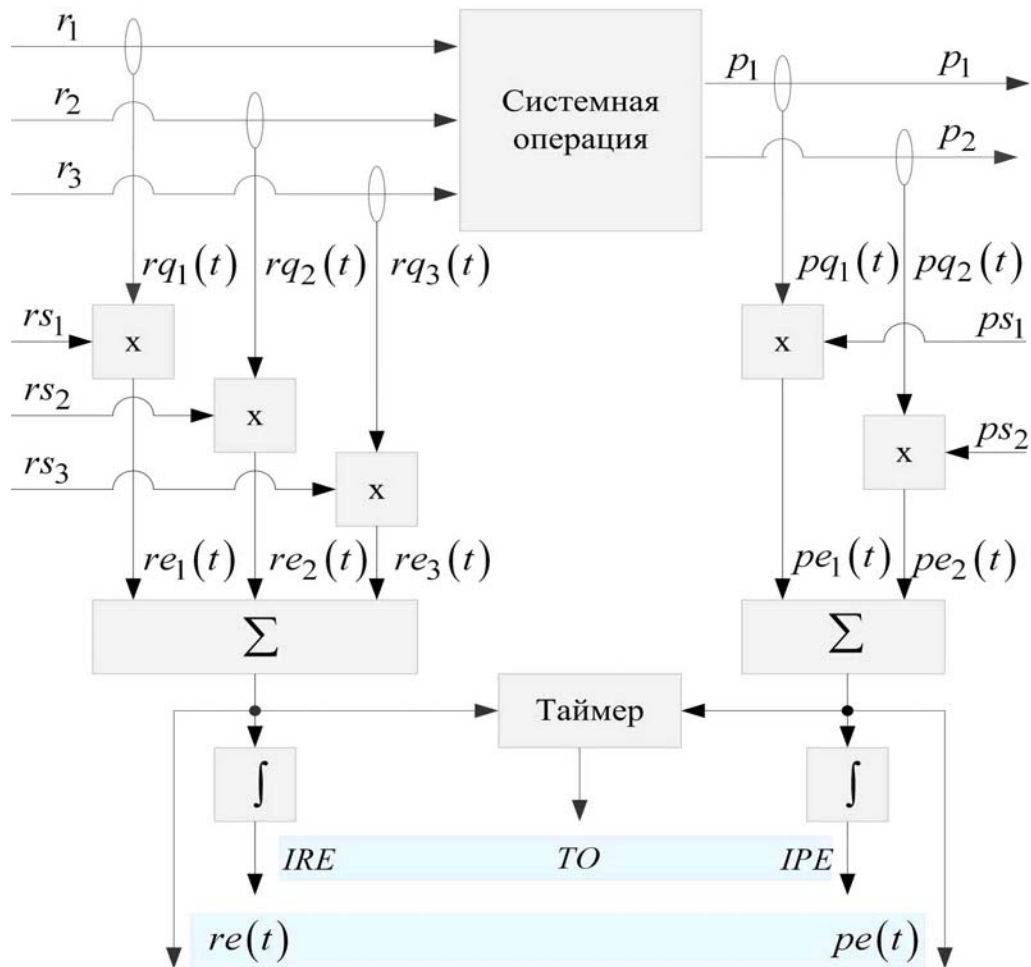


Рисунок 1 – Принцип формирования глобальной модели операции

Принципы реализации метода рассмотрим для случая формирования двух импульсных функций входа $re_{\Psi_1}[n]$ и $re_{\Psi_2}[n]$ операций Ψ_1 и Ψ_2 соответствующими системами.

Остаток доступных ценностей используются системами, которые формируют модели простых равноэффективных операций $\Theta_{1.1}$, $\Theta_{1.2}$ и $\Theta_{2.1}$, $\Theta_{2.2}$ единичной продолжительности. Результаты операций вида Θ_1 доступны системам, которые формируют операции вида Ψ и Θ_2 , при этом системы формирующие операции вида Ψ имеют приоритет в использовании доступных ценностей, а системы формирующие операции вида Θ_2 используют их остаток.

Условие $pe_1[n] = pe_2[n]$ означает, что вид функций $re_1[n]$ и $re_2[n]$, моделей операций вида Ψ_1 и Ψ_2 , не влияет на результат этих операций. Поэтому только результаты операций вида Θ_1 и Θ_2 оказывают влияние на эффективность использования ресурсов $se[n]$.

По отношению к моделям операций с распределенными параметрами понятие «синхронизированные опе-

рации» означает, что все ненулевые значения функций $re_1[n] > 0$ и $re_2[n] > 0$ находятся в рамках интервала времени $[n_{sr}, n_{fr}]$, а все ненулевые значения функций $pe_1[n] > 0$ и $pe_2[n] > 0$ находятся в рамках интервала времени $[n_{sp}, n_{fp}]$ (рис. 2).

Принцип формирования результата от использования доступных ресурсов рассмотрим на примере реализации двух сценариев развития событий (рис. 3).

Функция $se[n]$ отображает объем доступных ценностей в определенный момент времени. В начальный момент времени величина доступных ценностей $SE_0 = 3$ ед.

В момент n_1 для проведения операции Ψ_1 необходимо получение ценностей в размере 1 ед.

Поскольку потребление запасов величиной $RE_{\Psi_1.1} = 1$ ед. обеспечивает на момент n_1 остаток средств в размере 2 ед., появляется возможность сформировать простую операцию $\Theta_{1.1}$ с коэффициентом добавленной ценности $k = 1,5$ и единичной продолжительностью во времени.

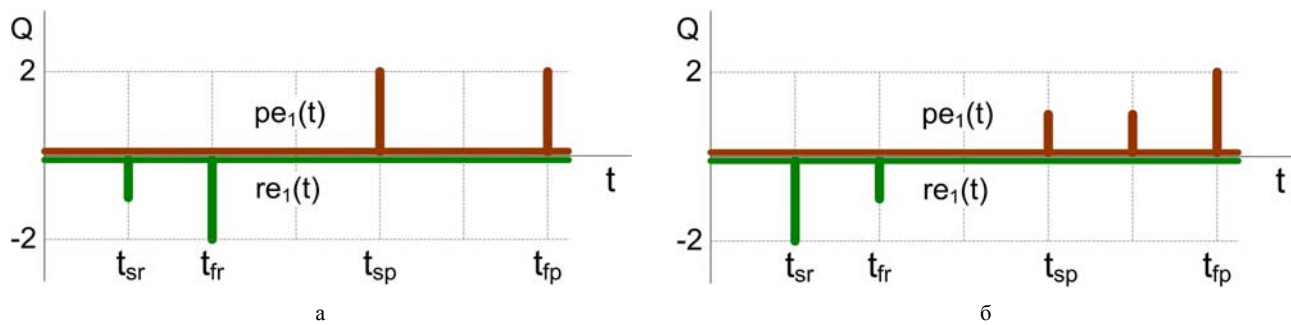


Рисунок 2 – Пример синхронизированных операций а) и б) с распределенными параметрами

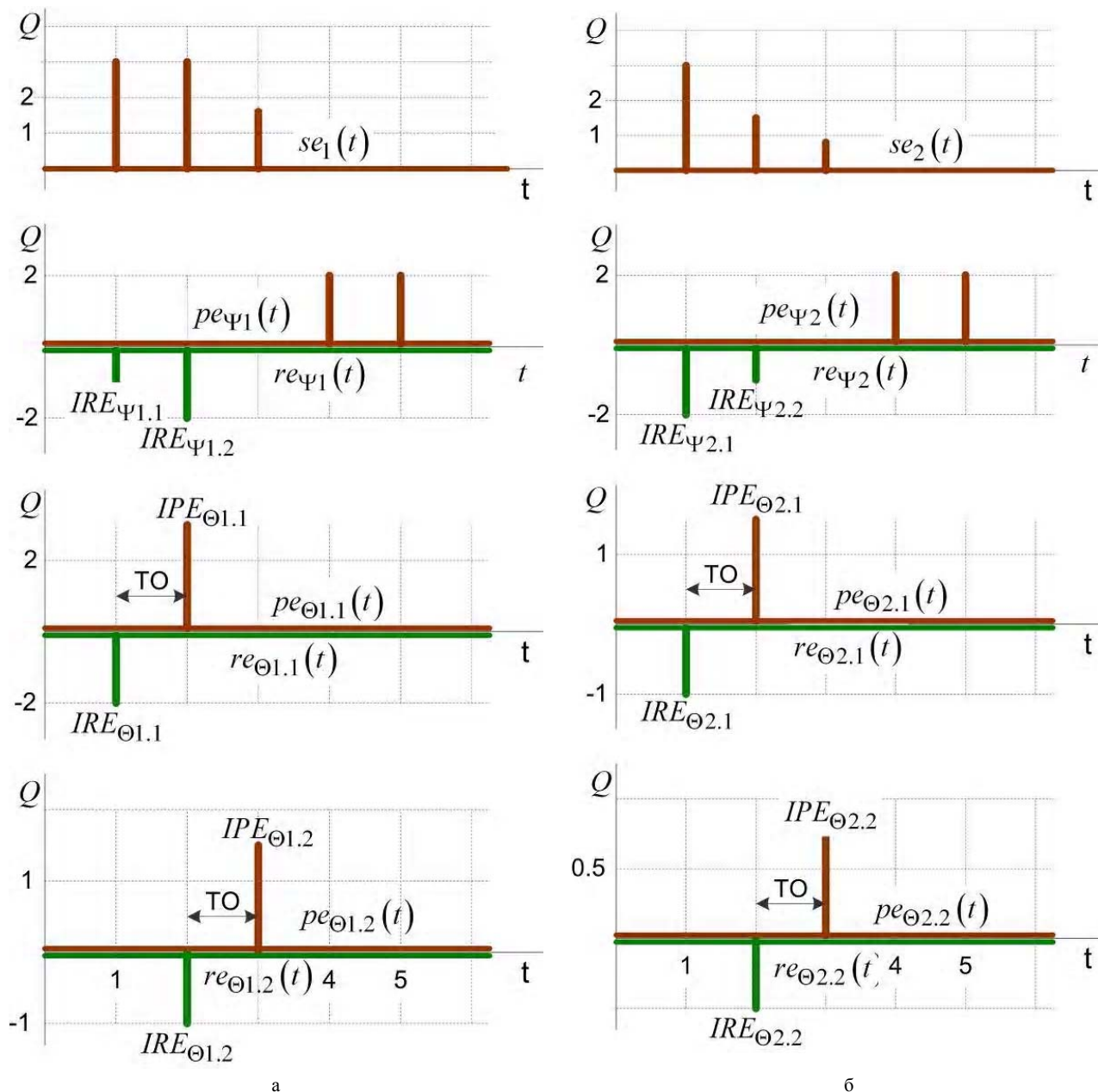


Рисунок 3 – Пример определения эффективности использования ресурсов при характере функции входа операций вида Ψ :
а – нарастающем; и б – спадающем

В таком случае, на момент n_2 на выходе операции $\Theta_{1.1}$ формируется выходной продукт операции, ценность которого равна величине $PE_{\Theta_{1.1}} = k \cdot RE_{\Theta_{1.1}} = 1,5 \cdot 2 = 3$ ед.

Таким образом, на момент n_2 становится доступным объем ценностей 3 ед.

При этом часть этой ценности, в эквиваленте, составляющем 1 ед., передается операции Ψ_1 ($RE_{\Psi_{1.2}}=2$). Оставшаяся часть, в размере 1 ед., используется для проведения дополнительной операции $\Theta_{1.2}$.

В результате проведения операции $\Theta_{1.2}$ с $k=1,5$ и $TO=1$, формируется результат $PE_{\Theta_{1.2}} = k \cdot RE_{\Theta_{1.2}} = 1,5 \cdot 1 = 1,5$ ед.

Следовательно, использование текущих запасов, которые остаются после формирования операции Ψ_1 по сценарию (рис. 3а), обеспечило получение ценности в размере 1,5 ед. от проведения простых операций $\Theta_{1.1}$ и $\Theta_{1.2}$.

Аналогичные расчеты, проведенные по сценарию (рис. 3б) с $k=1,5$, когда $IRE_{\Psi_{2.1}}=2$ ед., $IRE_{\Psi_{2.2}}=1$ ед. показывают, что $IPE_{\Theta_{2.2}} = (IRE_{\Psi_{2.2}} \cdot k - IRE_{\Psi_{2.2}}) \cdot k = 0,75$. Таким образом, развитие событий по варианту (рис. 5а) выгодней для суперсистемы. То есть, характер распределения во времени функции $re_{\Psi}[n]$ влияет на эффективность использования доступных ресурсов $se[n]$.

Покажем, что это справедливо в общем случае, а также то, что второй интегральный параметр от интегральной функции $re[n]$ является указателем на более выгодный вариант развития событий.

Определим показатель второго интегрального параметра от интегральной функции $re[n]$ символами VRE , а показатель второго интегрального параметра от интегральной функции $pe(t)$ символами VPE . Тогда

$$VRE = \int_{t_{sr}}^{t_{fr}} \left(\int_{t_{sr}}^t re(t) dt \right) = \sum_{n_{sr}}^{n_{fr}} \sum_{n_{sr}}^n re[n]; \quad (1)$$

$$VPE = \int_{t_{sp}}^{t_{fp}} \left(\int_{t_{sp}}^t pe(t) dt \right) = \sum_{n_{sp}}^{n_{fp}} \sum_{n_{sp}}^n pe[n]. \quad (2)$$

Теорема 1. Из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = (re_1[n], pe_1[n])$ и $\Psi_2 = (re_2[n], pe_2[n])$, где $IRE_1 = IRE_2$, $VRE_1 \neq VRE_2$ и $pe_1[n] = pe_2[n]$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re[n]$.

Доказательство 1. Учитывая, что $SE_1 = IRE_{\Psi_{1.1}} + IRE_{\Theta_{1.1}}$, $IRE_{\Theta_{1.1}} = SE_1 - IRE_{\Psi_{1.1}}$, тог-

да $IPE_{\Theta_{1.1}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1.2}} = k(IPE_{\Theta_{1.1}} - IRE_{\Psi_{1.2}}) = k(k \cdot IRE_{\Theta_{1.1}} - IRE_{\Psi_{1.2}}) = k(k \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} - IRE_{\Psi_{1.2}})$.

Если $k=1,5$, $IRE_{\Psi_{1.1}} = x$, $IRE_{\Psi_{1.2}} = 2x$, $(IRE_{\Psi_{1.1}} + IRE_{\Psi_{1.2}}) = IRE_{\Psi_1} = 3x$, $IPE_{\Theta_{1.2}} = 2,25 \cdot 2x - 1,5 \cdot 2x = 1,5x$.

Если $k=1,5$, $IRE_{\Psi_{2.1}} = 2x$, $IRE_{\Psi_{2.2}} = x$, $(IRE_{\Psi_{2.1}} + IRE_{\Psi_{2.2}}) = IRE_{\Psi_2} = 3x$, $IPE_{\Theta_{2.2}} = 2,25x - 1,5x = 0,75x$.

Таким образом, $IRE_{\Psi_{1.1}} < IRE_{\Psi_{2.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} > IPE_{\Theta_{2.2}}$.

Анализируя закономерности в изменении внутренней структуры выражения $IPE_{\Theta_{1.i}}$ (табл. 1 столбец 3), можно записать общее выражение для количества продуктов импульсной функции SE_N движения запасов инвестиций на момент N

$$SE_N = k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} + k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} + \dots k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.i}} - k^{N-1} \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} - k^{N-2} \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} - \dots k^{N-i} \cdot IRE_{\Psi_{1.i}} = \sum_{i=1}^N k^N \cdot IRE_{\Psi_{1.i+1}} - \sum_{i=1}^N k^{N-i} \cdot IRE_{\Psi_{1.i+1}},$$

где $N = n_{fr} - n_{sr}$, i – порядковый номер интервала дискретизации ($i_1 = n_{fr}$, $i \in [n_{fr}; n_{sr}]$).

На основании выявления закономерности в изменении внутренней структуры выражения $VRE_{\Psi_{1.i}}$ (табл. 2 столбец 3), можно записать общее выражение для второго интегрального параметра на момент N .

Общее выражение для определения интегрального параметра от интегральной функции $IRE_{\Psi_{1.i}}$ будет иметь вид:

$$VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{1.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} + (N-2) \cdot IRE_{\Psi_{1.3}} + \dots + IRE_{\Psi_{1.i}} = \sum_{i=1}^N IRE_{\Psi_{1.i}} \cdot (N-i+1).$$

Рассмотрим пример расчета данного показателя для двух выше приведенных случаев доказательства:

1. Если $IRE_{\Psi_{1.1}} = x$, $IRE_{\Psi_{1.2}} = 2x$, $VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{1.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{1.2}} = 2 \cdot x + 2x = 4x$

2. Если $IRE_{\Psi_{2.1}} = 2x$, $IRE_{\Psi_{2.2}} = x$, $VRE_N = N \cdot IRE_{\Psi_{2.1}} + (N-1) \cdot IRE_{\Psi_{2.2}} = 2 \cdot 2x + x = 5x$.

Следовательно, $IRE_{\Psi_{1.1}} < IRE_{\Psi_{2.1}}$, $IPE_{\Theta_{1.2}} > IPE_{\Theta_{2.2}}$, $VRE_N < VRE_N$.

Таблица 1 – Изменение выражений для параметров $IRE_{\Theta_{1,i}}$ и $IPE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины потребления ресурсов $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1 для $I = 5$

$IRE_{\Psi_{1,i}}$	Изменение выражения для параметра $IRE_{\Theta_{1,i}}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1
1	2
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$SE - IRE_{\Psi_{1,1}} = IRE_{\Theta_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$(SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}} = IRE_{\Theta_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}} = IRE_{\Theta_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}} = IRE_{\Theta_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$(((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,5}} = IRE_{\Theta_{1,5}}$
1	3
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$(SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$(((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$((((((SE - IRE_{\Psi_{1,1}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,2}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,3}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,4}}) \cdot k - IRE_{\Psi_{1,5}}) \cdot k = IPE_{\Theta_{1,5}}$

Таблица 2 – Изменение выражения определения первой и второй интегральных характеристик по функции входа операции Ψ_1 для $I = 5$

$IRE_{\Psi_{1,i}}$	Изменение выражения для интегрального значения ряда $IRE_{\Psi_{1,i}}$ операции Ψ_1
1	2
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$
1	3
$IRE_{\Psi_{1,1}}$	$IRE_{\Psi_{1,1}}$
$IRE_{\Psi_{1,2}}$	$2 IRE_{\Psi_{1,1}} + IRE_{\Psi_{1,2}}$
$IRE_{\Psi_{1,3}}$	$3 IRE_{\Psi_{1,1}} + 2 IRE_{\Psi_{1,2}} + IRE_{\Psi_{1,3}}$
$IRE_{\Psi_{1,4}}$	$4 IRE_{\Psi_{1,1}} + 3 IRE_{\Psi_{1,2}} + 2 IRE_{\Psi_{1,3}} + IRE_{\Psi_{1,4}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$5 IRE_{\Psi_{1,1}} + 4 IRE_{\Psi_{1,2}} + 3 IRE_{\Psi_{1,3}} + 2 IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$
$IRE_{\Psi_{1,5}}$	$5 IRE_{\Psi_{1,1}} + 4 IRE_{\Psi_{1,2}} + 3 IRE_{\Psi_{1,3}} + 2 IRE_{\Psi_{1,4}} + IRE_{\Psi_{1,5}}$

Поскольку тенденция увеличения последующего значения вложения ценности по отношению к предшествующему вложению в операцию Ψ приводит к увеличению показателя $IPE_{\Theta_{1,N}}$ и к снижению VRE_{N} , то минимальное значение второго интегрального параметра от интегральной функции $re[n]$ является указателем на лучшую операцию. Теорема доказана.

Теорема 2. Из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = (re_1[n], pe_1[n])$ и $\Psi_2 = (re_2[n], pe_2[n])$, где $re_1[n] = re_2[n]$,

$IPE_1 = IPE_2$, $VPE_1 \neq VPE_2$, эффективней будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe[n]$.

Доказательство 2. Учитывая, что с каждым этапом получения выходной продукции мы получаем дополнительную возможность вложить высвободившиеся ресурсы в качестве добавленной ценности в параллельные операции. Тогда $IPE_{\Psi_{1,1}}$ является входной продукцией $IRE_{\Theta_{1,1}}$, а полученный выходной продукт будет равен $IPE_{\Theta_{1,1}} = k \cdot IRE_{\Theta_{1,1}} = k \cdot IPE_{\Psi_{1,1}}$. В свою очередь, если

имеется второй импульс $IPE_{\Psi 1,2}$ операции Ψ , он может быть использован при формировании ресурсов второй параллельной операции Θ , входная продукция которой равна $IRE_{\Theta 1,2} = k \cdot IRE_{\Theta 1,1} + IPE_{\Psi 1,2} = k \cdot IPE_{\Psi 1,1} + IPE_{\Psi 1,2}$.

Рассмотрим случай, когда $k=1,5$, $IPE_{\Psi 1,1} = x$, $IPE_{\Psi 1,2} = 2x$, тогда $IPE_{\Theta 1,2} = 1,5 \cdot x + 2x = 3,5x$.

Если $k=1,5$, $IPE_{\Psi 2,1} = 2x$, $IPE_{\Psi 2,2} = x$, $IPE_{\Theta 2,2} = 3x + 1,5x = 4,5x$.

Следовательно, $IPE_{\Psi 1,1} < IPE_{\Psi 2,1}$, $IPE_{\Theta 1,2} < IPE_{\Theta 2,2}$.

