



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 4(43) 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

№ 4(43) 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

№4(43) 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, ВІНТИ, 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 закриті (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

Гімплєвич 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. В., 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 № 5 від 28.12.2017.

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 СС лицензией СС-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, Джэрэло), 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

Гимпилович 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. В., 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 № 5 от 28.12.2017.

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. V. 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 № 5 dated 28.12.2017.

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

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	7
<i>Абрамович А. А., Каширский И. С., Поддубный В. А.</i>	
МЕТОД ОБРАБОТКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ.....	7
<i>Базіло К. В.</i>	
ПРИНЦИПЫ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ІМПЕДАНСУ КОЛИВАЛЬНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ДИСКА В ОБЛАСТІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ.....	15
<i>Piza D. M., Bugrova T. I., Lavrentiev V. M., Semenov D. S.</i>	
SELECTOR OF CLASSIFIED TRAINING SAMPLES FOR SPATIAL PROCESSING OF SIGNALS UNDER THE IMPACT OF COMBINED CLUTTER AND JAMMING.....	26
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	33
<i>Борисенко В. Д., Устенко С. А., Устенко І. В.</i>	
ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕХІДНИХ КРИВИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ.....	33
<i>Журавчак Л. М., Забродська Н. В.</i>	
РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПРУЖНОДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ У ПОРИСТОМУ ФЛЮЇДОНАСИЧЕНОМУ КУСКОВО- ОДНОРІДНОМУ ПІВПРОСТОРІ НЕПРЯМИМ МЕТОДОМ ПРИГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	40
<i>Радченко С. Г.</i>	
КОРРЕКТНОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ.....	49
<i>Шигимага В. А., Мегель Ю. Е., Коваленко С. В., Коваленко С. Н.</i>	
МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПОРАЦИИ МЕМБРАНЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ.....	57
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	66
<i>Бойко Н. І.</i>	
ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ.....	66
<i>Кондратенко Н. Р., Снігур О. О.</i>	
ІНТЕРВАЛЬНИЙ НЕЧІТКИЙ КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АРТЕЗІАНСЬКОЇ СВЕРДЛОВИНИ.....	77
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Lovkin V., Blagodariov O., Zaiko T.</i>	
THE SYSTEM OF CRITERIA FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN PATTERN RECOGNITION.....	85
<i>Пелешак Р. М., Литвин В. В., Пелешак І. Р.</i>	
ДИНАМІКА НЕЛІНІЙНОГО ОСЦИЛЯТОРНОГО НЕЙРОНА ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО СИГНАЛУ.....	97
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	106
<i>Бабаков Р. М.</i>	
ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРНЫХ ЗАТРАТ В МИКРОПРОГРАММНОМ АВТОМАТЕ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ.....	106
<i>Даденков С. А., Даденков Д. А.</i>	
МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДАЧ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ.....	116
<i>Davydov M. V., Lozynska O. V., Pasichnyk V. V.</i>	
EFFECTIVE ALGORITHM FOR PARSING SENTENCES USING SEMANTICALLY ATTRIBUTED WEIGHTED AFFIX CONTEXT FREE.....	124
<i>Козуля Т. В., Білова М. О.</i>	
ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА МЕТОДІВ З КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ.....	131
<i>Коробчинський М. В., Чирун Л. Б., Висоцька В. А., Кондратьев С. О.</i>	
ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ КОНТЕНТУ ІНТЕРНЕТ-ГАЗЕТИ МУЗИЧНИХ НОВИН.....	139
<i>Рачок Р. В., Боровик О. В., Боровик Л. В.</i>	
СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....	151
<i>Табунчик Г. В., Каплиенко Т. И., Шитикова Е. В.</i>	
МОДЕЛЬ ВЕРИФИКАЦИИ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ.....	162
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	168
<i>Bobyry M. V., Milostnaya N. A.</i>	
A SOFT FUZZY ALGORITHM OF THE MOBILE ROBOT CONTROL.....	168
<i>Гусева Ю. Ю., Мартиненко О. С., Кадикова І. М., Чумаченко І. В.</i>	
МЕТРИКИ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВИМОГ У ПРОЕКТАХ.....	179
<i>Зімчук І. В.</i>	
СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПОНИЖЕНОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НЕПЕРЕРВНИМИ ОБ'ЄКТАМИ.....	187
<i>Качан Ю. Г., Єрофєєва А. А.</i>	
ІННОВАЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ У ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ.....	193
<i>Тимченко В. Л., Лебедев Д. О.</i>	
АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ.....	200