Анализируя закономерности в изменении внутренней структуры выражения $IPE_{\Theta 1,i}$ от изменения интервала дискретизации (табл. 3 столбец 3), можно записать общее выражение для количества продуктов импульсной функции SE_N движения запасов инвестиций на момент N

$$SE_N = IPE_{\Psi 1,1} \cdot k^N + IPE_{\Psi 1,2} \cdot k^{N-1} + IPE_{\Psi 1,3} \cdot k^{N-2} + \dots + IPE_{\Psi 1,N} \cdot k = \sum_{i=1}^{i=N} IPE_{\Psi 1,i} \cdot k^{N-i+1},$$

где $N = n_{fp} - n_{sp}$, i – порядковый номер интервала дискретизации ($i_1 = n_{fp}$, $i \in [n_{fp}; n_{sp}]$).

На основании выявления закономерности в изменении внутренней структуры выражения $VPE_{\Psi 1,i}$ (табл. 4 столбец 3), можно записать общее выражение для второго интегрального параметра на момент N

$$VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi 1,1} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi 1,2} + (N-2) \cdot IPE_{\Psi 1,3} + \dots + IPE_{\Psi 1,i} \cdot (N-i+1).$$

Рассмотрим пример расчета данного показателя для двух случаев доказательства:

1. Если $IPE_{\Psi 1,1} = x$, $IPE_{\Psi 1,2} = 2x$, $VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi 1,1} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi 1,2} = 2 \cdot x + 2x = 4x$

2. Если $IPE_{\Psi 2,1} = 2x$, $IPE_{\Psi 2,2} = x$, $VPE_N = N \cdot IPE_{\Psi 2,1} + (N-1) \cdot IPE_{\Psi 2,2} = 2 \cdot 2x + x = 5x$.

Следовательно, $IPE_{\Psi 1,1} < IPE_{\Psi 2,1}$, $VRE_N < VRE'_N$. Теорема доказана.

Формула общеизвестного показателя, определяемого как прибыль или как добавленная ценность (A) связывает вход, и выход системного процесса с использованием параметров глобальной модели простой операции IRE и IPE – $A = IPE - IRE$.

Для обеспечения чувствительности абсолютного показателя к форме функций $re(t)$ и $pe(t)$, можно попытаться чисто технически обеспечить возможность определения второго интегрального параметра от этих функций для показателя определенного как VA . Для этого обеспечим чувствительность данного показателя путем сопоставления входа и выхода исследуемой глобальной модели операции с использованием ЧКЭ (1) и (2). Тогда

$$VA = VPE - VRE. \quad (3)$$

Определим относительный частный критерий VK – как отношение частного критерия VA к частному критерию VRE :

$$VK = \frac{VA}{VRE}. \quad (4)$$

Адекватность полученных ЧКЭ проверим для случая – оценки равноэффективных моделей операций. Концеп-

Таблица 3 – Изменение выражений для параметров $IRE_{\Theta 1,i}$ и $IPE_{\Theta 1,i}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины поступления ресурсов $IPE_{\Psi 1,i}$ операции Ψ_1 для $I = 5$

Изменение выражения для параметра $IRE_{\Theta 1,i}$ простых операций $\Theta_{1,i}$ в зависимости от величины $IPE_{\Psi 1,i}$ операции Ψ_1	
1	2
$IPE_{\Psi 1,1}$	$IPE_{\Psi 1,1}$
$IPE_{\Psi 1,2}$	$IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}$
$IPE_{\Psi 1,3}$	$(IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}$
$IPE_{\Psi 1,4}$	$((IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,4}$
$IPE_{\Psi 1,5}$	$((((IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,4}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,5})$
1	3
$IPE_{\Psi 1,1}$	$IPE_{\Psi 1,1} \cdot k$
$IPE_{\Psi 1,2}$	$(IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k$
$IPE_{\Psi 1,3}$	$((IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}) \cdot k$
$IPE_{\Psi 1,4}$	$((((IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,4}) \cdot k$
$IPE_{\Psi 1,5}$	$(((((IPE_{\Psi 1,1} \cdot k + IPE_{\Psi 1,2}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,3}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,4}) \cdot k + IPE_{\Psi 1,5}) \cdot k$

ция этого теста, основана на принципе эквивалентности операционных процессов.

Пусть имеется три синхронизированные модели глобальных операций Ψ , Θ_1 и Θ_2 , где модели операции и являются эквивалентными (рис. 4).

Если $re_{\Theta_1}[n] + re_{\Theta_2}[n] = re_{\Psi}[n]$, а $pe_{\Theta_1}[n] + pe_{\Theta_2}[n] = pe_{\Psi}[n]$, то модели операций Ψ и Θ_1 или Ψ и Θ_2 априори являются равноэффективными.

Если идентифицировать операции вида Ψ и Θ с использованием относительного ЧКЭ (2), то получим, что $VK_{\Psi} = VK_{\Theta_1} = VK_{\Theta_2} = 0,5$.

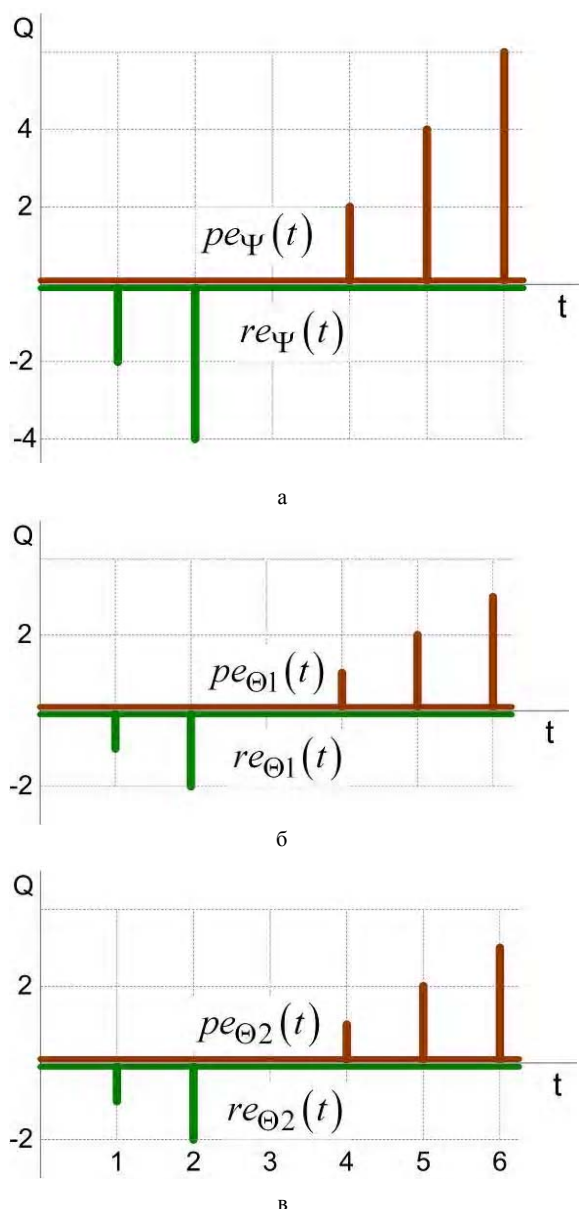


Рисунок 4 – Пример операции с распределенными параметрами $(re_{\Psi}[n], pe_{\Psi}[n])$ а) и равноэффективных синхронизированных с ней операций

$(re_{\Theta_1}[n], pe_{\Theta_1}[n])$ б) и $(re_{\Theta_2}[n], pe_{\Theta_2}[n])$ в)

Однако использовать искусственно созданные показатели, которые дают смещенную оценку необходимо крайне осторожно, поскольку исследование функций входа и выхода с использованием второго интегрального параметра осуществляется в рамках интервалов синхронизации. Так, сближение интервалов синхронизации, при прочих равных условиях, априори приводит к повышению эффективности операции. При этом вес функции входа должен ослабевать, а функции выхода возрастать. Поскольку показатели V_A и V_K не обладают чувствительностью к изменению интервала $[t_{fr}; t_{sp}]$, неизвестным является вес вторых интегральных параметров.

Следовательно, показатели V_A и V_K нельзя использовать в задачах рейтинговой оценки эффективности без специального обоснования адекватности оценивания.

Экспериментально установлено, что показатель V_K можно использовать для формирования множества моделей равноэффективных операций типа $(re_1(t), pe_1(t))$ и $(re_2(t) = k \cdot re_1(t), pe_2(t) = k \cdot pe_1(t))$.

Разработаем метод создания классов эталонных моделей, рейтинговая эффективность которых будет определяться с использованием определенных ЧКЭ.

Первый класс эталонных моделей предназначен для верификации чувствительности оценочных показателей к характеру функции $re[n]$. При этом:

1) формируется две последовательности случайных вещественных положительных чисел $re_1[n]$ и $re_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{rs}, n_{rf}]$;

2) путем масштабирования значений одного из рядов данные приводятся к виду удовлетворяющего условие $IRE_1 = IRE_2$;

3) с использованием рекуррентного выражения формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

4) с использованием рекуррентного выражения $vre[n] = vre[n-1] + ire[n]$ формируются интегральные функции и $vre_2[n]$.

5) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел $pe_1[n] = pe_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{ps}, n_{pf}]$ с ограничением $n_{sp} > n_{fp}$ и $IPE > IRE$.

6) с использованием рекуррентного выражения $ipe[n] = ipe[n-1] + pe[n]$ формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

7) с использованием рекуррентного выражения $vpe[n] = vpe[n-1] + ipe[n]$ формируются интегральные функции $vpe_1[n]$ и $vpe_2[n]$.

8) по минимуму значения полученного с использованием выражения (1) осуществляется рейтинговая оценка эффективности моделей операций.

9) модели $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$ оцениваются с использованием верифицируемого показателя.

10) осуществляется оценка непротиворечивости полученного результата, на основании которой принимается решение о необходимости дальнейшего тестирования данного показателя.

Пример формирования тестовых операций и их интегральных характеристик для верификации чувствительности оценочного показателя по входу модели операции изображен в табл. 5

Второй класс эталонных моделей предназначен для верификации чувствительности оценочных показателей к характеру функции $pe[n]$. При этом:

1) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел которая используется для формирования функций $re_1[n] = re_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{rs}, n_{rf}]$;

3) с использованием рекуррентного выражения формируются интегральные функции $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$.

4) с использованием рекуррентного выражения $vre[n] = vre[n-1] + ire[n]$ формируются интегральные функции $vre_1[n]$ и $vre_2[n]$.

5) формируется последовательность случайных вещественных положительных чисел $pe_1[n] = pe_2[n]$ для заданного диапазона временного ряда $n \in [n_{ps}, n_{pf}]$ с ограничением $n_{sp} > n_{fp}$ и $IPE > IRE$.

6) с использованием рекуррентного выражения $ipe[n] = ipe[n-1] + pe[n]$ формируются интегральные функции $ipe_1[n]$ и $ipe_2[n]$.

7) с использованием рекуррентного выражения $vpe[n] = vpe[n-1] + ipe[n]$ формируются интегральные функции $vpe_1[n]$ и $vpe_2[n]$.

8) по минимуму значения полученного с использованием выражения (2), (3), (4) осуществляется рейтинговая оценка эффективности моделей операций.

9) модели $ire_1[n]$ и $ire_2[n]$ оцениваются с использованием верифицируемого показателя.

10) осуществляется оценка непротиворечивости полученного результата, на основании которой принимается решение о необходимости дальнейшего тестирования данного показателя.

Пример формирования тестовых операций и их интегральных характеристик для верификации чувствительности оценочного показателя по выходу модели операции изображен в табл. 6.

На следующем этапе верификации оценочные показатели тестируются на моделях равноэффективных операций. Здесь нет необходимости в генерировании множества пар тестовых операций, поскольку показатели, которые успешно прошли на противоречивость предыдущие тесты, на первой тестовой паре третьего класса эталонных операций сразу проявляют возможность оценивать равноэффективные операции для которых $VRE_1 = k \cdot VRE_2$, что влечет за собой $IPE_1 = k \cdot IPE_2$.

Пример тестовых операций и их интегральных характеристик для тестирования возможностей относительного оценивания верифицируемых показателей приведен в табл. 7.

Таблица 5 – Данные эталонных моделей операций первого класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			5	5	5	0		
2	2	3	4	0			4	9	14	0		
3	3	6	10	0			3	12	26	0		
4	4	10	20	0			2	14	40	0		
5	5	15	35	0			1	15	55	0		
6	0			0	0	0	0			0	0	0
7	0			3	3	3	0			3	3	3
8	0			3	6	9	0			3	6	9
9	0			3	9	18	0			3	9	18
10	0			3	12	30	0			3	12	30
11	0			3	15	45	0			3	15	45
12	0			3	18	63	0			3	18	63
13	0			3	21	84	0			3	21	84

Таблица 6 – Данные эталонных моделей операций второго класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			1	1	1	0		
2	2	3	4	0			2	3	4	0		
3	3	6	10	0			3	6	10	0		
4	4	10	20	0			4	10	20	0		
5	5	15	35	0			5	15	35	0		
6	0			0	0	0	0			0	0	0
7	0			1	1	1	0			7	7	7
8	0			2	3	4	0			6	13	20
9	0			3	6	10	0			5	18	38
10	0			4	10	20	0			4	22	60
11	0			5	15	35	0			3	25	85
12	0			6	21	56	0			2	27	112
13	0			7	28	84	0			1	28	140

Таблица 7 – Данные эталонных моделей операций третьего класса и их интегральных характеристик

n	$re_1[n]$	$ire_1[n]$	$vre_1[n]$	$pe_1[n]$	$ipe_1[n]$	$vpe_1[n]$	$re_2[n]$	$ire_2[n]$	$vre_2[n]$	$pe_2[n]$	$ipe_2[n]$	$vpe_2[n]$
0	0	0	0	0			0	0	0	0		
1	1	1	1	0			2	2	2	0		
2	1	2	3	0			2	4	6	0		
3	1	3	6	0			2	6	12	0		
4	1	4	10	0			2	8	20	0		
5	1	5	15	0			2	10	30	0		
6	0			0	0	0				0	0	0
7	0			2	2	2				4	4	4
8	0			2	4	6				4	8	12
9	0			2	6	12				4	12	24
10	0			2	8	20				4	16	40
11	0			2	10	30				4	20	60
12	0			2	12	42				4	24	84
13	0			2	14	56				4	28	112

Как уже ранее было показано, для таких моделей

$$VK_1 = VK_2.$$

Далее используются классы эталонных моделей, разработанные для верификации простых операций [2].

На основании результатов верификации принимается решение о возможности использования оценочного показателя в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными во времени параметрами.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения тестирования осуществляется отбор показателей по наличию формальных признаков. Таким внешним признакам отвечают, например, показатели RL [3] и EL [4].

$$RL = \int_{t_0}^{t_a} \left[\int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t |re(t)| dt \right) dt - \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t pe(t) dt \right) dt \right] dt. \quad (5)$$

$$EL = \frac{\int_{t_a}^{t_d} \left(\int_{t_a}^t \left[\int_{t_0}^t pe(t) dt - \int_{t_0}^t |re(t)| dt \right] dt \right) dt}{\int_{t_0}^{t_a} \left[\int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t |re(t)| dt \right) dt - \int_{t_0}^t \left(\int_{t_0}^t pe(t) dt \right) dt \right] dt}, \quad (6)$$

где $t \in [0, t_a]$; $t_d = t_a + 1$.

С использованием предложенного метода исследовались пары моделей операций приведенных в табл. 5 – табл. 7.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты верификации показателей на четырех классах моделей эталонных операций приведены в табл. 8.

Таблица 8 – Сопоставление рейтинговых оценок эталонных моделей операций и оценок полученных с использованием верифицируемых показателей

Оценочные показатели	Классы операций		
	1	2	3
VRE_1	35		
VRE_2	55		
VPE_1		84	
VPE_2		140	
VK_1	1,4	1,4	2,73
VK_2	0,53	3	2,73
RL_1	1023	840	168
RL_2	1513	430	336
EL_1	0,0029	0,0077	0,0268
EL_2	0,0020	0,0155	0,0268

Каждый класс моделей позволяет верифицировать отдельный аспект модели операции. Это связано с тем, что среди исследуемых показателей может не оказаться такого, который непротиворечиво оценивает все классы операций. В таком случае, если выбор все же необходимо сделать, он осуществляется с учетом особенностей оптимизируемого процесса.

Первый класс операций позволяет определить чувствительность верифицируемого показателя по отношению к особенностям распределения плотности входной функции $re(t)$, второй класс – соответственно, позволяет определить чувствительность показателя по отношению к особенностям распределения плотности выходной функции $pe(t)$.

Третий класс эталонных моделей операций позволяет определить возможности комплексного оценивания вход-выход.

Четвертый класс операций позволяет оценивать не только относительные возможности показателей.

Анализ структуры верифицируемых объектов показывает, что показатель (1) является абсолютным показателем, а показатель (2) – относительным. Максимальному значению эффективности соответствует минимальное значение показателя (1) и максимальное значение показателя (2).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследований показывают, что в качестве критерия оптимизации пытаются использовать разные показатели. Это может быть «энергетический продукт» [5], «критическая нагрузка» [6], «надежность» [7], «критерий заполнения» [8], «постоянная энергия ошибки выборки» [9], «минимальное отклонение» [10] и т. д. Перечень работ можно расширять достаточно долго. Возникает естественный вопрос: «Можно ли в качестве критерия оптимизации процесса использовать показатель, который характеризует некоторый технический аспект исследуемого процесса?».

В этом смысле оптимизация по критерию минимума «затрат» [11] находится в несколько более выгодном

положении, поскольку это понятие можно трактовать как кибернетическое. Это связано с тем, что затраты, по крайней мере, сопутствуют любому системному процессу. Критический анализ данному показателю был дал выше, однако в системах которые не работают в непрерывном режиме, этот показатель может использоваться в качестве критерия оптимизации, поскольку режим управления по минимуму затрат, если не учитывать фактор времени, соответствуют получению максимума добавленной ценности.

Второй аспект, который является характерным для работ связанных с разработкой кибернетических критериев оптимизации, попытка использования кибернетических показателей основанных на определении первого интегрального параметра по входу или входу [11], выходу или входу и выходу исследуемой операции [12]. Естественно, это исключает возможность учитывать распределенный характер во времени технологических потоков управляемых систем, а соответственно, и фактор времени.

В рамках разработанного класса идентифицированных моделей с распределенными параметрами обеспечивается проверка верифицируемого показателя на непротиворечивость сравнительной оценки.

Все дело в том, что частные показатели обеспечивают адекватное ранжирование моделей операций только своего класса, и не отображают численное значение самой эффективности, поскольку показателями эффективности, по сути, не являются. По этой причине численные значения оценки одних и тех же моделей операций, с использованием разных частных показателей, между собой не сопоставимы.

По этой же причине значения частных показателей, полученных в результате оценивания моделей операций своего класса, не являются эталонами эффективности.

С другой стороны, использование предложенного метода в рамках созданных классов эталонных моделей уже позволяет специалистам практикам критически сузить круг показателей, которые планируется использовать в качестве критерия оптимизации для оценки моделей операций с распределенными параметрами.

Таким образом, дальнейшие исследования в данном направлении могут быть направлены на расширение классов эталонных моделей операций.

ВЫВОДЫ

Впервые доказано, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)]$ и $\Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)]$, где $IRE_1 = IRE_2$, $VRE_1 \neq VRE_2$ и $pe_1(t) = pe_2(t)$, эффективней будет операция с меньшим значением параметра второй интегральной характеристики функции $re(t)$.

Впервые доказано, что из двух синхронизированных операций с распределенными параметрами $\Psi_1 = [re_1(t), pe_1(t)]$ и $\Psi_2 = [re_2(t), pe_2(t)]$, где $re_1(t) = re_2(t)$, $IPE_1 = IPE_2$, $VPE_1 \neq VPE_2$, эффективней будет операция с большим значением параметра второй интегральной характеристики функции $pe(t)$.

Впервые разработано три класса эталонных моделей операций с распределенными параметрами и метод идентификации эталонных операций в рамках своего класса с использованием частных показателей.

Разработка предложенного метода позволяет осуществлять обоснованный выбор показателя для использования в качестве критерия оптимизации операционных процессов с распределенными параметрами. Возможность выбора адекватного критерия оптимизации обеспечит повышение темпов развития производственных структур с оптимизированными процессами.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lutsenko I. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters / [I. Lutsenko, E. Fomovskaya, I. Oksanych et al] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 1, Issue 4 (85). – P. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91025
2. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations / [I. Lutsenko, E. Vihrova, E. Fomovskaya, O. Serduik] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, Issue 4 (80). – P. 42–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66307
3. Lutsenko I. Identification of target system operations. 2. Determination of the value of the complex costs of the target operation / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 1, Issue 2 (73). – P. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.35950
4. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations / I. Lutsenko // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol. 2, Issue 2 (74). – P. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963
5. Vasilyev E. S. Optimization of the architecture of a charge pump device on the basis of the energy efficiency criterion /

E. S. Vasilyev // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2013. – Volume 58, Issue 1. – P. 95 – 99. <http://dx.doi.org/10.1134/s1064226913010099>

6. Wu Y. Henig efficiency of a multi-criterion supply-demand network equilibrium model / Y. Wu, T. C. Cheng // Journal of Industrial and Management Optimization. – 2006. – Volume 2, Issue 3. – P. 269–286. <http://dx.doi.org/10.3934/jimo.2006.2.269>
7. Optimization of the structure of multifunctional information systems according to the criterion of a required value of the efficiency ratio / [U. V. Anishchenko, L. I. Kul'bak, A. N. Kryuchkov, T. S. Martinovich] // Automatic Control and Computer Sciences. – 2008. – Volume 42, Issue 4. – P. 203–209. DOI: 10.3103/S0146411608040068
8. Miskowicz M. Efficiency of Event-Based Sampling According to Error Energy Criterion / M. Miskowicz // Instrumentation, Signal Treatment and Uncertainty Estimation in Sensors. – 2010. – 10(3). – P. 2242–2261. DOI: 10.3390/s100302242
9. Xu Q. Adaptive surrogate-based design optimization with expected improvement used as infill criterion / Q. Xu, E. Wehrle, H. Baier // A Journal of Mathematical Programming and Operations Research. – 2012. – Volume 61, Issue 6. – P. 661–684. <http://dx.doi.org/10.1080/02331934.2011.644286>
10. Xia L. Optimization of Markov decision processes under the variance criterion / L. Xia // Automatica. – 2016. – Volume 73. – P. 269–278. <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2016.06.018>
11. Харченко В.П. Оптимізація мережі інформаційних аеронавігаційних засобів за узагальненим критерієм ефективності / В.П. Харченко, Д.Г. Бабейчук, О.С. Слюняев // Аерокосмічні системи моніторингу та керування. – 2009. – № 1. – С. 3–5. DOI: 10.18372/2306-1472.38.1650
12. Köhl M. Performance Requirements and Criteria / M. Köhl // Journal of Chromatography Library. – 2004. – Vol. 35. – P. 85–90. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4770\(08\)60418-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-4770(08)60418-2)

Статья поступила в редакцию 12.02.2017.

После доработки 01.06.2017.

Луценко І. А.¹, Фомовська О. В.², Оксанич І. Г.³, Сердюк О. Ю.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри електронних апаратів Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-управляючих систем Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського, Кременчук, Україна

⁴Аспірант кафедри комп'ютерних систем та мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

РОЗРОБКА МЕТОДА ВЕРИФІКАЦІІ КРИТЕРІЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОПЕРАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ З РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання верифікації критерію для оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами.

Мета роботи – створення методу верифікації оціночних критеріїв, що має властивості високої вибірковості і дозволяє вилучити ті показники, які забезпечують суперечливі результати по відношенню до результатів приватних критеріїв ефективності.

Метод. Запропоновано метод верифікації глобального критерію для оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами продуктових потоків, який заснований на формуванні класів еталонних операцій, ідентифікованих з використанням локальних критеріїв ефективності, які, в свою чергу, засновані на використанні виявлених особливостей других інтегральних параметрів від інтегральних функцій входу і виходу глобальної моделі операції, адекватність яких математично доведена, забезпечуючи тим самим відбір показника, оціночні особливості якого дозволяють узгодити результати операційної діяльності керованих систем з метою їх власника за рахунок виходу в режим управління відповідного максимуму ефективності використання ресурсів.

Результати. Розроблено алгоритм реалізації методу верифікації оціночних показників, який був використаний при проведенні обчислювальних експериментів, пов'язаних з ілюстрацією можливостей запропонованого методу.

Висновки. Вперше розроблено три класи еталонних моделей операцій з розподіленими параметрами, кожна з яких ідентифікована з використанням локального критерію ефективності.

Розробка запропонованого методу дозволяє здійснювати обґрунтований вибір єдиного показника для використання в якості глобального критерію оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами будь-яких систем, процеси яких цього вимагають. Можливість вибору адекватного критерію оптимізації забезпечить підвищення темпів розвитку виробничих структур.

Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу, реалізованого у вигляді алгоритму, що дозволяє рекомендувати його фахівцям-практикам для відбору оціночного критерію з безлічі показників, які пропонуються дослідниками в якості критерію оптимізації операційних процесів з розподіленими параметрами. Показник, який успішно пройшов верифікацію, забезпечує

можливість узгодження параметрів операційного процесу з метою власника (суперсистеми). При цьому, передбачається, що метою суперсистеми є максимізація власних можливостей, прямо пов'язаних з ефективністю використання доступних ресурсів.

Ключові слова: критерій оптимізації, верифікація показників, еталонна модель операції, операції з розподіленими параметрами, оцінка ефективності операції.

Lutsenko I.¹, Fomovskaya E.², Oksanych I.³, Serdiuk O.⁴

¹Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Electronic Devices of Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Head of Department of Electronic Devices, Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

³PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information and Control Systems, Kremenchug national University them. M. Ostrogradskii, Ukraine

⁴Postgraduate student of Department of Computer Systems and Networks, SIHE «Kryvyi Rih National University», Ukraine

DEVELOPMENT OF CRITERION VERIFICATION METHOD FOR OPTIMIZATION OF OPERATIONAL PROCESSES WITH THE DISTRIBUTED PARAMETERS

Context. The urgent verification problem of criterion for optimization of operational processes with the distributed parameters is solved.

Objective is creation of a verification method for estimated criteria which have high selectivity and allow excluding those indicators, which provide contradictory results in relation to results of local efficiency criteria

Method. The verification method of global criterion for optimization of operational processes with the distributed parameters of product flows which is based on reference operations classes formation identified with use of the local efficiency criteria, in turn, are based on use of the revealed features of the second integrated parameters from integrated functions of an input and output of global operation model, which adequacy is mathematically proved is offered, providing thereby indicator selection, the estimated features of which allow processing activities coordinating results of the operated systems with the purpose of their owner at the expense of an output in control mode corresponding to a maximum of resources efficiency.

Results. The algorithm of realization of a verification method for estimated indicators which has been used when carrying out computing experiments connected with the illustration of the offered method opportunities is developed.

Conclusions. For the first time three classes of reference models of operations with distributed parameters, each of which is identified with the local criterion of efficiency have been developed.

The development of the proposed method let us to make an informed choice of the one indicator for its using as a global optimization criterion of any system operational processes with distributed parameters which require this. The ability to select the adequate optimization criterion will improve the production structures development rate.

The experiments have been confirmed the operability of the proposed method, implemented in the algorithm form so it should be recommended to practicing experts for the estimated criteria selection from the indicators set which are offered by the researchers as an optimization criterion for operational processes with distributed parameters. The indicator which has successfully passed the verification enables coordination of the operational process parameters with the owner's (supersystem's) goal. At the same time, it is supposed that the purpose of supersystem is the maximization of own available resources opportunities which are directly connected with use of resources efficiency.

Keywords: optimization criterion, indicators verification, operation reference model, operation with the distributed parameters, operation efficiency evaluation.

REFERENCES

1. Lutsenko I., Fomovskaya E., Oksanych I., Vihrova E., Serdiuk O. Formal signs determination of efficiency assessment indicators for the operation with the distributed parameters, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 1, Issue 4 (85), pp. 24–30. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.91025
2. Lutsenko I., Vihrova E., Fomovskaya E., Serdiuk O. Development of the method for testing of efficiency criterion of models of simple target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 2, Issue 4 (80), pp. 42–50. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66307
3. Lutsenko I. Identification of target system operations. Determination of the value of the complex costs of the target operation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 1, Issue 2 (73), pp. 31–36. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.35950
4. Lutsenko I. Identification of target system operations. Development of global efficiency criterion of target operations, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol. 2, Issue 2 (74), pp. 35–40. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.38963
5. Vasilyev E. S. Optimization of the architecture of a charge pump device on the basis of the energy efficiency criterion, *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, Volume 58, Issue 1, pp. 95–99.
6. Wu Y., Cheng T. C. Henig efficiency of a multi-criterion supply-demand network equilibrium model, *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2006, Volume 2, Issue 3, pp. 269–286.
7. Anishchenko U. V., Kul'bak L. I., Kryuchkov T. S., Martinovich A. N. Optimization of the structure of multifunctional information systems according to the criterion of a required value of the efficiency ratio, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2008, Volume 42, Issue 4, pp. 203–209.
8. Miskowicz M. Efficiency of Event-Based Sampling According to Error Energy Criterion. Instrumentation, *Signal Treatment and Uncertainty Estimation in Sensors*, 2010, 10 (3), pp. 2242–2261.
9. Xu Q., Wehrle E., Baier H. Adaptive surrogate-based design optimization with expected improvement used as infill criterion, *A Journal of Mathematical Programming and Operations Research*, 2012, Volume 61, Issue 6, pp. 661–684.
10. Xia L. Optimization of Markov decision processes under the variance criterion, *Automatica*, 2016, Volume 73, pp. 269–278.
11. Harchenko V. P., Babeychuk D. G., Slyunyaev O. S. Optimizatsiya merezhi informatsiy nih aeronavigatsiy nih zasobiv za uzagalnenim kriteriem efektnosti, *Aerokosmichni sistemi monitoringu ta keruvannya*, 2009, No. 1, pp. 3–5.
12. Köhl M. Performance Requirements and Criteria, *Journal of Chromatography Library*, 2004, Vol. 35, pp. 85–90.

AUTOMATIC CONTROL OF THE ORE SUSPENSION SOLID PHASE PARAMETERS USING HIGH-ENERGY ULTRASOUND

Context. The authors have solved the urgent problem of controlling automatically the parameters of solid ore suspension aimed for conversion thus increasing the end product quality and facilitating the choice and adherence to the concentration specifications.

Objective. The research aims at developing the method of obtaining operational data as to iron ore characteristics while concentrating, namely distribution of solid pulp particles as to their sizes and estimated grade applying multi-channel ultrasonic measurements.

Method. In order to solve the problem of controlling automatically the parameters of solid ore suspension, the authors suggest the method of measuring the intensity of high-frequency bulk ultrasonic waves covering a fixed distance in a measuring chamber containing ore suspension under the influence of ultrasonic vibrations and in case of their absence. The calculated correlations of the measured values make it possible to determine the parameters of solid ore suspension. Besides, while measuring we can observe the formation of gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves in the ore suspension flow. It is possible to measure the intensity of gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves covering the fixed distance if the measuring chamber contains some reference fluid and the ore suspension flow under ultrasonic vibrations and in the absence thereof. The intensity of ultrasonic vibrations influencing the suspension flow is changed according to the relevant law.

Results. The dynamic effects of high-frequency ultrasound provide a theoretical basis and a practical approval of the method controlling the solid phase of iron ore pulps in order to displace the particles of the required grain-size class to the measuring zone and to determine the grade in ore particles.

The developed purpose-designed programme realizes a numerical analysis and graphical representation of simulation results of changing solid pulp particle-sizes under the controlled influence of high-energy ultrasonic radiation pressure.

Conclusions. The authors have devised the method for controlling the distribution of the grade in crushed ore particle-size classes in the pulp flow by means of measuring the changes in the distribution parameters of high- and low-frequency ultrasonic waves as well as gamma-radiation. The method is different from the existing ones by the fact that in the course of measuring, the crushed ore particles of the required size and density are displaced to the measuring zone by exposing the pulps to the high-energy ultrasound influence thus increasing the measurement accuracy by 0.76%.

Keywords: automatic control, ore, suspension, solid phase, particle size distribution, crushed ore, high energy ultrasound.

NOMENCLATURE

$\bar{E}$ is a time average energy density in the incident wave;

σ_s is a effective cross sections of scattering;

σ_p is a effective cross sections of absorption;

I_v is a value of the scattered wave intensity at an angle v ;

$n_r(Z, t)$ is a the concentration of pulp solid phase particles;

R is a radius;

Z is a coordinate Z in ultrasonic field;

T is a time;

$V_r(Z, t)$ is a particle displacement speed;

I is a intensity of ultrasonic waves;

ν_0 is a frequency of the sound;

α is a attenuation coefficient;

$n_r(Z, t)$ is a concentration of particles

ρ_T is a particle density;

c_r is a velocity of ultrasound in the material of particle;

ρ is a density of investigated medium;

c is a ultrasound velocity in investigated medium;

μ_s is a mass attenuation coefficients of suspension ore material;

μ_w is a mass attenuation coefficients of water;

ρ_w is a density of water;

ρ_s is a density of suspension ore material particles;

W is a volume fraction of ore particles in suspension;

$S(t)$ is the signal, which is generated;

S_b is the measured value S in the presence of high intensity ultrasonic oscillations influence;

S_0 is the measured value S in the absence of this influence;

k_1 is a proportionality coefficient.

INTRODUCTION

One of the most important parameters, which has a decisive influence on the qualitative and quantitative indicators of separation beneficiation technology is the degree of minerals disclosure at every stage of the process. For operational control of this parameter during the technological process it is proposed to use measurable redistribution of pulp solid phase particles under the influence of the dynamic effects of high-energy ultrasound.

Due to the radiation pressure of the high-energy ultrasound in the measurement zone there is a redistribution of crushed ore particles by size. At a constant pulp flow rate the characteristics of this redistribution are determined by the intensity of the ultrasound field and the concentration and the characteristics of the pulp solid phase.

Thus a method of ore suspension parameters automatic control allows to increase the stability and reliability of measurement results of ore suspension solid phase.

1 PROBLEM STATEMENT

The object of the invention is to improve a method of ore suspension parameters automatic control by increasing the stability and reliability of measurement results.

The problem is solved by the fact that the method of automatic control of the ore suspension solid phase parameters, which comprising the forming of ore suspension material flow and the reference fluid in the measuring chamber, periodic influence of ultrasonic vibrations on suspension flow, formation of high frequency bulk ultrasonic waves in the ore suspension flow, intensity measurement of high frequency bulk ultrasonic waves, which are passed a fixed distance in the presence of reference liquid and ore suspension flow in the measuring chamber in periods of ultrasonic oscillations influence on suspension flow, and for its absence, and calculation of measured values ratios, according to which the parameters of ore suspension solid phase are determined.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Three types of controlled parameters, which characterizing respectively the quality and quantity of processed ore materials, and the production situations, the state of the technological equipment are necessary for effective concentrating factories process control [2–4, 7, 11]. The known ultrasonic testing methods of the pulp parameters allow to identify two of its main characteristics – density and particle size distribution [2, 3, 8, 10–13, 16].

In [1, 12, 15] several methods of ultrasonic testing of mineral disclosure degree (useful component) during ore grinding are proposed and investigated. It is noted that the mineral disclosure degree control with the known fineness of analyzed particle may be reduced to measuring of this particle density.

One of the proposed methods is based on the action of a powerful (high-energy) ultrasound on the particle during its motion. The strength of the radiation pressure on a particle in a plane wave is determined by the formula, which was obtained by Westervelt [2, 5]

$$F_r = \bar{E}(\sigma_s + \sigma_p) - \bar{E} \oint I_v \cos v dS. \quad (1)$$

For estimation of particles displacement under the influence of high-intensity ultrasound the change in the value of ultrasonic probe signal with frequency v in a direction perpendicular to the motion of pulp is determined. In [7] the ratio of two probe signal values was studied, one of which S_0 is determined without the influence of a powerful ultrasonic field, the other S_1 – with the presence. It is concluded that the density of the pulp solid phase particles can be determined by value of S_1/S_0 .

However, this determination method has its disadvantages. First of all, it should be noted that the ultrasonic attenuation coefficient of the probe signal α depends on the volume fraction of solids in the pulp, therefore change of this value can have a greater effect than the change in particle density. Furthermore, the expression, which defining the value of S_1/S_0 , is strong enough approximation, since it does not considers a number of factors, such as changes in particle size distribution law by a coefficient α etc. It should be noted that the use of high-

intensity ultrasound of given intensity is a promising direction for a preliminary purposeful redistribution of crushed material particles in a controlled pulp flow at development of its parameters control systems.

The closest technical solution, which is selected as a prototype, is a method of automatic control of the ore suspension solid phase parameters [6]. The disadvantage of this method is that the Love waves intensity in the measuring chamber wall, which contacts with the controlled medium flow varies according to condition of the metal film on the measuring chamber wall, which is in constant contact with the ore suspension abrasive medium. Wear and removing of the metal film leads to ambiguity of measured values, which are determined according to the parameters of the ore suspension solid phase. Thus, the known method requires constant monitoring and determining the state of metal film on the wall of the measuring chamber, and in the existing production is impossible. This fact leads to errors and, consequently, reduces the stability and reliability of measurement results.

According to the invention, gamma radiation and low frequency bulk ultrasonic waves in the flow of ore material slurry is formed, the intensity of gamma radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves is measured.

3 MATERIALS AND METHODS

To solve the problem of the automatic control parameters of ore solid slurries is proposed the method, which consists in measuring the intensity of the high frequency bulk ultrasonic waves transmitted at a fixed distance in the measuring container during periods ore slurry flow to affect the suspension with ultrasonic vibrations and in their absence. In this case, the calculated ratio of the measured values allows to determine the parameters of the solid phase of the ore slurry. Also, during the measurement are formed gamma radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves in the ore slurry flow and are measured the intensity gamma-radiation and low-frequency bulk ultrasonic waves transmitted at a fixed distance in the presence of the reference fluid in the measuring chamber and the ore slurry flow during effect on the slurry flow with ultrasonic vibrations and in their absence. At the same time, the intensity of ultrasonic vibrations during their effect on the flow of suspension is changed under the relevant law [8–10].

Functional scheme of automation, designed according to the stated principle of operation, is shown in Fig. 1.

Scheme of automation control product processing industry (Fig. 1) consists of three circuits. The circuit 1 is designed to generate directed high-energy ultrasound and consists of elements: 1A – control device (BC); 1B – switchgear (NS) of ultrasonic phased array. The contour 2 is designed for measurement of the pulp density on the basis of the ultrasonic signal to determine the concentration of ore particles in the pulp.

The circuit consists of the following elements: 2A – transducer ultrasonic signal transmitter (BE); 2B – indicating and recording secondary transducer of the ultrasonic signal (BIR); 2C – control device (BC); 2D – switchgear (NS) source of ultrasonic vibrations. Contour 3 is designed to measure the iron content in the ore particles on the basis of gamma radiation. The circuit consists of the following elements: 3A –

primary transducer of gamma-radiation signal (RE); 3b – indicating and recording secondary transducer of ultrasonic signal (RIR); 3b – control device (RC); 3G – switchgear (NS) source of ultrasonic vibrations.

The character of concentration and particle size distribution change in the field of high-energy ultrasound depends on the density of the particles themselves, the frequency and intensity of the incident radiation [4, 9, 13, 14, 16]. Let's estimate the influence of ultrasound radiation pressure to concentration change of particle with radius of

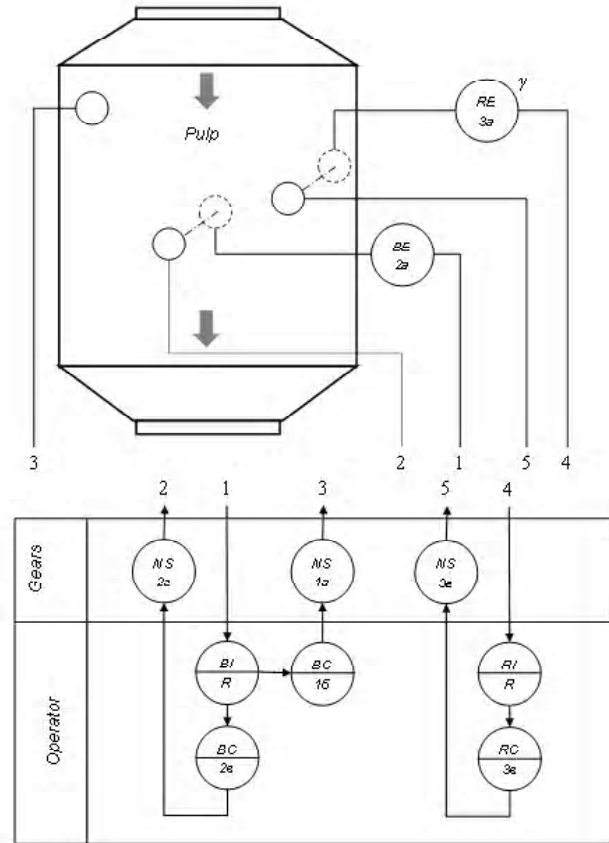


Figure 1 – Functional scheme of automation control product processing industry

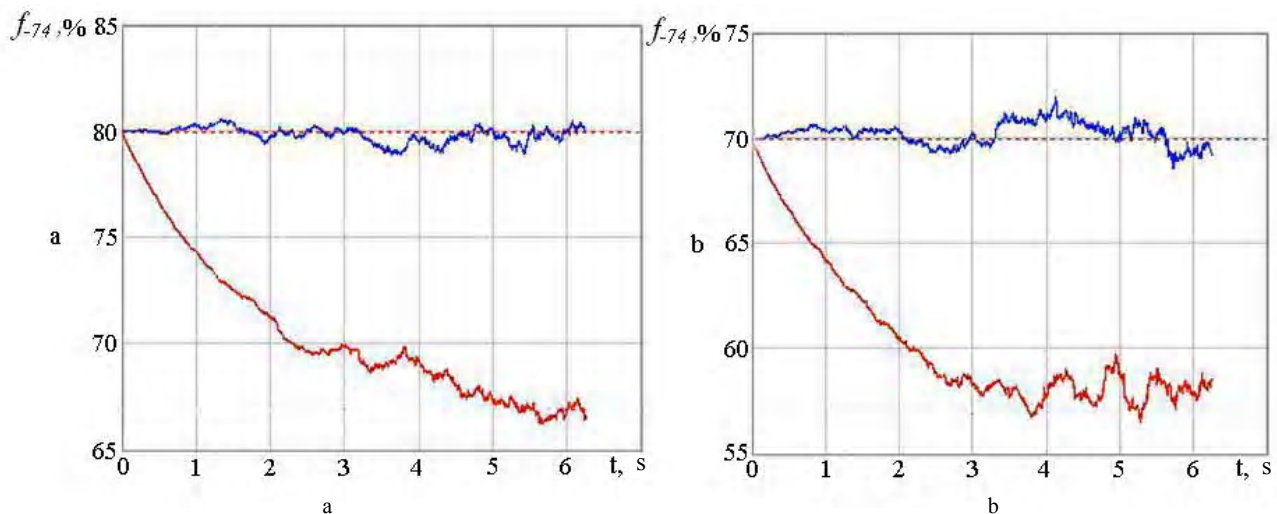


Figure 2 – The particle size measurement in controlled volume of pulp under the influence of the high-energy ultrasound radiation pressure: pulp density – 1250 g/l, the initial class content – 74 μm – 80% (a) and 70% (b)

r : Suppose that in a positive direction of x -axis pulp flows at a rate of V . Let's denote by $n_r(Z, t)$ the concentration of the particle radius of r at a depth of Z at time t .

$$\frac{\partial n_r(Z, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial Z} [V_r(Z, t) n_r(Z, t)]. \quad (2)$$

In this equation $V_r(Z, t)$ – is the particle displacement speed with radius r and coordinate Z in ultrasonic field. Speed is directed along the axis z , ie perpendicular to the flow of pulp. Generally, it depends on the time t , as the concentration of particles changes as a result of ultrasound action, and this leads to a change in the intensity of the ultrasound, which ultimately affects the particle displacement speed. However, this greatly complicates the solution of the equation (2), therefore we will assume that speed depends only on the coordinate Z . Position of the particle in relative units is determined by the axis of ordinates, as well the number of its steps by the abscissa axis. Considering that the intensity of ultrasonic waves I changes exponentially (initial value I_0), its attenuation coefficient α depends on the frequency of the sound ν_0 and considering the analysis carried out in [7], the concentration of particles $n_r(Z, t)$ is determined by the formula

$$n_r(Z, t) = n_0 \frac{e^{\alpha z}}{e^{\alpha z} - \alpha \beta t}. \quad (3)$$

$$St(X) = \begin{cases} 0, & X < 0, \\ 1, & X \geq 0; \end{cases}$$

$$\beta = \frac{2r(kr)^4}{27\eta c} I_0 (a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2); \quad \epsilon_1 = 1 - \frac{rc^2}{\rho c^2};$$

$$\epsilon_2 = 2 \frac{\rho - \rho}{2\rho + \rho}.$$

Displacement of ore suspension solid particles leads to their redistribution by size and concentration in zone of high energy ultrasound influence (Fig. 2) [8–10].

With increasing of high energy ultrasound intensity from zero to a certain value and at a constant pulp flow rate all or only certain crushed material size classes can be removed to the measurement zone. In the low-frequency region ($\nu \leq 10^5$ Hz) the ultrasonic attenuation caused mainly by viscous inertial losses, so $\sigma \approx \sigma_v$.

Consequently about the pulp density or solid phase content in it can be judged by the magnitude of the signal S_1 . In accordance with the above, we will control the value S_1 in measurement zone at each current moment of time. Then, with known law of change of high energy ultrasound intensity we will obtain the particle size distribution function of the crushed material in pulp flow.

4 EXPERIMENTS

The method is implemented as follows [8–10]. First, the reference liquid (water) is fed into the measuring chamber. Gamma radiation in the measuring chamber is formed, and passes a fixed distance in it. The obtained result is attenuation of the gamma radiation intensity. It is reference (basic). In operation condition, the ore material suspension flow in the measuring chamber is formed. Gamma radiation, which passes a fixed distance in the measurement chamber in the presence of ore material suspension flow is formed. The attenuation coefficient of gamma radiation, which passed a fixed distance in ore suspension material flow is determined by expression

$$\mu = (1 - W)\rho_B\mu_B + W\rho_T\mu_T. \quad (4)$$

The intensity of gamma radiation, which passed a distance l in ore suspension material flow, can be presented as follows

$$I = I_0 \exp\{-(1 - W)\rho_B\mu_B + W\rho_T\mu_T\}l. \quad (5)$$

If water is present in the measuring chamber then the intensity of gamma radiation will be determined by the formula

$$I^* = I_0 \exp(-\rho_B\mu_B l). \quad (6)$$

Considering (5) and (6), the intensity of gamma radiation can be represented as

$$I = I^* \exp\{-W[\rho_T\mu_T - \rho_B\mu_B]l\}. \quad (7)$$

This value does not depend on the particle size of solid phase ie ore slurry material, and determined only by the slurry solid phase concentration and its particles density. According to the proposed method the value S_r for the gamma radiation is formed

$$S_r = \ln \frac{I^*}{I} = AW[\rho_T\mu_T - \rho_B\mu_B]l. \quad (8)$$

This expression shows that the density of the controlled medium, which depends on the ore suspension solid phase concentration and its particle density is determined by logarithm of intensity ratio of the gamma radiation in the presence of water flow and ore suspension in measuring chamber. Similarly, the value S_1 is determined for high frequency and S_2 for low frequency bulk ultrasonic waves, which passed a fixed distance through the flow of water and ore suspension.

According to the proposed method the value S_r is determined as

$$S_r = k_1 \frac{S_B - S_0}{S_B}. \quad (9)$$

To obtain a signal which depends on the useful component content of ore suspension solid phase fractions of corresponding size, ie disclosure of useful component, the ratio of S_K is calculated

$$S_K = k_2 \frac{S_\gamma}{S_r}. \quad (10)$$

All or only certain size classes of the crushed material ie a certain solid phase size fraction can be displaced in the measurement zone by increasing the intensity of ultrasonic oscillations from zero to a certain value and with ore suspension constant flow rate.

$$F(r) = \left(\int_0^{r_1} f(r)r^3 dr + \int_{r_1}^{r_2} f(r)r^3 dr + \dots + \int_{r_{m-1}}^{r_m} f(r)r^3 dr \right) / \int_0^{r_m} f(r)r^3 dr. \quad (11)$$

Thus, the value S_K , which is calculated at a certain ultrasonic oscillations intensity in the ore suspension flow determines the density of solid phase particles or useful component concentration in ore suspension solid phase fractions of appropriate size. Since all calculations are made on the basis of measurements relative to characteristics of the reference material, the obtained results are protected from various disturbing factors, which reduce the accuracy of measurement parameters of ore suspension solid phase.

5 RESULTS

Below are the simulation results of the crushed ore particles concentration redistribution in the pulp under the influence of high-energy ultrasound radiation pressure in accordance with the above expressions. The developed program realizes a numerical analysis and graphical representation of simulation results of changes in the pulp solid phase particle size characteristics in form, which is illustrated in Fig. 3.

The density of crushed ore particles may vary within a predetermined range (in model example 1.8–3.2 g/cm³ is accepted). Geometry of measurement, source position and intensity of the ultrasonic oscillations, solid phase particles concentration and their size distribution are set before starting the simulation. The simulated measurement zone is represented by a segment of the pipeline, the length and the diameter of which may vary depending on the task and is directly correlated with the strength of the ultrasonic radiation pressure, which in turn is determined by the intensity of its radiation generated by the source (emitter).

The measuring range is a defined number of sections of the pipeline, in which the counting of number of particles, which are caught in them is carried out.

The y-axis (Fig. 3) shows the number of processed particles, moreover the deducible scale is automatically extended with an increase in simulation time, ie, the number of passed particles.

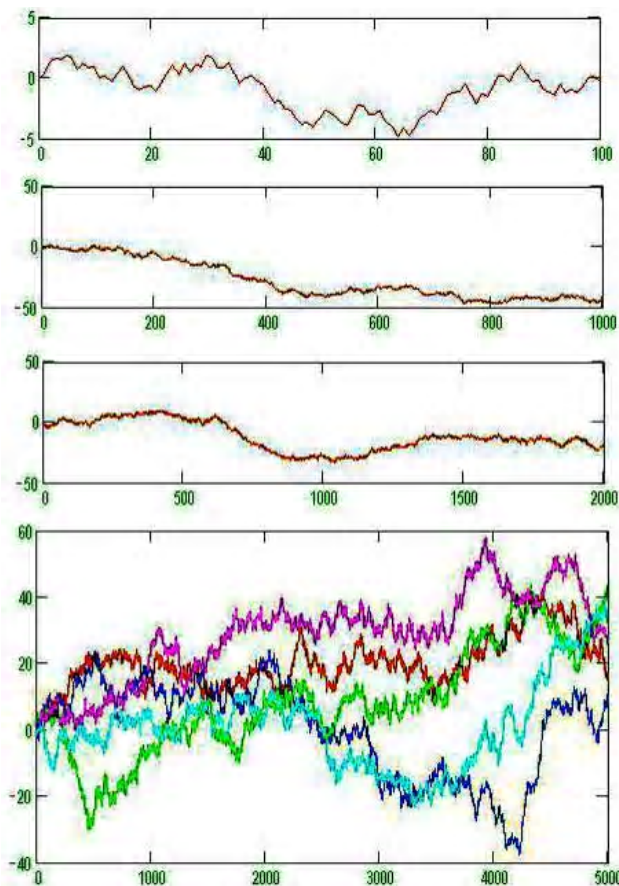


Figure 3 – The simulation results of ore particles coordinates change in the pulp with increasing of steps number

Figure 4 shows the simulation results at different time points, which demonstrates the independence of particles size distribution law on their number and simulation time.

6 DISCUSSION

Measurement of the useful component content can not be reduced to the determination of specific weight (density) of solid phase particles, which are located in the ore suspension. In the measuring chamber section, where the value S is determined the flow of enriched material suspension is periodically exposed to high intensity ultrasonic waves. Due to the radiation pressure and acoustic flows, there is a displacement of ore suspension solid phase particles from the trajectory of their normal movement in the flow in the direction of high-intensity ultrasonic oscillations influence. Displacement of ore suspension solid phase particles leads to their redistribution by size and concentration in the high intensity ultrasonic oscillations influence zone. The value of this redistribution for the same particle size is determined only by the mineral composition (the ratio of the useful component and gangue) and specific weight (density) of each component. For solid phase particles of the same size, which are crushed to a particle size of useful component inclusions, the value of the displacement is proportional only to their specific weight.

Thus, the intensity measurement of high-frequency ultrasonic vibrations, which have passed through a

controlled pulp volume, in the process of impact on it of high energy ultrasound with a given intensity allows to evaluate its solid phase particle size distribution.

CONCLUSIONS

Developed a method of evaluating the distribution function of the useful component by grade of particle size iron ore pulp using a high-frequency and low-frequency ultrasonic radiation and gamma radiation, which differs from existing ones that in the process of the measurement is carried out displacement of the particles of a given grade size in the measurement area by acting on the pulp with ultrasonic radiation of high intensity; the measurement results are compared with the reference substance characteristics, which improves the measurement accuracy by 0.76%.

The proposed measurement method does not require preliminary pulp degassing, because under the ultrasound radiation pressure influence the gas bubbles are removed from the measurement zone. The invention relates to acoustic measurements and can be used for automatic control of the main characteristics of the ore solids in suspension, in particular the concentration of solids, its size distribution and the useful component disclosure degree.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of Kryvyi Rih National University “The study of converting gamma rays, ultrasound body and surface waves on edges of heterophase environments for concentration technology optimization” (state registration number 0112U000359.30-88-12), “The study of dynamic effects of high-energy ultrasound on gas bubbles in the operating panel for controlling gas phase parameters during flotation” (state registration number № 0115U003031.30-100-15) and “Development of the method of determining mineral-technological varieties of iron ore using microwave electromagnetic radiation, gamma radiation and high-energy ultrasound” (state registration number № 0115U003030.30-101-15).

REFERENCES

1. Агранат Б. А. Физические основы технологических процессов, протекающих в жидкой фазе с воздействием ультразвука / Б. А. Агранат. – Москва : Машиностроение, 1969. – 266 с.
2. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман. – Москва : Изд-во иностран. лит., 1957. – 726 с.
3. Гринман И. Г. Контроль и регулирование гранулометрического состава продуктов измельчения / И. Г. Гринман, Г. И. Блях. – Алма-Ата : Наука, 1967. – 115 с.
4. Козин В. З. Опробование, контроль и автоматизация обогащительных процессов / В. З. Козин, О. Н. Тихонов. – Москва : Недра, 1990. – 343 с.
5. Ландау Л. Д. Теоретическая физика. Механика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Москва : ГИТТЛ, 1954. – 796 с.
6. Патент України на корисну модель. № 27086. UA. Спосіб автоматичного контролю параметрів твердої фази пульпи / Моркун В. С., Поркун О. В. – Опубл. 10.10.2007. – Бюл. № 16. – 3 с.
7. Morkun V. Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – № 5. – P. 16–19.

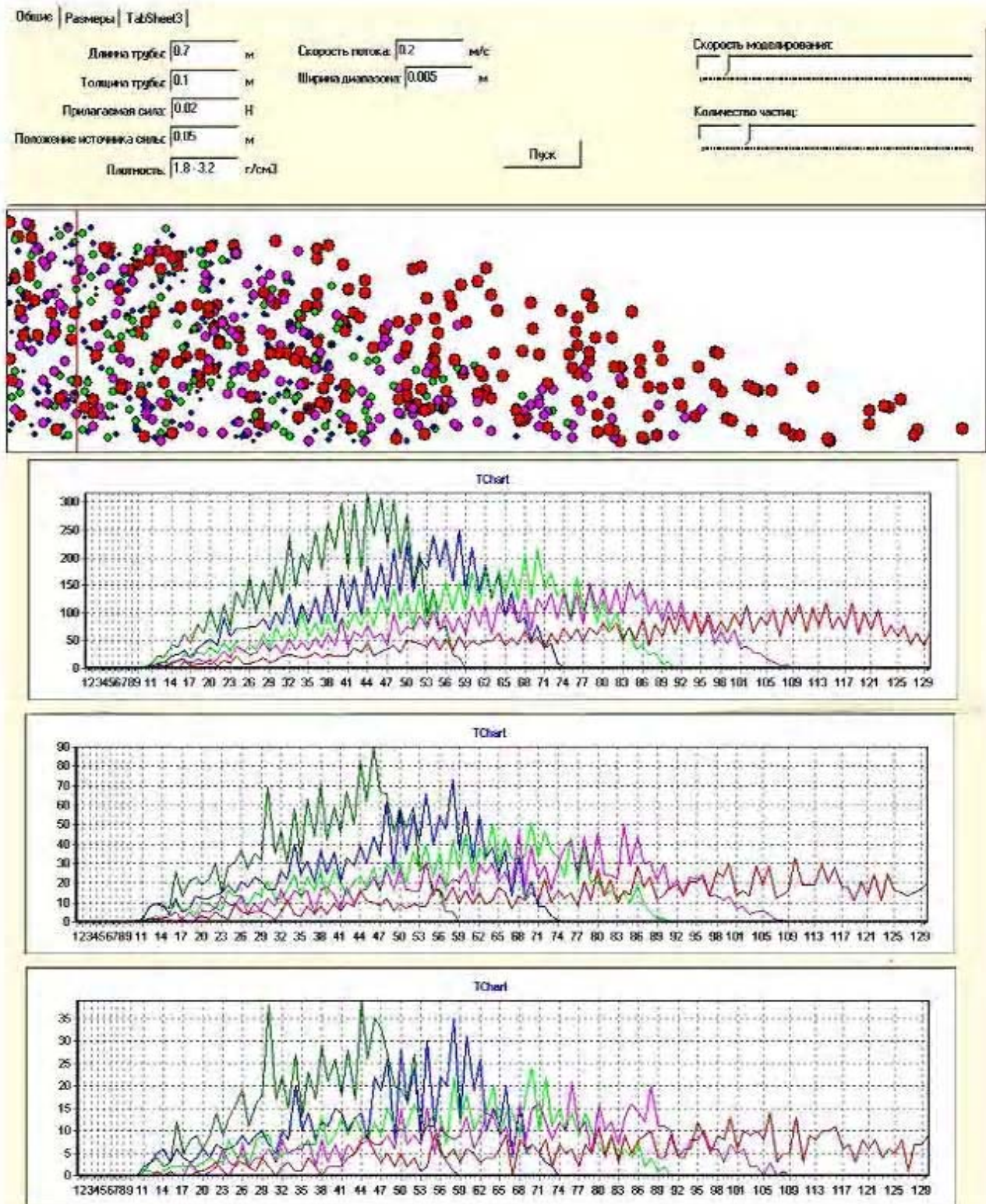


Figure 4 – The simulation results of redistribution of crushed ore particles concentration of five size fractions in the pulp flow under the influence of the high-energy ultrasound radiation pressure

8. Morkun V. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – №. 6. – P. 8–11.
9. Morkun V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty / V. Morkun, N. Morkun, V. Tron // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №. 5. – P. 7–11.
10. Morkun V. Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak, // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 35–38.
11. Назипов Р. А. Основы радиационного неразрушающего контроля / Р. А. Назипов, А. С. Храмов, Л. Д. Зарипова. – Казань : Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2008. – 66 с.
12. Процуто В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В. С. Процуто. – Москва : Недра, 1987. – 253 с.
13. Физика и техника мощного ультразвука: [под ред. Л.Д. Розенберга, в 3 т]. – Москва : Наука. – 1967–1970.
14. Tabei M. A new k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations / M. Tabei, T. D. Mast, R. C. Waag // Journal of the Acoustical Society of America (submitted). – 2001.
15. Трухан С. Н. Моделирование диффузии методом Монте-Карло / С. Н. Трухан. – Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН. Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/truhan>.
16. Wooh Shi-Chang Optimization of ultrasonic phased arrays / Wooh Shi-Chang, Shi Yijun // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 1998. – No. 17. – P. 883–890.

Article was submitted 17.01.2017.
After revision 10.05.2017.

Моркун В. С.¹, Моркун Н. В.², Тронь В. В.³

¹Д-р техн. наук, профессор, проректор з наукової роботи, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри економічної кібернетики та управління проектами, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики, автоматики і систем управління, ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ ТВЕРДОЇ ФАЗИ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПУЛЬПИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО УЛЬТРАЗВУКУ

Актуальність. Вирішено актуальне завдання автоматичного контролю параметрів твердої фази рудної суспензії, що надходить на збагачувальний переділ. Це сприяє підвищенню якості кінцевого продукту і полегшує вибір і дотримання технологічного регламенту процесу збагачення.

Мета – розробка методу отримання оперативної інформації про характеристики залізної руди в процесі збагачення: розподіл часток твердої фази пульпи за крупністю і змістом корисного компонента з застосуванням багатоканальних ультразвукових вимірювань.

Метод. Для вирішення завдання автоматичного контролю параметрів твердої фази рудної суспензії запропонований спосіб, що полягає у вимірюванні інтенсивності високочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань в вимірювальній ємності з рудною суспензією в періоди впливу на потік суспензії ультразвукових коливань і при їх відсутності. При цьому отримані співвідношення вимірних величин дозволяють визначити параметри твердої фази рудної суспензії. Також, в процесі вимірювання здійснюється формування гамма-випромінювання і низькочастотних об'ємних ультразвукових хвиль в потоці суспензії рудного матеріалу, і здійснюють вимір інтенсивності гамма-випромінювання і низькочастотних об'ємних ультразвукових хвиль, що пройшли фіксовану відстань при наявності у вимірювальній камері еталонної рідини і потоку рудної суспензії в періоди впливу на потік суспензії ультразвукових коливань і при їх відсутності. Інтенсивність ультразвукових коливань в період їх впливу на потік суспензії змінюють за відповідним законом.

Результати. На основі динамічних ефектів високоенергетичного ультразвуку теоретично обґрунтований і експериментально апробований метод впливу на тверду фазу залізорудної пульпи для зміщення частинок певного класу крупності в зону вимірювань і визначення змісту корисного компонента в рудних частинках.

Розроблена спеціалізована програма, яка реалізує чисельний аналіз і графічне представлення результатів моделювання зміни гранулометричної характеристики твердої фази пульпи під керуванням впливом радіаційного тиску високоенергетичного ультразвуку.

Висновки. Пропонується метод оцінки функції розподілу корисного компонента по класах крупності частинок подрібненої руди в потоці пульпи на основі вимірів параметрів процесу поширення високочастотних і низькочастотних ультразвукових хвиль, а також гамма-випромінювання, який відрізняється від існуючих тим, що в процесі вимірювань здійснюють зсув частинок подрібненої руди певної крупності і щільності в область вимірювань шляхом впливу на пульпу високоенергетичного ультразвуку, що дозволяє підвищити точність вимірювань на 0,76%.

Ключові слова: автоматичне управління, руда, пульпа, тверда фаза, розподіл часток за розмірами, дроблення руди, високоенергетичний ультразвук.

Моркун В. С.¹, Моркун Н. В.², Тронь В. В.³

¹Д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры экономической кибернетики и управления проектами, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики, автоматики и систем управления, ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УЛЬТРАЗВУКА

Актуальность. Решена актуальная задача автоматического контроля параметров твердой фазы рудной суспензии, поступающей на обогатительный передел, что способствует повышению качества конечного продукта и облегчает выбор и соблюдение технологического регламента процесса обогащения.

Цель – разработка метода получения оперативной информации о характеристиках железной руды в процессе обогащения: распределение частиц твердой фазы пульпы по крупности и содержанию полезного компонента с применением многоканальных ультразвуковых измерений.

Метод. Для решения задачи автоматического контроля параметров твердой фазы рудной суспензии предложен способ, заключающийся в измерении интенсивности высокочастотных объемных ультразвуковых волн, прошедших фиксированное расстояние в измерительной емкости с рудной суспензией в периоды влияния на поток суспензии ультразвуковых колебаний и при их отсутствии. При этом вычисленные соотношения измеренных величин позволяют определить параметры твердой фазы рудной суспензии. Также, в процессе измерения осуществляется формирование гамма-излучения и низкочастотных объемных ультразвуковых волн в потоке суспензии рудного материала, и замер интенсивности гамма-излучения и низкочастотных объемных ультразвуковых волн, прошедших фиксированное расстояние при наличии в измерительной камере эталонной жидкости и потока рудной суспензии в периоды воздействия на поток суспензии ультразвуковых колебаний и при их отсутствии. Интенсивность ультразвуковых колебаний в период их влияния на поток суспензии меняют по соответствующему закону.

Результаты. На основе динамических эффектов высокоэнергетического ультразвука теоретически обоснован и экспериментально апробирован метод воздействия на твердую фазу железорудной пульпы для смещения частиц определенного класса крупности в зону измерений и определения содержания полезного компонента в рудных частицах.

Разработана специализированная программа, которая реализует численный анализ и графическое представление результатов моделирования изменения гранулометрической характеристики твердой фазы пульпы под управляемым воздействием радиационного давления высокоэнергетического ультразвука.

Выводы. Предлагается метод оценки функции распределения полезного компонента по классам крупности частиц измельченной руды в потоке пульпы на основе измерений параметров процесса распространения высокочастотных и низкочастотных ультразвуковых волн, а также гамма-излучения, который отличается от существующих тем, что в процессе измерений осуществляют смещение частиц измельченной руды определенной крупности и плотности в область измерений путем воздействия на пульпу высокоэнергетическим ультразвуком, что позволяет повысить точность измерений на 0,76%.

Ключевые слова: автоматическое управление, руда, пульпа, твердая фаза, распределение частиц по размерам, дробление руды, высокоэнергетический ультразвук.

REFERENCES

1. Agrat B.A. Fizicheskie osnovy tehnologicheskikh processov, protekajushih v zhidkoj faze s vozdejstviem ul'trazvuka. Moscow, Mashinostroenie, 1969, 266 p.
2. Bergman L. Ul'trazvuk i ego primeneniye v nauke i tekhnike. Moscow, Izd-vo inostran. lit., 1957, 726 p.
3. Grinman I. G., Bljah G. I. Kontrol' i regulirovaniye granulometricheskogo sostava produktov izmel'cheniya. Alma-Ata, Nauka, 1967, 115 p.
4. Kozin V. Z., Tihonov O. N. Oprobovanie, kontrol' i avtomatizacija obogatitel'nykh processov. Moscow, Nedra, 1990, 343 p.
5. Landau L. D., Lifshic E. M. Teoreticheskaya fizika. Mekhanika sploshnykh sred. Moscow, GITTL, 1954, 796 p.
6. Morkun V. S., Porkujan O. V. Patent Ukraïni na korisnu model'. № 27086. UA. Sposib avtomatichnogo kontrolju parametriv tverdoï fazi pul'pi/ Opubl. 10.10.2007. Bjul. № 16, 3 p.
7. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Simulation of the Lamb waves propagation on the plate which contacts with gas containing iron ore pulp in Waveform Revealer toolbox, *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, No. 5, pp. 16–19.
8. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp, *Metallurgical and Mining Industry*, 2014, No. 6, pp. 8–11.
9. Morkun V., Morkun N., Tron V. Formalization and frequency analysis of robust control of ore beneficiation technological processes under parametric uncertainty, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 5, pp. 7–11.
10. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. Adaptive control system of ore beneficiation process based on Kaczmarz projection algorithm, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 2, pp. 35–38.
11. Nazipov R. A., Hramov A. S., Zaripova L. D. Osnovy radiacionnogo nerazrushajushhego kontrolja. Kazan', Izd-vo Kazansk. gos. un-ta, 2008, 66 p.
12. Procuto V. S. Avtomatizirovannye sistemy upravleniya tehnologicheskimi processami obogatitel'nykh fabrik. Moscow, Nedra, 1987, 253 p.
13. Fizika i tekhnika moshhnogo ul'trazvuka: [pod red. L. D. Rozenberga, v 3 tj]. Moscow, Nauka, 1967–1970.
14. Tabei M., Mast T. D., Waag R. C. A new k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations, *Journal of the Acoustical Society of America (submitted)*, 2001.
15. Truhan S. N. Modelirovaniye diffuzii metodom Monte-Karlo. Institut kataliza im. G. K. Boreskova SO RAN. Rezhim dostupa: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/truhan>.
16. Wooh Shi-Chang, Shi Yijun Optimization of ultrasonic phased arrays. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 1998, No. 17, pp. 883–890.

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ РЕЗАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗА ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕСУРСА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА

Актуальность. В статье изложены результаты исследований по разработке новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, послужившей основой автоматизированной системы управления работой металлообрабатывающего оборудования. Прогнозирование индивидуального ресурса режущего инструмента является злободневной, но так и не решенной до сих пор проблемой, что и определяет актуальность изложенного в статье материала.

Цель работы – разработка новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

Метод. Предложен метод управления работой металлообрабатывающего оборудования, сочетающий в рамках единого процесса решения задач идентификации и управления. Идентификации подвергается модель тренда информационного сигнала, генерируемого в процессе работы обрабатывающей системы, которая используется в качестве модели, описывающей динамику поднадзорного оборудования. По результатам прогнозирования индивидуального ресурса инструмента и сопоставления его с требуемой длительностью механической обработки, принимается решение о варьировании величин управляющих параметров (подачи и оборотов шпинделя), обеспечивающих реализацию на вновь назначенных режимах необходимого периода бездефектной эксплуатации инструмента.

Результаты. Разработан программный продукт, составивший основу автоматизированной системы адаптивного управления работой металлообрабатывающих технологических систем, алгоритм работы которых отражает предложенную методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность предложенной методологии прогнозирования ресурса режущего инструмента и работоспособность аппаратно-программного комплекса, реализующего данную методологию в практике резания. Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике машиностроения удалось разработать совершенно новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса рабочего инструмента, что позволяет целенаправленно управлять длительностью протекания технологического процесса, ориентируясь на фактическое техническое состояние основного элемента технологической системы. Практическая значимость полученных результатов заключается в создании программно-аппаратного комплекса, автоматизирующего процесс адаптивного управления режимами резания и содержащего программное обеспечение, которое отражает алгоритм новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента. Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования.

Внедрение подобной методологии контроля не только в процесс изготовления, но и в условия эксплуатации разнообразных по конструкции и назначению машин и механизмов, решает давно стоящую на повестке дня проблему определения индивидуального ресурса технических систем, что и определяет ценность проведенных исследований и их заметный вклад в науку управления.

Ключевые слова: автоматизация, адаптивное управление, индивидуальный ресурс, программный продукт, обработка резанием, обрабатывающие системы, прогноз ресурса, идентификация, тренд информационного сигнала, математическая модель, период бездефектной обработки, состояние поднадзорного оборудования.

НОМЕНКЛАТУРА

V – скорость резания;

S – подача;

t – глубина резания;

$[h_3]$ – предельно допустимая величина износа по задней поверхности лезвия режущего инструмента;

γ – интенсивность (скорость) изнашивания инструмента;

T – ресурс инструмента;

$T_{\text{инд}}$ – индивидуальный ресурс инструмента;

$T_{\text{тр}}$ – требуемая по техпроцессу длительность обработки детали (длительность прохода);

D – диаметр заготовки;

L – протяженность (длина) обработанной поверхности;

V_0 – исходное (заданное по техпроцессу) значение скорости резания;

S_0 – исходное (заданное по техпроцессу) значение подачи;

E_{3B}^P – расчетное значение тренда звука;

E_{3B0}^P – исходное расчетное значение тренда звука;

τ – текущая наработка режущего инструмента;

α – показатель степени;

E_{3B}^F – фактическое значение тренда (временного ряда) звука, генерируемого процессом лезвийной обработки;

k – количество измерений, проведенных за все время контроля состояния режущего инструмента;

$P_{\text{пр}}$ – усилие прижатия, действующего в трущейся паре;

$V_{\text{ск}}$ – скорость относительного скольжения трущихся пар;

σ – механические напряжения;

σ_{-1} – предел усталости;

N_0 – базовое число циклов;

N – наработка в циклах режущего инструмента до разрушения;

m – показатель степени кривой усталости;
 $P_{x,y,z}$ – составляющие силы резания;
 C_p – постоянная для данного вида обработки, обрабатываемого и инструментального материалов;
 K_p – поправочный коэффициент;
 $V(\tau)$ – регулируемая (оптимальная) величина скорости резания;
 $S(\tau)$ – регулируемая (оптимальная) величина подачи;
 r_b – радиус вершины лезвия резца.
 R_a – текущее значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;
 R_{a0} – исходное (заданное) значение высотного параметра шероховатости обработанной поверхности;
 $T_{\text{гр}}$ – машинное время, необходимое для завершения текущего прохода;
 $L_{\text{дет}}$ – длина поверхности детали, обрабатываемая за один проход.

ВВЕДЕНИЕ

Адаптивность (приспособляемость) управления лезвийной металлообработкой, выполняемой на станках с ЧПУ, обеспечивается за счет выбора по тем или иным алгоритмам оптимальных сочетаний трех управляемых параметров: глубины, подачи и скорости резания. Оптимум обеспечивается путем определения экстремума целевой функции, что позволяет достигать на данном станке в зависимости от решаемой задачи либо максимума производительности, либо минимума себестоимости получаемой при этом детали, либо поддержания граничного значения регулируемых параметров [1, 2].

При этом при всей развитости принятых алгоритмов адаптивного управления, существенной проблемой резания металлов является так и не решенная до сих пор задача эффективного контроля состояния режущего инструмента [3]. Действующие в настоящее время даже весьма прогрессивные методы прямого или косвенного контроля состояния инструмента ограничиваются лишь сравнением определенного тем или иным, порой весьма изощренным, способом фактической величины износа инструмента с его нормативной величиной [4].

Однако при этом не ставится задача прогнозирования наработки инструмента до момента достижения им своей предельно допустимой величины износа, что не позволяет заранее принимать решение об изменении режима обработки с целью предупреждения внезапного выхода инструмента из строя и исключения тем самым появления бракованной детали. Отсутствие подобного прогноза сводит на нет все усилия по разработке алгоритма адаптивного управления, каким бы эффективным, по желанию авторов, он ни был.

Отсутствие действенных методов прогнозирования ресурса инструмента отчасти объясняется тем, что даже знание фактической величины износа не позволяет с достаточной долей вероятности прогнозировать наработку инструмента до момента достижения предельно допустимой величины его износа. Это объясняется тем, что нормативная величина износа носит сугубо среднестатистический характер. По этой причине нормы износа только с определенной долей достоверности характеризуют фактически складывающиеся условия нагруже-

ния инструмента, определяемые конкретным сочетанием режимов резания и материалов как инструмента, так и заготовки.

Пронормировать непосредственно ресурс (стойкость) инструмента, исходя из условий его нагружения, так же не представляется возможным. Это объясняется тем, что в практике резания наблюдается не поддающееся нормированию бесконечное множество фактически реализующихся условий нагружения инструмента. Данные о ресурсе инструмента, приводимые их производителем, носят, так же как и нормы износа, среднестатистический характер, с малой долей вероятности, характеризующие индивидуальный ресурс инструмента, определяемый конкретно складывающимися условиями его эксплуатации. Результатом этой неопределенности является проявляющийся, на первый взгляд, как правило, внезапно, отказ инструмента, влекущий, в свою очередь, появление неисправимого брака детали.

Решение указанной проблемы потребовало разработки новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента, составившей основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом лезвийной обработки материалов. Новизна методологии прогнозирования ресурса инструмента заключается в том, что она в отличие от действующих методов, ориентирующихся на среднестатистические данные о предельном износе и ресурсе инструмента, обеспечивает прогнозирование в режиме реального времени индивидуального ресурса инструмента, отвечающего фактическим условиям его нагружения.

Разработка автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, основу которой составляет новая методология прогнозирования ресурса инструмента, является, несомненно, актуальной научно практической задачей.

Предметом исследования является система адаптивного управления, основанная на прогнозе в режиме реального времени индивидуального ресурса режущего инструмента.

Целью работы является разработка алгоритма и отвечающего ему программного продукта, составляющего основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом резания, обеспечивающей внедрение в практику машиностроительного производства новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса инструмента.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При управлении металлообрабатывающими системами приходится иметь дело со случаем, когда математическая модель объекта управления известна не полностью, а динамические характеристики объекта, описываемые этой моделью, непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, обусловленных в данном случае изменением в процессе резания геометрии заготовки и контура лезвия инструмента по причине его износа [4].

В данном случае в качестве модели объекта управления предлагается рассматривать математическое описание тренда различных по физической природе информационных сигналов, сопровождающих процесс резания, наибо-

лее информативным из которых является звук, генерируемый в точке контакта заготовки и инструмента [5].

Модель, описывающая поведение тренда звука, рассматриваемая в качестве модели динамического поведения обрабатывающей системы, позволила разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, составившую основу автоматизированной системы адаптивного управления процессом обработки материалов резанием. Алгоритм управления, разработанный в соответствии с данной методологией, сочетает в рамках единого процесса решение задач идентификации и управления.

По результатам идентификации модели тренда в режиме реального времени прогнозируется индивидуальный ресурс инструмента. Далее, на основе сопоставления прогноза с требуемой по тех процессу длительностью обработки осуществляется выбор оптимального режима резания, позволяющего продлить период бездефектной эксплуатации инструмента, сведя практически к нулю вероятность появления дефекта изготавливаемой при этом детали.

При разработке алгоритма управления исходили из двух общеизвестных фактов, первое: определяющее влияние на качество обрабатываемой поверхности оказывает износ лезвия режущего инструмента, в частности, износ по его задней главной поверхности h_3 , второе: продолжительность бездефектной обработки детали определяется индивидуальным ресурсом инструмента T , реализующимся в данных условиях его нагружения. Предельно допустимая величина износа $[h_3]$ и ресурс T связаны следующим соотношением [6]:

$$T = \frac{[h_3]}{V \cdot \gamma}. \quad (1)$$

Величина $[h_3]$ стандартизирована ($[h_3] = \text{const}$), поэтому управлять длительностью бездефектной эксплуатации инструмента (управлять его ресурсом T), как следует из соотношения (1), можно осуществлять только за счет изменения режима резания (изменения скорости резания V) и интенсивности износа γ . Целью варьирования этих параметров является соблюдение в процессе резания следующего условия:

$$T_{\text{ИНД}} \geq T_{\text{ТР}}. \quad (2)$$

Требуемая по техпроцессу длительность обработки $T_{\text{ТР}}$ рассчитывается по следующей формуле [7]:

$$T_{\text{ТР}} = \frac{\pi D \cdot L}{1000 \cdot V_0 \cdot S_0}. \quad (3)$$

Величина индивидуального ресурса инструмента $T_{\text{ИНД}}$ определяется в процессе параметрической идентификации модели тренда звука, проводимой по результатам измерения в режиме реального времени уровня звука $E_{3В}^{\Phi}$, сопровождающего процесс резания [5]. При этом модель составлена таким образом, что искомый параметр $T_{\text{ИНД}}$ входит в ее математическую структуру в каче-

стве одного из ее коэффициентов. Идентификация заключается в минимизации невязки (4) расчетных $E_{3В}^P$ и фактических значений тренда (временного ряда) $E_{3В}^{\Phi}$ звука:

$$U = \sum_i^k [E_{3Вi}^{\Phi} - E_{3Вi}^P]^2. \quad (4)$$

Модель тренда звука описывается следующим выражением [8]:

$$E_{3В}^P = E_{3В0}^P \cdot \left(\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ИНД}} - \tau} \right)^{\alpha}. \quad (5)$$

Отметим, что математическая структура модели тренда аналогична уравнению кривой усталости:

$$\sigma = \sigma_{-1} \cdot \left(\frac{N_6}{N} \right)^{1/m}. \quad (6)$$

Графики выражений (5) и (6) зеркальны (рис. 1).

Выражение (5) представляет собой дробно рациональную степенную функцию. Эта функция претерпевает разрыв при исчерпании ресурса инструмента, т.е. при выполнении следующего условия:

$$\tau = T_{\text{ИНД}}. \quad (6)$$

Интенсивность износа γ пропорциональна произведению усилия прижатия $P_{\text{пр}}$, действующего в трущейся паре, и скорости их относительного скольжения $V_{\text{СК}}$ [6]. Применительно к резанию это условие запишется следующим образом:

$$\gamma \sim P_{\text{РЕЗ}} \cdot V. \quad (7)$$

В данном случае трущейся парой являются рабочие поверхности инструмента и поверхность резания на заготовке. Сила резания определяется по следующей формуле [7]:

$$P_{\text{РЕЗ}} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}. \quad (8)$$

Составляющие силы резания $P_{x,y,z}$ определяются по эмпирической степенной зависимости вида [9]:

$$P_{x,y,z} = 10 \cdot C_p t^x S^y V^n K_p. \quad (9)$$

Значения коэффициентов и показателей степеней, содержащихся в (9), приводятся в соответствующих справочниках [7].

Разделив обе части неравенства (2) на требуемую длительность обработки $T_{\text{ТР}}$ с учетом выражений (1), (7), (9) и соблюдении условия $t = \text{const}$, получим

$$\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{\gamma(\tau)}{\gamma_0} = \frac{V(\tau)}{V_0} \cdot \frac{P(\tau)V(\tau)}{P_0 V_0}. \quad (10)$$

Отняв от левой части равенства (10) его правую часть, и возведя получившееся при этом выражение в квадрат, получим выражение для целевой функции:

$$U = \left[\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} - \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2. \quad (11)$$

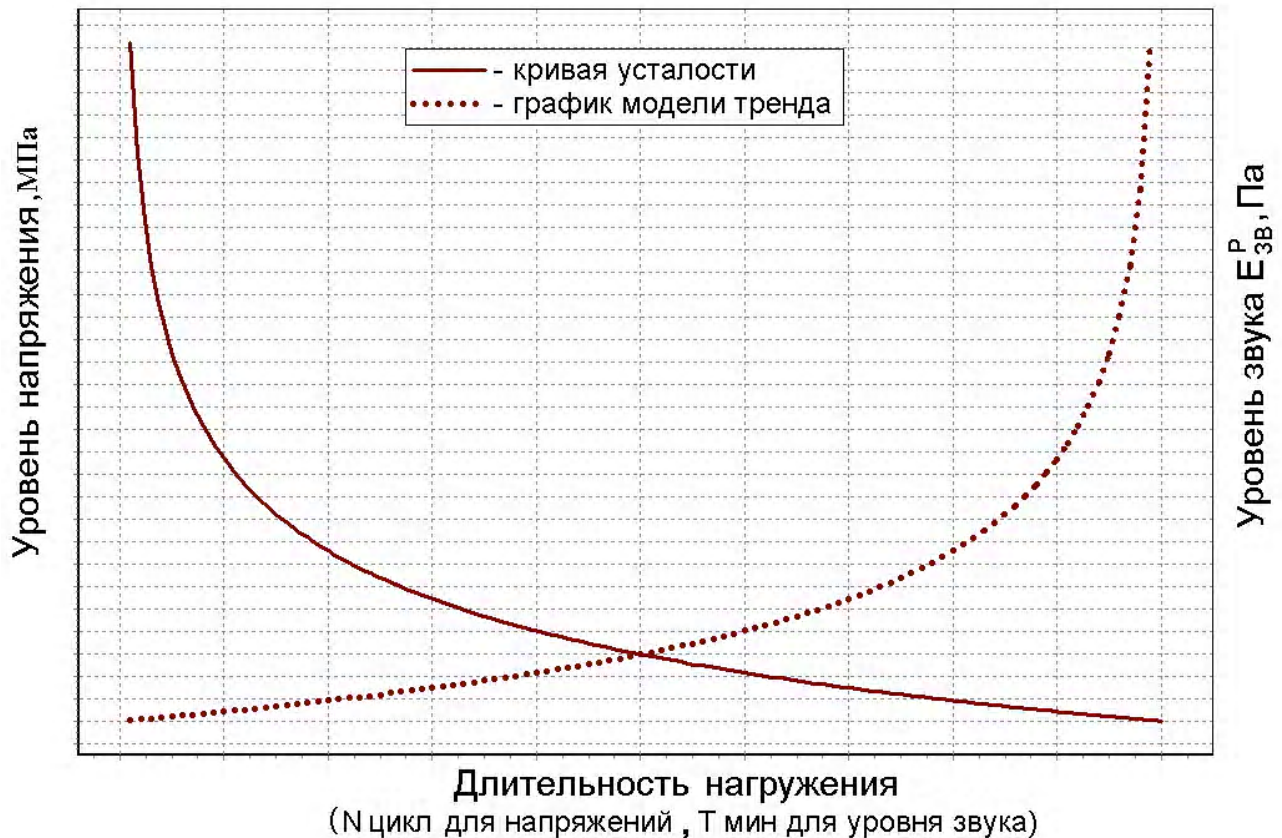


Рисунок 1 – Сравнение кривой усталости и графика модели тренда звука

Величина варьируемых параметров режима резания $V(\tau)$ и $P(\tau)$ выбирается из условия выполнения неравенства (2). При этом диапазон варьирования режимов резания ограничен степенью изменения силы резания. С учетом этого ограничения целевая функция (11) примет следующий вид:

$$U = \left[\frac{T_{\text{ИНД}}}{T_{\text{ТР}}} - \left(\frac{V(\tau)}{V_0} \right)^2 \cdot \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2 + \left[1 - \frac{P(\tau)}{P_0} \right]^2. \quad (12)$$

Адаптивное управление режимом лезвийной обработки осуществляется по следующему алгоритму:

- по принятой в технологии обработки металлов резанием методике [7] и в зависимости от класса адаптивной системы (система оптимизации или граничного регулирования) назначается исходный режим обработки, т. е. задаются исходные величины управляющих параметров: t_0 , S_0 , V_0 ;

- в режиме реального времени измеряется уровень звука $E_{\text{ЗВ}}^{\Phi}$, генерируемого процессом резания, и по результатам этих измерений осуществляется идентификация модели тренда, в число определяемых при этом параметров модели входит и численное значение искомого ресурса инструмента $T_{\text{ИНД}}$;

- если ресурс инструмента превышает требуемое для обработки детали (деталей) время, т. е. выполняется условие $T_{\text{ИНД}} > T_{\text{ТР}}$, то возможны два варианта развития событий:

- если резание осуществляется в условиях единичного или мелкосерийного производства дорогостоящих изделий, то резание продолжается на исходном режиме;

- если резание осуществляется в условиях серийного производства недорогостоящих деталей, то возможно форсирование (ужесточение) режимов резания с целью повышения производительности (решение принимает оператор);

- если же наблюдается соотношение $T_{\text{ИНД}} < T_{\text{ТР}}$, то для обоих типов производств режим резания изменяется таким образом, чтобы выполнить условие (2).

Причем при обработке длинномерных объектов требуемый ресурс $T_{\text{ТР}}$ принимается равным времени, необходимым для завершения текущего прохода $T_{\text{ТР}} (T_{\text{ТР}} = T_{\text{ПР}})$.

$$T_{\text{ПР}} = \pi D \cdot \frac{L_{\text{ДЕТ}}}{1000 \cdot S(\tau) V(\tau)}. \quad (13)$$

Для автоматизации системы адаптивного управления процессом резания, воспроизводящей данный алгоритм, основанный на новой методологии прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента, в дополнение к штатной системе ЧПУ станка был разработан специальный аппаратно-программный комплекс.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

При металлообработке уровень оптимальности принятых режимов резания зависит от того, насколько точно начальная информация характеризует действительные условия протекания обработки. Другими словами, насколько изменяются: припуск, твердость обрабатываемого материала, жесткость обрабатывающей системы, износ инструмента и его ресурс, принятые при расчете и составлении техпроцесса и управляющей программы [1, 2].

В настоящее время работа большинства автоматизированных станков подчиняется «жесткому» программированию, ориентирующемуся на среднестатистические данные (нормы) износа инструмента и его стойкости [10–18]. Так, например, в зависимости от качества режущего инструмента его ресурс в одной партии колеблется от 15 до 35% от среднего значения. Если же время работы инструмента определяется худшим образцом в партии, то наиболее устойчивые образцы при фиксированной наработке используют свой ресурс, в лучшем случае, только на 65% [4]. При этом под ресурсом в соответствии с [9] понимается временной ресурс, равный наработке режущего инструмента от начала резания новым инструментом до достижения им предельного состояния.

По причине нестабильности ресурса инструмента основная часть процесса резания протекает либо с недоиспользованием возможностей режущего инструмента, либо не исключает появление брака детали из-за непредвиденного отказа инструмента [9]. Для борьбы с этими отказами предусматривается принудительная замена инструмента, в результате этого он снимается с эксплуатации преждевременно, имея существенный запас ресурса [10].

Контроль же состояния инструмента непосредственно в процессе резания с целью определения степени его критичности, а соответственно, и для прогнозирования его наработки до замены, является достаточно сложным процессом. Так, например, измерение износа лезвийного режущего инструмента надо проводить после каждого цикла обработки [19], но в этом случае сложно прогнозировать наступление критического состояния инст-

румента: предельного износа, выкрашивания, скола, поломки, а, тем более, осуществлять долгосрочные прогнозы для определения момента его замены. Подобный контроль требует, как правило, прерывания процесса обработки, что существенно снижает ее эффективность. Поэтому для оперативной диагностики нередко применяют косвенные методы, в частности, контролируют состояние инструмента по уровню звука, сопровождающего процесс резания [5].

Общим недостатком действующих методов прогнозирования, основанных на среднестатистических по природе нормативных величинах, является то, что они приводят к существенным погрешностям прогноза, что делает невозможным применение их при адаптивном управлении процессом резания.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Алгоритм адаптивного управления послужил основой для разработки программно-аппаратного комплекса (рис. 3). Программная часть комплекса отражает новую методологию прогнозирования ресурса инструмента и обеспечивает выбор оптимальных режимов резания, позволяющих продлить период бездефектной обработки заготовки. Программный продукт, построен по модульному принципу (рис. 2).



Рисунок 2 – Модули, из которых состоит программная часть

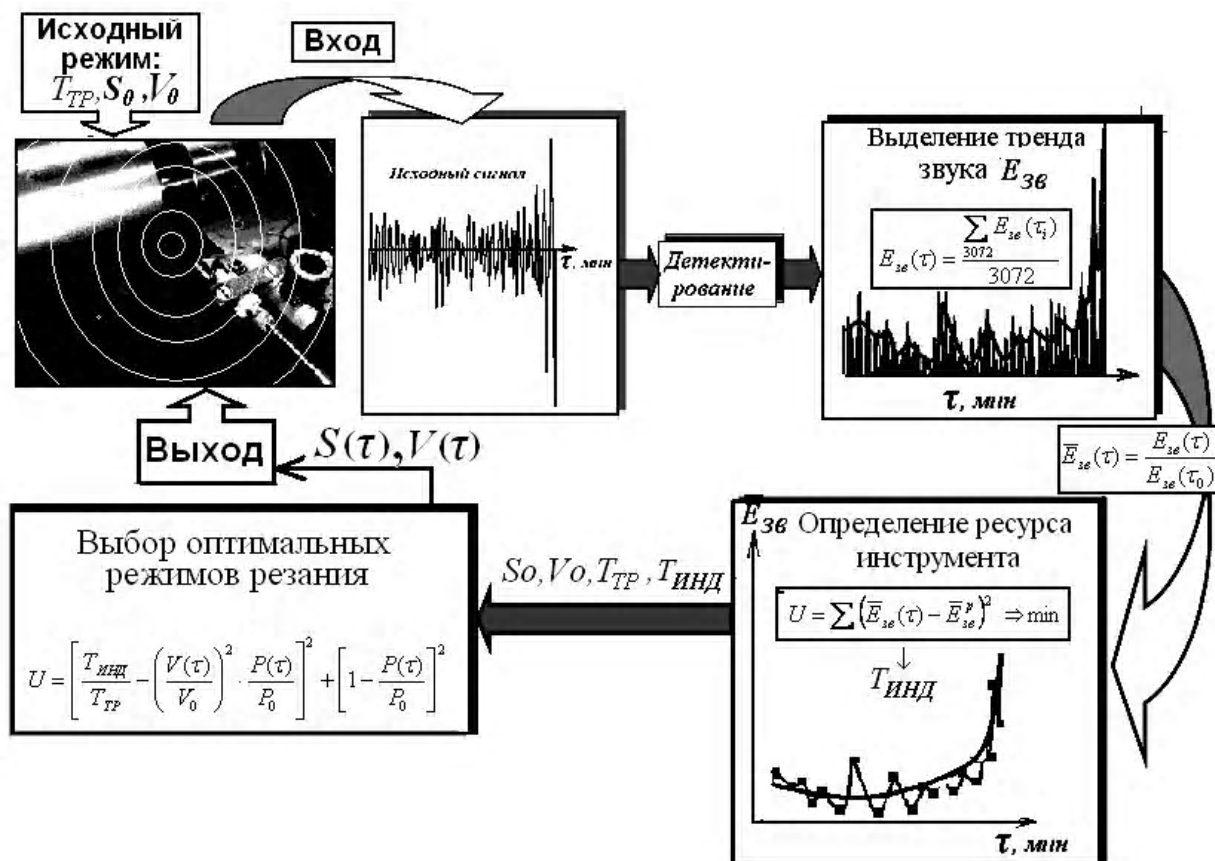


Рисунок 3 – Визуализация алгоритма функционирования программно-аппаратного комплекса

Модульний принцип побудови програмного продукту дозволяє гнучко змінювати його структуру применливо до особливостей підконтрольного об'єкта. Для забезпечення універсальності програмного комплексу по відношенню до апаратних засобів (рис. 3) він реалізований на кількох алгоритмічних мовах: Турбо Паскаль, Делфі, Сі і JAVA. Останній варіант комплексу розрахований на мікропроцесорні пристрої, що працюють на платформі Android.

Алгоритм функціонування комплексу в наглядній формі представлений на рис. 3. Комплекс забезпечує: реєстрацію, накопичення, обробку інформації і адаптивне управління на основі цього роботою підконтрольного обладнання. Відповідно до алгоритму функціонування програмно-апаратного комплексу його робота (рис. 3) починається з введення вихідних даних: режимів різання і геометричних параметрів заготовки і деталі, на основі яких розраховується необхідна тривалість роботи оброблюваної системи ($T_{тр}$).

Далі проводиться реєстрація амплітуди звукової хвилі і прогнозування індивідуального ресурсу ($T_{інд}$) інструмента. Якщо прогнозоване значення ресурсу перевищує необхідне ($T_{інд} > T_{тр}$), то обробка деталі продовжується на попередніх режимах. В протилежному випадку розраховуються режими роботи, що забезпечують виконання умови ($T_{інд} \geq T_{тр}$).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність роботи автоматизованої системи адаптивного управління була перевірена в процесі токарної обробки заготовки на станку 16К20Т1, оснащеному ЧПУ. Кінематична схема станка дозволяє змінювати обороти шпинделя n на III режимі його роботи від 125 об/хв до 2000 об/хв, подачу S можна змінювати з кроком 0,01 мм/об від 0,01 до 2,8 мм/об.

Заготовка піддавалася полувисхідній обробці різцем з режущою пластинкою з твердого сплаву Т15К6 на наступних вихідних режимах: $V_0 = 63$ м/хв, ($n = 100$ об/хв), $S_0 = 0,5$ мм/об, $t_0 = 1,0$ мм. Режими вибиралися згідно вимогам довідника [7]. Довжина деталі становила 310 мм, кількість проходів рівнялося трьом, діаметр заготовки становив 200 мм, а деталі – 194 мм. Показники степеней в формулі (9) мали наступні значення: $n_{px} = -0,4$ (для P_x); $n_{py} = -0,3$ (для P_y), $n_{pz} = -0,15$ (для P_z); $y_{px} = 0,2$ (для P_x), $y_{py} = 0,8$ (для P_y), $y_{pz} = 0,9$ (для P_z). Необхідна по технологічному процесу тривалість обробки (машинне час) $T_{тр}$ становила 18,6 хв.

Контроль звуку здійснювався неперервно в процесі всієї обробки деталі з допомогою мікрофона, встановленого поблизу зони різання [5]. Сигнал з мікрофона (рис. 3) подавався на «звукову карту» комп'ютера, де піддавався оцифровці і подальшій обробці. Згідно викладеному вище алгоритму адаптивного управління процесом різання по результатам обробки звукового сигналу прогнозувався індивідуальний ресурс інструмента $T_{інд}$, і вибиралося, шляхом мінімізації цільової функції (12), оптимальне поєднання керуючих параметрів (швидкості різання $V(\tau)$ і продольної подачі $S(\tau)$, що забезпечують виконання умови (2).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експерименту наведені на рис. 4 і 5. На рис. 4 показано співвідношення між необхідною по технологічному процесу тривалістю обробки деталі $T_{тр}$ і прогнозованим індивідуальним ресурсом $T_{інд}$ інструмента, що відповідає навантаженню інструмента на вихідних режимах (V_0 і S_0) різання.

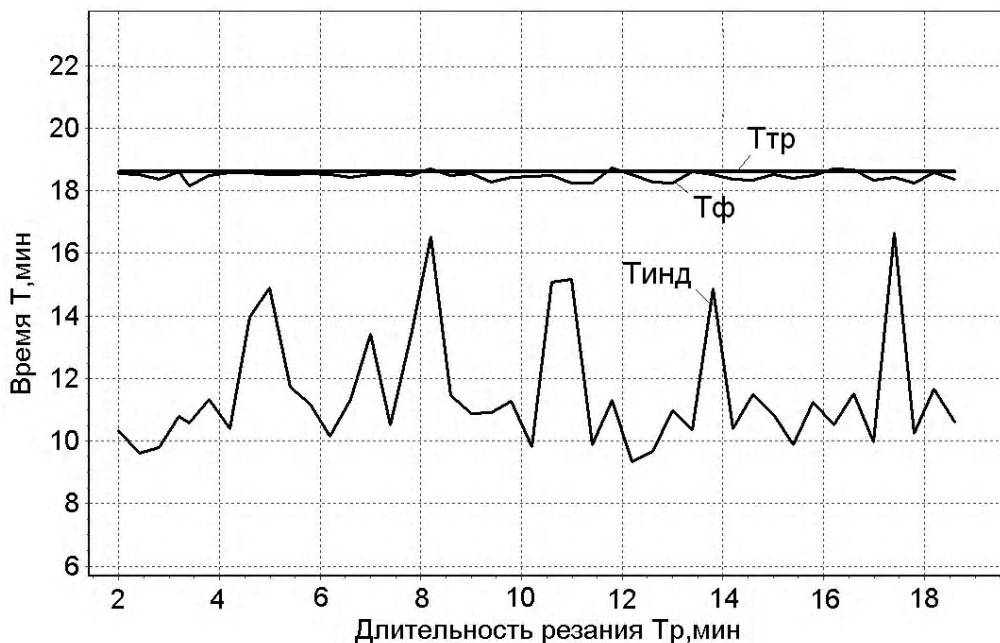


Рисунок 4 – Сопоставление требуемой длительности резания $T_{тр}$ с прогнозом индивидуального ресурса инструмента $T_{інд}$ и его скорректированным значением $T_{ф}$

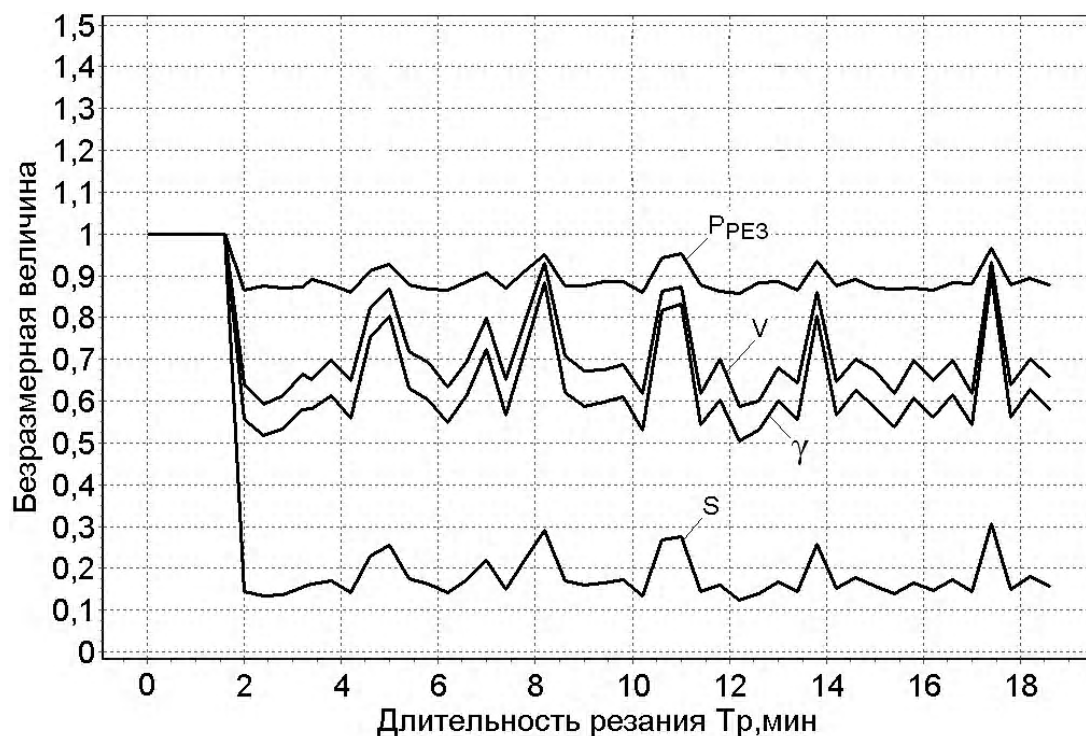


Рисунок 5– Изменение в процессе адаптивного управления регулируемых параметров $V(\tau)$, $S(\tau)$, а так же силы резания $P_{РЕЗ}$ и интенсивности износа γ

На рис. 5 приведены фактически реализованные режимы резания ($V(\tau)$ и $S(\tau)$), позволившие завершить обработку детали без замены инструмента и обеспечить тем самым выполнение в процессе резания условия (2). Фактически реализованная при этом длительность бездефектной обработки (скорректированное значение ресурса инструмента) T_{ϕ} приведена на рис. 4.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Эксперимент показал, что в процессе обработки детали прогноз индивидуального ресурса $T_{инд}$ не превышает требуемой по технологическому процессу длительности обработки $T_{тр}$ (рис. 4), т.е. условие (2) не выполнялось. При этом индивидуальный ресурс в среднем равнялся 12 мин, что составляло, порядка, 67% от требуемой длительности обработки. Для компенсации этого несоответствия потребовалось уменьшить соответственно на 33% интенсивность износа инструмента (рис. 5). Уменьшение интенсивности износа было обеспечено за счет уменьшения, порядка, на 30% скорости резания V и, в среднем, на 80 % подачи. Изменение режимов резания привело к уменьшению, в среднем, на 10% силы резания $P_{РЕЗ}$ (рис. 5), в результате чего уменьшилась нагрузка на инструмент, способствующая, наряду с уменьшением скорости резания и подачи, продлению его ресурса и, соответственно, периода бездефектной обработки детали. Эксперимент показал, что наибольшему изменению подверглась подача S , оказывающая наиболее существенное влияние при неизменной глубине резания t на интенсивность износа инструмента (интенсивность его нагружения).

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача по разработке автоматизированной системы адаптивного управления

резанием, программное обеспечение которой впервые в практике управления станками с ЧПУ реализует новую методологию прогнозирования индивидуального ресурса режущего инструмента. Данная методология не предусматривает использование средне статистических по природе нормативных величин износа и ресурса (стойкости) инструмента. Методология предусматривает прогноз индивидуального ресурса инструмента, что обеспечивает эксплуатацию инструмента, исходя из его фактического состояния. Это позволяет избежать в практике резания в равной степени не желательные, как внезапный отказ инструмента, так и его преждевременную замену и соответственно предупреждать появление непредвиденного брака при изготовлении изделия.

Научная новизна изложенных в статье результатов исследований состоит в том, что впервые в практике управления объектами, математическая модель которых известна не полностью, а характеристики объекта не постоянны и непрерывно изменяются в зависимости от внутренних условий, удалось разработать и предложить для широкого применения в реальном производстве совершенно новую методологию прогнозирования ресурса режущего инструмента, послужившую основой для разработки автоматизированной системы адаптивного управления резанием. Алгоритм управления предусматривает сочетание в рамках единого процесса решение задач идентификации и управления. По результатам идентификации модели объекта, в качестве которой рассматривается модель тренда звука, сопровождающего процесс резания, определяется индивидуальный ресурс режущего инструмента, знание которого позволяет гибко варьировать режим резания с целью продления в заданных пределах срок бездефектной эксплуатации инструмента.

Практическая значимость полученных результатов заключается в разработке программного продукта и создании на основе этого программно-аппаратного комплекса, позволившего внедрить в практику резания в виде автоматизированной системы адаптивного управления резанием новую методологию прогнозирования ресурса рабочего органа технологических металлообрабатывающих систем.

Перспективы дальнейших исследований состоят в создании универсальной системы контроля любого технологического оборудования, работа которого сопровождается генерированием различных по физической природе информационных сигналов, объективно отражающих степень критичности технического состояния поднадзорного оборудования и служащих основой для прогнозирования согласно рассмотренной в статье новой методологии их индивидуального ресурса, отвечающего фактически складывающимся условиям их эксплуатации.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Сумского государственного университета «Моделі та інформаційні технології проектування і управління в складних системах» (номер государственной регистрации 0115U001569).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адаптивное управление станками : монография / [Б. С. Балакшин, Б. М. Бозров, И. М. Баранчукова, В. П. Вороненко и др.], под ред. Б. С. Балакшина. – М. : Машиностроение, 1973. – 688 с.
2. Никитина Л. Г. Адаптивное управление станками / Л. Г. Никитина // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2011. – № 3. – С. 61–64.
3. Koren Y. Adaptive Control Systems for Machining / Y. Koren // Manufacturing Review. – 1989. – Vol 2, № 1. – P. 6–15.
4. Бирик В. Л. Методы прогнозирования долговечности режущих инструментов [Электрон. ресурс] / В. Л. Бирик. – Режим доступа: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=28853>.
5. Залого В. А. Контроль динамического состояния металлообрабатывающей технологической системы и прогнозирование ее ресурса : монография / В. А. Залого, В. М. Нагорный, В. В. Нагорный. – Сумы : Изд-во Сумского гос. ун-та, 2016. – 241 с.
6. Проников А. С. Надежность машин : монография / А. С. Проников. – М. : Машиностроение, 1978. – 592 с.
7. Справочник технолога-машиностроителя / [В. Б. Борисов, Е. И. Борисов, В. Н. Васильев и др.]; под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд. – М. : Машиностроение, 1986. – 656 с.
8. Красножон Г. И. Определение ресурса и оценка технического состояния промышленного оборудования / Г. И. Красножон, В. В. Нагорный // Вибрация машин. Измерение, снижение, защита. – 2007. – № 4(11). – С. 38–42.
9. Основы теории резания материалов: учебник / [Н. П. Мазур, Ю. Н. Внуков, А. И. Грабченко и др.]; под ред. Н. П. Мазура, А. И. Грабченко. – 2-е изд. – Х. : НТУ «ХПИ», 2013. – 534 с.
10. Мустафаев Г. А. Использование датчиков адаптивного управления для повышения качества обработки деталей на станке с ЧПУ / Г. А. Мустафаев, Е. В. Сидорчик // Молодой ученый. – 2013. – № 9. – С. 60–62.
11. Шарабура С. Н. Система адаптивного управления процессом обработки деталей на станках с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. Н. Шарабура, В. В. Шевченко. – Режим доступ: <http://web.snauka.ru/issues/2014/>.
12. Васильев С. В. ЭДС и температура резания / С. В. Васильев // Станки и инструмент. – 1980. – № 10. – С. 20–22.
13. Остафьев В. А. Адаптивная система управления / В. А. Остафьев, Г. С. Тымчик, В. В. Шевченко // Механизация и автоматизация управления. – 1983. – № 1. – С. 18–20.
14. Постников С. Н. Электрические явления при трении и резании : монография / С. Н. Постников. – Горький : Волго-Вят.кн.изд-во, 1975. – 280 с.
15. Ярута С. П. Принципы создания систем адаптивного контроля технологических процессов для станков с ЧПУ [Электрон. ресурс] / С. П. Ярута, П. А. Усачев. – Режим доступа: <http://web.snauka.ru/issues/2012/04/11652>.
16. Inamura T. Computer control of chattering in turning operation / T. Inamura, T. Senda, T. Sata // Annals of the CIRP. – 1977. – (1). – P. 181–186.
17. Donahue E. J. Applications of adaptive control in the aerospace industry / E. J. Donahue // SME Paper. – 1976. – No. MS 76. – P. 274.
18. Yen D. W. Adaptive control in machining –A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms / D. W. Yen, P. K. Wright // ASME Journal of Engineering for Industry. – 1983. – № 105 (1). – P. 31–38.
19. Чистяков А. В. Оптимизация эксплуатационно-технологических процессов в машиностроении / А. В. Чистяков, В. И. Бутенко, А. Я. Гоголев. – Новочеркасск : изд-во НГТУ, 1997. – 228 с.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2017.

Після доробки 13.03.2017.

Нагорный В. В.

Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук секції інформаційних технологій проектування, Сумський державний університет, Суми, Україна

АВТОМАТИЗОВАНЕ УПРАВЛІННЯ РЕЖИМАМИ РІЗАННЯ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУ ІНДИВІДУАЛЬНОГО РЕСУРСУ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

Актуальність. У статті викладені результати досліджень по розробці нової методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту, яка стала підґрунтям автоматизованої системи управління роботою металообробного обладнання. Прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту є злободенною, але так і не вирішеною до сих пір проблемою, що і визначає актуальність викладеного в статті матеріалу.

Метою роботи є розробка методології прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту і реалізація її в практиці управління різанням у вигляді алгоритму і програмного продукту, що склали основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем.

Метод. Управління цих систем передбачає поєднання в рамках єдиного процесу вирішення завдань ідентифікації та управління. Ідентифікації піддається модель тренда інформаційного сигналу, що генерується в процесі роботи обробної системи, яка використовується в якості моделі, яка описує динаміку піднаглядного обладнання. За результатами прогнозування індивідуального ресурсу інструменту і зіставлення його з необхідною тривалістю механічної обробки, приймається рішення про варіюванні величин параметрів, що управляють (подачі і оберти шпинделя), та забезпечують реалізацію на новопризначених режимах необхідного періоду бездефектної експлуатації інструменту.

Результати. Розроблено програмний продукт, що склав основу автоматизованої системи адаптивного управління роботою металообробних технологічних систем, алгоритм роботи яких відображає запропоновану методологію прогнозування індивідуального ресурсу ріжучого інструменту.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили ефективність запропонованої методології прогнозування ресурсу ріжучого інструменту і працездатність апаратно-програмного комплексу, що реалізує дану методологію в практиці різання. Наукова новизна викладе-

них в статті результатів досліджень полягає в тому, що вперше в практиці машинобудування удалося розробити абсолютно нову методологію прогнозування індивідуального ресурсу робочого інструмента, що дозволяє цілеспрямовано керувати тривалістю перебігу технологічного процесу, орієнтуючись на фактичний технічний стан основного елемента технологічної системи. Практична значимість отриманих результатів полягає в створенні програмно-апаратного комплексу, що автоматизує процес адаптивного управління режимами різання і містить програмне забезпечення, яке відображає алгоритм нової методології прогнозування індивідуального ресурсу інструменту. Перспективи подальших досліджень полягають у створенні універсальної системи контролю будь-якого технологічного обладнання, робота якого супроводжується генеруванням різних за фізичною природою інформаційних сигналів, що об'єктивно відображають ступінь критичності технічного стану піднаглядного обладнання.

Впровадження подібної методології контролю не тільки в процес виготовлення, а й в умови експлуатації різних за конструкцією та призначенням машин і механізмів, вирішує проблему визначення індивідуального ресурсу технічних систем, яка давно стоїть на порядку денному, що і визначає цінність проведених досліджень і їх помітний внесок в науку управління.

Ключові слова: автоматизація, адаптивне управління, індивідуальний ресурс, програмний продукт, обробка різанням, обробні системи, прогноз ресурсу, ідентифікація, тренд інформаційного сигналу, математична модель, період бездефектної обробки.

Nahorny V. V.

PhD., Senior Lecturer of the Computer Science Department, Section of the Information Technologies, Sumy State University, Sumy, Ukraine

AUTOMATED CONTROL CUTTING BASED PREDICTION OF INDIVIDUAL LIFE OF THE CUTTING TOOL

Context. The article presents the results of research to develop a new methodology for the prediction of individual life of the cutting tool, which served as the basis for the automated operation of the control system of the metal cutting equipment. Predictions of individual life of the cutting tool is topical, but have not solved the problem so far, and this determines the relevance of the material contained in the article.

Objective. The goal of the work was to develop a methodology for forecasting the individual life of the cutting tool and implementing it in practice by cutting the control algorithm and software, which formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems.

Method. The method provides for control of these systems in a single combination of process control solutions and identification tasks. Identification information signal subjected to the trend model generated during operation of the processing system, which is used as a model, describing the dynamics of the supervised equipment. As a result of the prediction of individual life of the cutting tool and compare it with the desired duration of mechanical treatment, a decision on the variation of the values of the control parameters (feed and spindle speed) to ensure the implementation of the newly appointed regimes required period of faultless operation of the tool.

Results. Developed software product that formed the basis of the automated system of adaptive control operation of metal-processing systems. The algorithm of the control systems reflects the proposed methodology for the prediction of individual life of the cutting tool.

Conclusions. The experiments confirmed the effectiveness of the proposed methodology for the prediction of the cutting tool life and performance of hardware and software that implements this methodology in practice cutting. Scientific novelty research is that for the first time in the practice of engineering develops a completely new control methodology for forecasting the individual life of the cutting tool, that allows you to specifically control the duration of the technological process, focusing on the actual technical condition of the main elements of the technological system.

The practical significance of the results is to create a hardware and software system that automates the process of adaptive management of cutting conditions and containing the software algorithm that reflects the new methodology for predicting an individual resource tool. Prospects for further research consists in the creation of a universal system of control of any process equipment, the operation of which is accompanied by the generation of different physical nature of the information signals, objectively reflecting the degree of criticality of the technical condition of the equipment under supervision. The introduction of such a monitoring methodology not only in the manufacturing process, but also in terms of exploitation of different machines determines the value of the research and their significant contribution to the science of control.

Keywords: automation, adaptive control, an individual resource, software, machining, processing system, prediction of individual life, identification, trend information signal, a mathematical model, the period of defect-free processing, the state of supervised equipment.

REFERENCES

1. Balakshin B. S., Bozrov B. M., Baranchukova I. M., Voronenko V. P. i dr. pod red. B. S. Balakshina. *Adaptivnoe upravlenie stankami : monografiya*, Moscow, Mashinostroenie, 1973, 688 p.
2. Nikitina L. G. *Adaptivnoe upravlenie stankami, Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*, 2011, No. 3, pp. 61–64.
3. Koren Y. *Adaptive Control Systems for Machining, Manufacturing Review*, 1989, Vol 2, No. 1, pp. 6–15.
4. Bibik V. L. *Metodyi prognozirovaniya dolgovechnosti rezhushchih instrumentov [Elektron. resurs]*. Rezhim dostupa: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=28853>.
5. Zaloga V. A., Nagornyy V. M., Nagornyy V. V. *Kontrol dinamicheskogo sostoyaniya metalloobrabatyvayushey tehnologicheskoy sistemy i prognozirovaniye ee resursa : monografiya*. Sumy, Izd-vo Sumskogo gos. un-ta, 2016, 241 p.
6. Pronikov A. S. *Nadezhnost mashin : monografiya*. Moscow, Mashinostroenie, 1978, 592 s.
7. Borisov V. B., Borisov E. I., Vasilev V. N. i dr.; pod red. Kosilovoy A. G., Mescheryakova R. K. *Spravochnik tehnologa-mashinostroitelya*. 4-e izd. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 656 p.
8. Krasnozhan G. I., Nagornyy V. V. *Opredeleniye resursa i otsenka tehnikeskogo sostoyaniya promyshlennogo oborudovaniya, Vibratsiya mashin. Izmereniye, snizheniye, zaschita*, 2007, No. 4(11), pp. 38–42.
9. Mazur N. P., Vnukov Yu. N., Grabchenko A. I. i dr.; pod red. Mazura N. P., Grabchenko A. I. *Osnovny teorii rezaniya materialov: uchebnik*, 2-e izd. Har'kov, NTU «HPI», 2013, 534 p.
10. Mustafayev G. A., Sidorchik E. V. *Ispolzovanie datchikov adaptivnogo upravleniya dlya povysheniya kachestva obrabotki detaley na stanke s ChPU, Molodoy uchenyy*, 2013, No. 9, pp. 60–62.
11. Sharabura S. N., Shevchenko V. V. *Sistema adaptivnogo upravleniya protsessom obrabotki detaley na stankah s ChPU [Elektron. resurs]*, Rezhim dostup: <http://web.snauka.ru/issues/2014>.
12. Vasilev S. V. *EDS i temperatura rezaniya, Stanki i instrument*, 1980, No.10, pp. 20–22.
13. Ostafev V. A., Tyimchik G. S., Shevchenko V. V. *Adaptivnaya sistema upravleniya, Mehanizatsiya i avtomatizatsiya upravleniya*, 1983, No. 1, pp. 18–20.
14. Postnikov S. N. *Elektricheskie yavleniya pri trenii i rezanii : monografiya*. Gorkiy, Volgo-Vyat.kn.izd-vo, 1975, 280 p.
15. Yaruta S. P., Usachev P. A. *Printsiipy sozdaniya sistem adaptivnogo kontrolya tehnologicheskikh protsessov dlya stankov s ChPU [Elektron. resurs]*. Rezhim dostupa: <http://web.snauka.ru/issues/2012>.
16. Inamura T., Senda T., Sata T. *Computer control of chattering in turning operation, Annals of the CIRP*, 1977, (I), R. 181–186.
17. Donahue E. J. *Applications of adaptive control in the aerospace industry, SME Paper*, 1976, No. MS 76, P. 274.
18. Yen D. W., Wright P. K. *Adaptive control in machining – A new approach based on the physical constraints of tool wear mechanisms, ASME Journal of Engineering for Industry*, 1983, No. 105 (I), pp. 31–38.
19. Chistyakov A. V., Butenko V. I., Gogolev A. Ya. *Optimizatsiya ekspluatatsionno-tehnologicheskikh protsessov v mashinostroenii. Novocherkassk, izd-vo NGTU*, 1997, 228 p.

Сафоник А. П.¹, Клепач М. І.², Таргоній І. М.³¹Д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна²Канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна³Аспірант кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕАКТОРІВ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТОКІВ ПРИ КОНТРОЛІ КОНЦЕНТРАЦІЇ КИСНЮ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу розроблення математичних моделей процесів очищення стічних вод, з урахуванням автоматизованого керування.

Мета роботи – розробка математичної моделі процесу очищення стічних вод від біологічних речовин іммобілізованими мікроорганізмами при багатоступеневому анаеробно-аеробному способі очищення, яка б враховувала процеси окислення органічних речовин, розмноження і відмирання бактерій як сукупність взаємодії різних факторів в залежності від концентрацій розчиненого у воді кисню та забруднюючих органічних речовин.

Метод. У роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки для побудови математичних моделей процесів очищення рідин, загальні підходи до побудови модельних задач, у яких одні складові домінують над іншими. Побудовано математичну модель процесу біологічного очищення стічних вод, що враховує зміну концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу.

Результати. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції pdepe середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення, активного мулу та кисню протягом часу очистки рідини, які враховують здатність бактерій до розмноження та відмирання.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили адекватність побудованої моделі. На основі отриманих результатів розроблено автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах, яка забезпечує енергозберігаючі принципи роботи установки.

Ключові слова: математична модель, біологічне очищення, зворотний вплив, контроль кисню, автоматизоване управління.

НОМЕНКЛАТУРА

$C(x, t)$ – концентрація забруднення;

$B(x, t)$ – концентрація активного мулу;

$K(x, t)$ – концентрація кисню, необхідна для підтримання життєдіяльності бактерій;

β – коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості фільтра та швидкість потоку рідини;

V – об'єм реактора;

k_i – коефіцієнт рециркуляції активного мулу;

v_C – швидкість руху субстрату;

D_C – коефіцієнт дифузії (забруднення);

$K_B(B)$ – функція, яка характеризує поглинання кисню бактеріями;

v_B – швидкість руху активного мулу;

D_B – коефіцієнт дифузії (активний мул);

$K_K(B)$ – функція, яка характеризує обмін кисню;

K_0 – концентрація насичення води киснем при заданих температурі та тиску;

v_K – швидкість подачі кисню;

D_K – коефіцієнт дифузії (кисень);

ε , K_B , K_B^0 , K_K , K_K^0 , d_C , d_B , d_K – тверді параметри (характеризують відповідні м'які параметри $K_B(B)$, $K_K(B)$ тощо), що знаходяться експериментальним способом;

ε – малий параметр (він враховує переваги одних складників процесу над іншими, а саме: явища міжкомпонентної взаємодії процесу і є малим порівняно з іншими його складниками).

ВСТУП

Інтенсивний розвиток промисловості призводить до збільшення виробничих потужностей підприємств, що супроводжується погіршенням стану природних екосистем, зокрема, через недостатнє очищення промислових стоків, які є невід'ємною частиною харчового, мікробіологічного, фармацевтичного та багатьох інших виробництв. Кількість і різноманітність відходів залежать від профілю і асортименту продукції підприємства. Незалежно від типу всі стічні води потребують обов'язкового очищення, оскільки в них містяться забруднюючі речовини, які значно перевищують допустимі концентрації [1].

В залежності від концентрації забруднювачів у стічних водах для забезпечення відповідних допустимих показників і зменшення згубного впливу на довкілля використовують магнітні, механічні, біологічні та інші очисні системи. Одним з найчастіше застосовуваних методів є біологічне очищення [2, 3], де використовуються процеси аеробної очистки (додатково подається повітря), анаеробної очистки (без доступу повітря).

В основі процесу біологічної очистки лежить деградація і окислення органічних речовин мікроорганізмами, а також здатність мікроорганізмів до розмноження та відмирання. При цьому активність бактерій і мікроорганізмів значно залежить від різних факторів, зокрема, від концентрації розчиненого в субстраті кисню. Сутте-

вим фактором, що впливає на ефективність очищення, є також концентрація активного мулу, яка регулюється рециркуляцією та відведенням надлишкового активного мулу для підтримання життєдіяльності мікроорганізмів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для дослідження використаємо модельну задачу процесу очищення стічних вод від біологічних речовин іммобілізованими мікроорганізмами при багатоступеневому анаеробно-аеробному способі очищення запропонованому в [2]. Особливостями такої постановки задачі є те, що в системі рівнянь (1) введено ряд коефіцієнтів, які дозволяють описувати процеси окислення органічних речовин, розмноження і відмирання бактерій як сукупність взаємодії різних факторів в залежності від концентрацій розчиненого у воді кисню та забруднюючих органічних речовин з врахуванням конструктивних параметрів та граничних і початкових умов (2).

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} = D_C \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + v_C \frac{\partial C}{\partial x} - \beta C B, \\ \frac{\partial B}{\partial t} = D_B \frac{\partial^2 B}{\partial x^2} + v_B \frac{\partial B}{\partial x} + K_B(B) K, \\ \frac{\partial K}{\partial t} = D_K \frac{\partial^2 K}{\partial x^2} + v_K \frac{\partial K}{\partial x} + K_K(B) \cdot (K_H - K), \end{cases} \quad (1)$$

$$C|_{x=0} = C^*(t), \quad B|_{x=0} = B^*(t), \quad K|_{x=0} = K^*(t), \quad \frac{\partial C}{\partial x}|_{x=l} = 0,$$

$$\frac{\partial B}{\partial x}|_{x=l} = 0, \quad \frac{\partial K}{\partial x}|_{x=l} = 0,$$

$$C|_{t=0} = C^*(x), \quad B|_{t=0} = B^*(x), \quad K|_{t=0} = K^*(x), \quad (2)$$

де $\beta = (Q \cdot (1 + k_i) / V)$, $D_C = d_C \varepsilon$, $K_B(B) = \beta (K_B - \varepsilon K_B^0 B)$, $D_B = d_B \varepsilon$, $D_K = d_K \varepsilon$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Основною задачею керування процесом біологічної очистки є вилучення та стабілізація концентрації забруднень на допустимому рівні у відпрацьованих рідинах. Проте немає засобів прямого неперервного вимірювання даного показника, а результати отримують лише дослідним шляхом. Тому для аналізу ефективності очищення рідин використовують вимірювання ряду технологічних параметрів, на основі яких можна приймати рішення про величину концентрації органічних домішок у стічних водах та виробляти відповідні керуючі впливи.

Для покращення якості очищення стічних вод та зменшення затрат на очищення застосовують системи автоматизованого керування установками. Сучасні програмні засоби автоматизації дозволяють реалізувати енергозберігаючі технології, які за рахунок програмного керування реалізують економічні режими роботи очисних установок в періоди різної інтенсивності та концент-

рації надходження стоків на очищення. Для автоматизації очисних систем розробляють алгоритми, які підтримують оптимальні співвідношення між продуктивністю всієї установки та кількістю підведеного повітря виробленого компресорними установками, стабілізацією та відведенням надлишкового активного мулу і твердого осаду в який випадають бактерії після завершення своєї активної фази. Для автоматизації біологічних реакторів запропоновано ряд технологічних і проектних [4–6] рішень на основі загальних математичних моделей [5–15], недоліками яких є те, що вони описують лише процеси активної фази очищення. При цьому нехтуючи вагомим чинником, який впливає на якість очищення стічних вод – впливом споживання кисню на процеси життєдіяльності аеробних бактерій. Відповідно мета даної роботи є побудова математичної моделі процесу біологічного очищення стічних вод, що враховує зміну концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу і на основі отриманих результатів розробити автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У роботі використано методи математичної фізики та гідродинаміки для побудови математичних моделей процесів очищення рідин, загальні підходи до побудови модельних задач, у яких одні складові домінують над іншими. Моделювання проведемо в програмному середовищі Matlab, використавши М-функцію *pdepe*, призначену для розв'язання одномірних крайових задач для систем параболічних і еліптичних диференціальних рівнянь в частинних похідних (PDE) першого порядку по одній просторовій змінній і часу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Оскільки для процесів розмноження та відмирання коефіцієнти набувають різних значень для моделювання використаємо 4 етапи: розмноження / відмирання / розмноження / відмирання. Кожен із них характеризується такими особливостями: на початковому етапі по всьому реактору встановлено рівномірну концентрацію активного мулу за заданим законом розподілено забруднення, відповідно до граничних та початкових умов. Вихідні дані першого етапу є вхідними для другого і отримуються шляхом апроксимації стандартними засобами Matlab. Для отримання розв'язку системи (1) за умов (2) перетворимо вхідні дані у відповідні машинні змінні:

```
Q=7.2;
ki=1;
V=0.7;
KK=0.001;
KB=100;
K0=6;
b=Q*(1+ki)/V;
V1=1.26; V2=1.92; V3=1.53;
D1=0.721; D2=10^-5; D3=10^-5;
c1=1;
c2=1;
```

```

c3=1;
f1=D1*DuDx(1);
f2=D2*DuDx(2);
f3=D3*DuDx(3);
s1=V1*DuDx(1)-u(1)*u(2)*b;
s2=V2*DuDx(2)+u(3)*u(2)*b*KВ;
s3=V3*DuDx(3)+u(3)*b+KK*u(1)*(K0-u(3));
c = [c1;c2; c3];
f = [f1; f2; f3];
s = [s1; s2; s3].

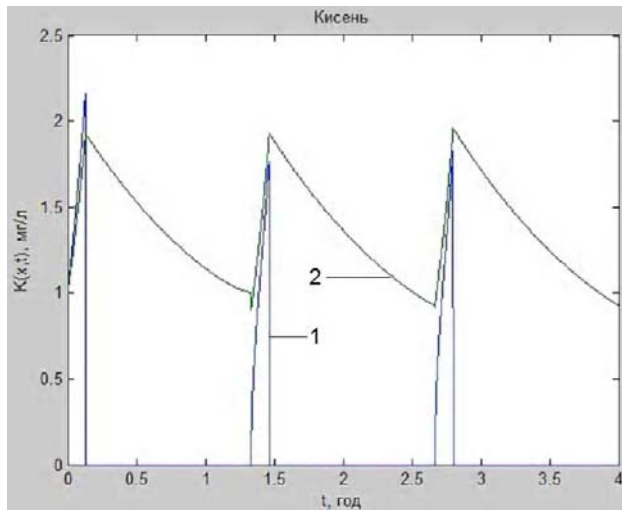
```

Для виклику функції *pdepe* виконаємо наступний код, в результаті якого отримуємо розрахунки першого етапу:

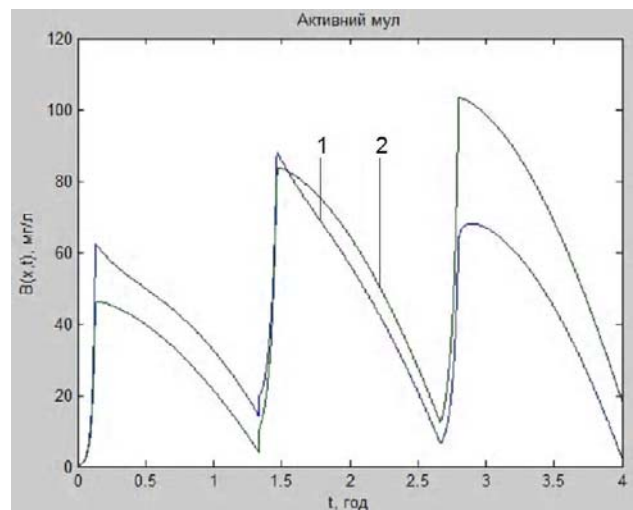
```

m = 0;
x = linspace(0,1,100);
t = linspace(0,0.1,100);
sol = pdepe(m,@pdex2pde,@pdex2ic,@pdex2bc,x,t);
u1 = sol(:,:,1);
u2 = sol(:,:,2);
u3 = sol(:,:,3).

```



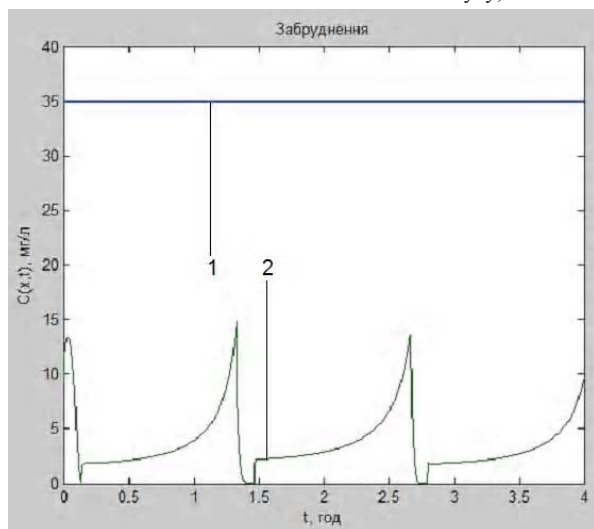
а



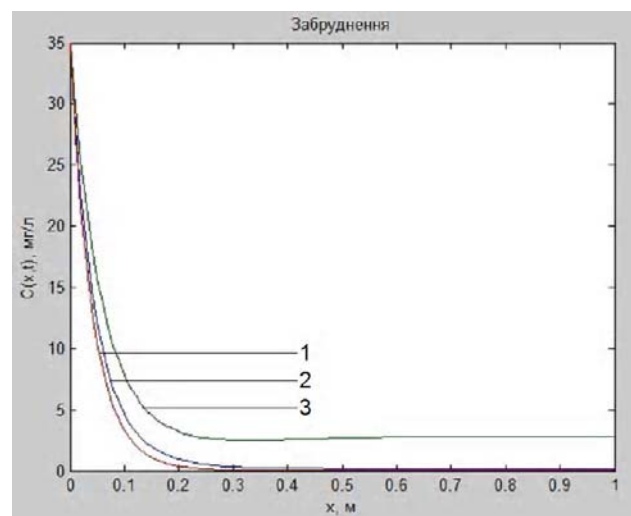
б

Рисунок 1 – Зміна концентрації кисню:

а – та активного мулу; б – із часом на вході – 1 та виході 2 – реактора



а



б

Рисунок 2 – Зміни концентрації забруднення:

а – з часом; б – та вздовж фільтра

Після обчислень усіх етапів для наочності отриманих результатів їх представлено у вигляді графіків із застосуванням стандартних засобів побудови середовища Matlab.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Шляхом комп'ютерного моделювання за наведеними вхідними даними: $L|_{t=0} = 50 - 15 \cdot e^x$ г/л, $X|_{t=0} = 0,1$ г/л, $C|_{t=0} = 0,001$ г/л, $Q = 7,2$ м³/год, $V = 0,7$ м³, $C_0 = 6$ мг/л, $v_C = 1,26$ м/год, $v_B = 1,92$ м/год, $v_K = 1,26$ м/год, $D_C = 0,721$, $D_B = 10^{-5}$, $D_K = 10^{-5}$, отримали наступні результати (рис. 1–2).

6 ОБГОВОРЕННЯ

На рис. 1а показано, що на очищення поступають стоки з певною концентрацією забруднень і розчиненого у воді кисню. В реакторі за рахунок споживання кисню активним мулом його концентрація падає. Для забез-

печення життєдіяльності мікроорганізмів здійснюється періодична подача кисню зі стиснутим повітрям. Відповідно із змінами концентрації кисню відбуваються зміни концентрації активного мулу як показано на рис. 16. При постійному навантаженні забруднення на реактор отримано залежність зміни концентрації забруднюючих речовин на виході реактора рис. 2а (крива 2). По суті, отримані залежності є імпульсними перехідними характеристиками реактора за різними каналами зв'язків і характеризують динамічні властивості реактора як об'єкта управління. Вони є важливими результатами для розроблення алгоритму автоматизованого управління процесами в біологічних реакторах.

В очисних спорудах можуть використовуватися біологічні реактори різних типів (рис. 3). У залежності від кисневого режиму і виду мікрофауни активного мулу біологічні реактори виконують функції метатенків 2.1, окситенків 2.2 і аеротенків 2.3, яких може бути декілька. До складу технологічної схеми входять також приймальна камера 1, стабілізатор мулу 4, вторинний відстійник 2.4, вузол знезараження 8. Для ефективного контролю та оптимізації процесів біологічного очищення розроблена автоматизована система управління (АСУ). Дана система запроєктована на базі сучасних універсальних засобів автоматизації фірми Siemens, до складу якої входить контролер серії S7-300 і панель оператора, які

здійснюють функції вимірювання, контролю, регулювання, дискретного управління, візуалізації, архівування подій і параметрів процесу очищення стоків та формування аварійних повідомлень. Управління здійснюється за часовою програмою з корекцією за вимірюваними параметрами. Передбачено віддалений доступ з персонального комп'ютера.

До основних функцій АСУ відносяться підтримка заданих концентрацій розчиненого кисню та активного мулу у всіх резервуарах. Для забезпечення стабільної роботи очисної системи та управління використовуються сигнали не тільки вимірюваного кисню, але і витрати стічної води та швидкості споживання кисню в активній зоні аеротенків.

Автоматичне утримування необхідних параметрів біологічної очистки в умовах різких змін органічних і гідравлічних навантажень забезпечує високу якість очищення. В залежності від кількості стічних вод автоматично регулюється потужність установки, при цьому передбачено два рівні економних режимів, залежно від часу відсутності надходження стічних вод.

За допомогою керованих ерліфтів здійснюється багатоконтурна рециркуляція зворотного активного мулу, причому ступінь рециркуляції змінюється автоматично пропорційно кількості стічних вод, що надходять на установку для підтримки постійного навантаження на мул по

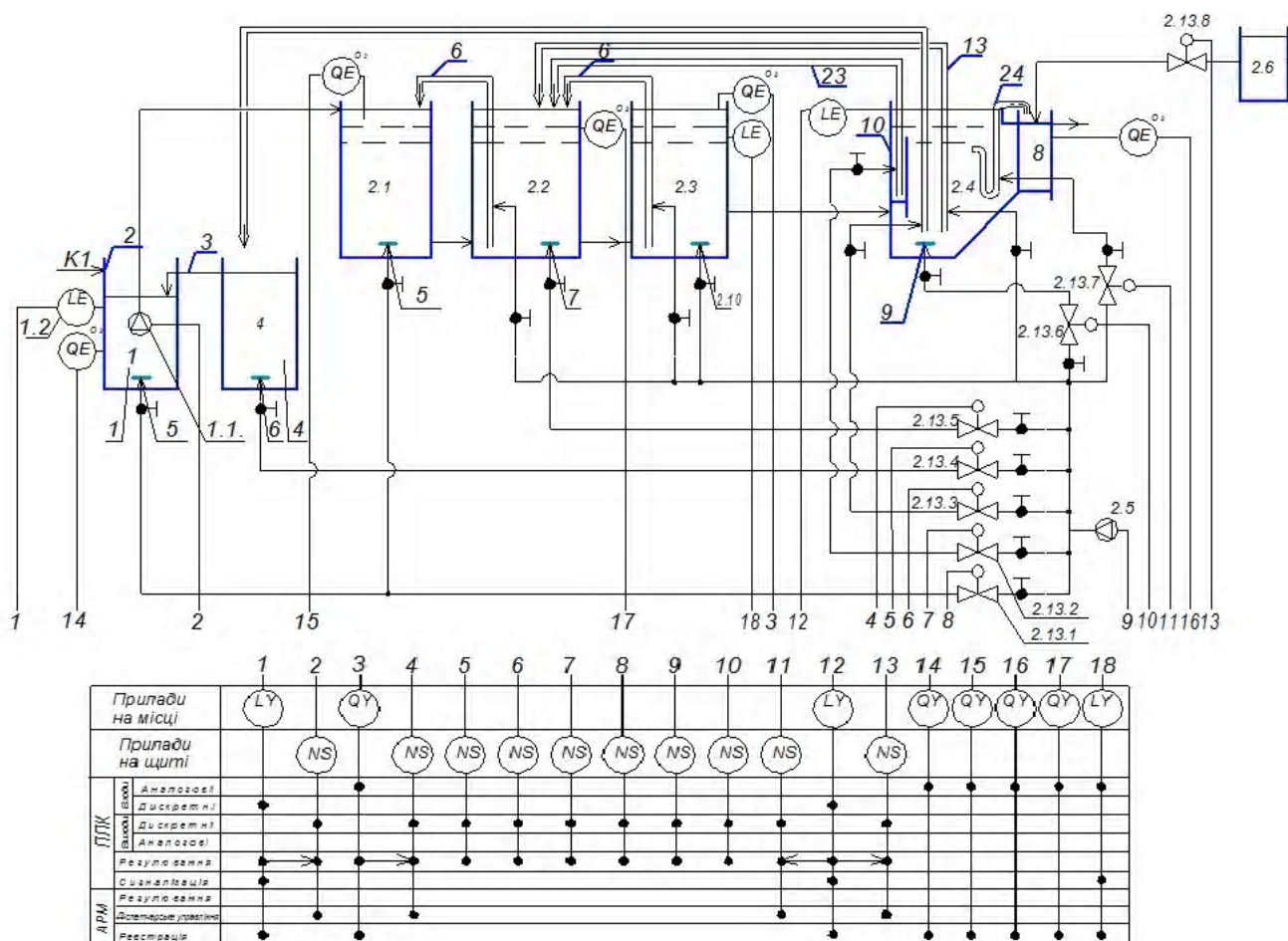


Рисунок 3 – Схема автоматизації установки біологічного очищення стічних вод

органічних речовинах. Видалення надлишкового активного мулу з вторинного відстійника забезпечує підтримку його оптимального віку.

ВИСНОВКИ

Побудовано математичну модель, що описує закономірності процесів зміни концентрацій забруднення, активного мулу і кисню при розмноженні та відмиранні бактерій в біологічних реакторах різного типу. Знайдено розв'язок відповідної модельної задачі з використанням функції рдере середовища MatLab. Наведені результати розрахунків розподілу концентрації забруднення, активного мулу та кисню протягом часу очистки рідини, які враховують здатність бактерій до розмноження та відмирання. На основі отриманих результатів розроблено автоматизовану систему управління допустимою концентрацією забруднення у стічних водах. В алгоритмі управління реалізовано енергозберігаючі принципи, передбачено два рівні економних режимів установки.

ПОДЯКИ

Робота виконана у відповідності з планом науково-дослідних робіт Національного університету водного господарства та природокористування та Рівненського державного гуманітарного університету за темами: «Розвиток методів комплексного аналізу і теорії збурень моделювання нелінійних процесів з керуванням, ідентифікацією та оптимізацією» (№ держ. реєстр. 0116U00711), «Дослідження та удосконалення раціональної ресурсозберігаючої технології очищення підземних вод від сполук заліза для питного водопостачання» (№ держ. реєстр. 0116U003758).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Саблій Л. А. Багатоступенева анаеробно-аеробне очищення висококонцентрованих стічних вод / Л. А. Саблій // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. – 2009. – Вип. 4. – С. 185–192.
2. Сафоник А. П. Комп'ютерне моделювання процесу аеробно-го очищення стічних вод / А. П. Сафоник, І. М. Таргоний // Проблеми машиностроения. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 31–36.
3. Козачек А. В. Исследование математической модели процесса аэробной очистки сточных вод как стадия оценки качества окружающей водной среды / А. В. Козачек, И. М. Авдашин, В. А. Лузгачев // Вестн. Тамбовского государственного технического университета. – 2014. – Т. 19, Вып. 5. – С. 1683–1685.
4. Математическое моделирование и управление качеством очистки сточных вод / [С. А. Понкратова, В. М. Емельянов, А. С. Сироткин, М. В. Шулаев] // Вестн. Казанского технологического университета. – 2010. – № 5–6. – С. 76–85.
5. Нелінійні задачі типу фільтрація-конвекція-дифузія-масообмін за умов неповних даних / [А. Я. Бомба, В. І. Гаврилук, А. П. Сафоник, О. А. Фурсачик]. – Рівне : Національний університет водного господарства та природокористування, 2011. – 276 с.
6. Bomba A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium / Andriy Bomba, Andriy Safonyk // Zeszyty Naukowe WSInf. – 2013. – Vol. 12, Nr 1. – P. 21–29.
7. Adetola V. Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems / V. Adetola, D. Lehrer, M. Guay // American Control Conf. on O'Farrell Street. – San Francisco, USA. – 2011. – P. 31–36.
8. Andrii Safonyk Mathematical design of process of water treatment by filter-clarifier with layer of hanging up sediment / Communications in Applied Analysis. – 2016. – 20. – P. 467–478.
9. Practical identifiability of ASM2d parameters-systematic selection and tuning of parameter subsets / [R. Brun, M. Kiihni, W. Gujer et al.] // Water Research. – 2002. – № 36. – P. 4113–4127.
10. Brune D. Optimal control of the complete-mix activated sludge process / D. Brune // Environmental Technology. – 1985. – № 6:11. – P. 467–476.
11. Dochain D. Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes / D. Dochain, P. Vanrolleghem. – London : IWA Publishing, 2001. – 342 p.
12. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient / A. P. Safonyk // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. – 2015. – Vol. 9. – P. 189–192.
13. Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment. / M. Ilenze, W. Gujer, T. Mino et al. // Activated sludge models ASM1, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report 9, IWA, London : IWA Publishing, 2000. – 122 p.
14. Knightes G. D. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data / G. D. Knightes, G. A. Peters // Biotechnol. Bioeng. 69. – 2000. – № 2. – P. 160–170.
15. Ghai Q. Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants / Q. Ghai // Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at IIT, Porsgrunn. Telemark University College, – 2008. – 187 p.

Стаття надійшла до редакції 17.01.2017.
Після доробки 06.03.2017.

Сафоник А. П.¹, Клепач Н. І.², Таргоний І. Н.³

¹Д-р техн. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

²Канд. физ.-мат. наук, доцент кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

³Аспирант кафедри автоматизації, електротехнічних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Національного університету водного господарства та природокористування, Рівне, Україна

ИССЛЕДОВАНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ РЕАКТОРОВ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОКОВ ПРИ КОНТРОЛЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА

Актуальность. Решена актуальная задача разработки математических моделей процессов очищения сточных вод, с учетом автоматизированного управления.

Цель работы – разработка математической модели процесса очистки сточных вод от биологических веществ иммобилизованными микроорганизмами при многоступенчатом анаэробно-аэробном способе очистки, которая бы учитывала процессы окисления органических веществ, размножение и отмирание бактерий как совокупность взаимодействий разных факторов в зависимости от концентраций растворимого в воде кислорода и загрязняющих органических веществ.

Метод. В работе использованы методы математической физики и гидродинамики для построения математических моделей процессов очистки жидкостей, общие подходы к построения модельных задач, в которых одни составные доминируют над другими. Построена

математическая модель процесса биологической очистки сточных вод, которая учитывает изменение концентрации загрязнения, активного ила и кислорода при размножении и отмирании бактерий в биологических реакторах разного типа.

Результаты. Найдено решение соответствующей модельной задачи с использованием функции *pdepe* среды Matlab. Приведенные результаты расчетов распределения концентрации загрязнения, активного ила и кислорода на протяжении времени очистки жидкости, которые учитывают способность бактерий к размножению и отмиранию.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили адекватность построенной модели. На основе полученных результатов разработана автоматизированная система управления допустимой концентрацией загрязнения в сточных водах, которая обеспечивает энергосберегающие принципы работы установки.

Ключевые слова: математическая модель, биологическая очистка, обратное влияние, контроль кислорода, автоматизированное управление.

Safonyk A. P.¹, Klepach M. I.², Targoni I. M.³

¹Dr. Sc., Associate Professor, Professor of Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

³Postgraduate Student, Department of Automation, Electrical and Computer-Integrated Technologies, National University of Water and Environment Management, Rivne, Ukraine

RESEARCH AND AUTOMATION OF BIOLOGICAL REACTORS OF EFFLUENT WITH THE OXYGEN CONCENTRATION CONTROL

Context. The actual problem of development of mathematical models of processes of wastewater treatment, subject to automatic control was resolved.

Objective to develop a mathematical model of the process of wastewater treatment from biological substances immobilized microorganisms in multistage anaerobic-aerobic method of purification which takes into account the oxidation of organic matter, reproduction and death of bacteria as a set of interaction of various factors, depending on the concentration of dissolved oxygen and pollutants organic matter.

Method. We used the methods of mathematical physics and hydrodynamics to build mathematical models of processes of cleaning fluids, common approaches to building model problems in which some components dominate over others. The mathematical model of biological wastewater treatment was built. It takes into account the changes in the concentrations of pollution, sludge and oxygen in reproduction and the withering away of the bacteria in biological reactors of various types.

Results. The solution of corresponding model problem was found by using functions *pdepe* environment MatLab. The results of calculations of concentration distribution of contamination, sludge and oxygen cleaning fluid over time were shown. It takes into account the ability of bacteria to multiply and dying.

Conclusions. The experiments confirmed the adequacy of the constructed model. Based on the results, the automated control system was developed. It controls permissible concentration of pollution in wastewater, which provides energy-saving principles of installation.

Keywords: mathematical model, biological treatment, the opposite effect, control of oxygen, automated control.

REFERENCES

1. Sablii L. A. Bahatostupeneva anaerobno-aerobne ochyshchennia vysokontsentryovanykh stichnykh vod, *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 2009, Vyp. 4, pp. 185–192.
2. Safonyk A. P., Tarhoni I. M. Kompiuterne modeliuvannia protsesu aerobnoho ochyshchennia stichnykh vod, *Problemy mashinostroeniya*, 2016, Vol. 19, No. 2, pp. 31–36.
3. Kozachek A. V., Avdashin I. M., Luzgachev V. A. Isledovanie matematicheskoy modeli protsessa aerobnoy ochistki stochnykh vod kak stadiya otsenki kachestva okruzhayushey vodnoy sredy, *Vestn. Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2014, Tom 19, Vyp. 5, pp. 1683–1685.
4. Ponkratova S. A., Emelyanov V. M., Sirotkin A. S., Shulaev M. V. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie kachestvom ochistki stochnykh vod, *Vestn. Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2010, No. 5–6, pp. 76–85.
5. Bomba A. Ya., Havryliuk V. I., Safonyk A. P., Fursachyk O. A. Neliniini zadachi typu filtratsii-konveksii-dyfuзии-masobmin za umov nepovnykh danykh. Rivne, Natsionalnyi universytet vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia, 2011, 276 p.
6. Bomba A., Safonyk A. Mathematical modeling of aerobic wastewater treatment in porous medium, *Zeszyty Naukowe WSInf*, 2013, Vol. 12, Nr 1, pp. 21–29.
7. Adetola V., Lehrer D., Guay M. Adaptive estimation in nonlinearly parameterized nonlinear dynamical systems, *American Control Conf. on O'Farrell Street*. San Francisco, USA, 2011, pp. 31–36.
8. Andrii Safonyk Mathematical design of process of water treatment by filter-clarifier with layer of hanging up sediment, *Communications in Applied Analysis*, 2016, 20, pp. 467–478.
9. Brun R., Kiihni M., Gujer W. et al. Practical identifiability of ASM2d parameters-systematic selection and tuning of parameter subsets, *Water Research*, 2002, No. 36, pp. 4113–4127.
10. Brune D. Optimal control of the complete-mix activated sludge process, *Environmental Technology*, 1985, No. 6:11, pp. 467–476.
11. Dochain D., Vanrolleghem P. Dynamical modelling and estimation in wastewater treatment processes. London, IWA Publishing, 2001, 342 p.
12. Safonyk A. P. Modelling the filtration processes of liquids from multicomponent contamination in the conditions of authentication of mass transfer coefficient, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2015, Vol. 9, pp. 189–192.
13. Ilenze M., Gujer W., Mino T. et al. Task group on mathematical modelling for design and operation of biological wastewater treatment, Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3. Scientific and Technical Report 9, IWA, London, IWA Publishing, 2000, 122 p.
14. Knights G. D., Peters G. A. Statistical analysis of nonlinear parameter estimation for monod biodegradation kinetics using bivariate data, *Biotechnol. Bioeng.* 69, 2000, No. 2, pp. 160–170.
15. Ghai Q. Modeling, estimation and control of biological wastewater treatment plants, *Doctoral Theses at NTNU 2008:108 at IIT, Porsgrunn. Telemark University College*, 2008, 187 p.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 3/2017

Науковий журнал

Головний редактор – д-р техн. наук С. О. Субботін

Заст. головного редактора – д-р техн. наук Д. М. Піза

Комп'ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 12.10.2017. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 23,02.
Тираж 300 прим. Зам. № 850.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.