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Abramovych A. A., Kashirsky I. S., Poddubny V. A.</i>	
METHOD OF PROCESSING THE REFLECTED SIGNALS FROM PULSED EDDY CURRENT CONVERTERS.....	7
<i>Bazilo C. V.</i>	
PRINCIPLES OF ELECTRICAL IMPEDANCE CALCULATING OF OSCILLATING PIEZOCERAMIC DISK IN THE AREA OF MEDIUM FREQUENCIES.....	15
<i>Piza D. M., Bugrova T. I., Lavrentiev V. M., Semenov D. S.</i>	
SELECTOR OF CLASSIFIED TRAINING SAMPLES FOR SPATIAL PROCESSING OF SIGNALS UNDER THE IMPACT OF COMBINED CLUTTER AND JAMMING.....	26
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	33
<i>Borisenko V. D., Ustenko S. A., Ustenko I. V.</i>	
GEOMETRIC MODELLING OF RAILWAYS SPATIAL TRANSITION CURVE.....	33
<i>Lubov Zhuravchak, Natalia Zabrods'ka,</i>	
SOLVING OF ELASTIC DYNAMICAL PROBLEM IN A POROUS FLUID-SATURATED PIECEWISE-HOMOGENEOUS HALF-SPACE BY THE INDIRECT METHOD OF NEAR-BOUNDARY ELEMENTS.....	40
<i>Radchenko S. G.</i>	
CORRECT STATISTICAL MODELING IN CONDITIONS OF INCOMPLETE INITIAL INFORMATION.....	49
<i>Shigimaga V. A., Megel Yu. Ye., Kovalenko S. V., Kovalenko S. M.</i>	
MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTROPORATION PARAMETERS OF THE MEMBRANE OF A BIOLOGICAL CELL IN A VARIED INTENSITY PULSED ELECTRIC FIELD.....	57
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	66
<i>Boyko N.</i>	
ADVANCED TECHNOLOGIES OF BIG DATA RESEARCH IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS.....	66
<i>Kondratenko N. R., Snihur O. O.</i>	
INTERVAL FUZZY CLUSTER ANALYSIS FOR ARTESIAN WEL L STATE MONITORING.....	77
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Lovkin V., Blagodariov O., Zaiko T.</i>	
THE SYSTEM OF CRITERIA FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN PATTERN RECOGNITION.....	85
<i>Peleshchak R. M., Lytvyn V. V., Peleshchak I. R.</i>	
THE DYNAMICS OF NONLINEAR OCILLATOR NEURON BY THE ACTION OF EXTERNAL NON-STATIONARY SIGNAL.....	97
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	106
<i>Babakov R. M.</i>	
RESEARCH OF HARDWARE EXPENSES IN MICROPROGRAM FINAL-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS.....	106
<i>Dadenkov S. A., Dadenkov D. A.</i>	
ROUND-ROBIN PREEMPTIVE SCHEDULER MODEL IN DISTRIBUTED REAL-TIME SYSTEM.....	116
<i>Davydov M. V., Lozynska O. V., Pasichnyk V. V.</i>	
EFFECTIVE ALGORITHM FOR PARSING SENTENCES USING SEMANTICALLY ATTRIBUTED WEIGHTED AFFIX CONTEXT FREE.....	124
<i>Kozulia T. V., Bilova M. O.</i>	
INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM ASSESSMENT METHODS OF COMPLEX OBJECTS.....	131
<i>Korobchynskiy M. V., Chyrun L. B., Vysotska V. A., Kondratiev E. O.</i>	
OF CONTENT FORMATION AND ANALYSIS FEATURES IN ONLINE NEWSPAPER OF MUSIC NEWS.....	139
<i>Rachok R. V., Borovik O. V., Borovik L. V.</i>	
STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF OPTICAL-ELECTRONIC OBSERVATION.....	151
<i>Tabunshchik G. V., Kapliienko T. I., Shytikova O. V.</i>	
VERIFICATION MODEL FOR THE SYSTEMS WITH LIMITED RESOURCES.....	162
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	168
<i>Bobyry M. V., Milostnaya N. A.</i>	
A SOFT FUZZY ALGORITHM OF THE MOBILE ROBOT CONTROL.....	168
<i>Husieva Yu. Yu., Martynenko O. S., Kadykova I. M., Chumachenko I. V.</i>	
METRICS OF MANAGEMENT AND CONTROL REQUIREMENTS PROCESSES IN PROJECTS.....	179
<i>Zimchuk I. V.</i>	
SYNTHESIS THE DIGITAL REGULATORS OF LOWERED ORDER FOR THE RESERVED SYSTEMS MANAGEMENT BY CONTINUOUS OBJECTS.....	187
<i>Kachan Y. G., Yerofieieva A. A.</i>	
THE INNOVATIVE CONTROL OF THE HEATING UP PROCESS OF THE METAL IN THE FURNACE USING SPATIAL ELECTRIC FIELD.....	193
<i>Timchenko V. L., Lebedev D. O.</i>	
ALGORITHMIC PROCEDURES OF SYNTHESIS OF VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS FOR MARINE VEHICLES CONTROL.....	200

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.39

Абрамович А. А.¹, Каширский И. С.², Поддубный В. А.³

¹Аспирант кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

²Канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

³Канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

МЕТОД ОБРАБОТКИ ОТРАЖЕННЫХ СИГНАЛОВ ВИХРЕТОКОВЫХ ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Актуальность. Рассмотрена задача обработки сигналов вихретоковых преобразователей (ВТП), отраженных от металлических неоднородностей, находящихся в диэлектрической среде (грунте). Объектом исследования являлся метод обработки отраженных сигналов.

Цель работы – создание метода, удобного для цифровой обработки сигналов, позволяющего расширить возможности ВТП путем анализа типа металла в подмножестве немагнитных (медь, золото, серебро и других) и магнитных (сталь, никель) материалов.

Метод. Предложен метод обработки отраженных от металлических неоднородностей сигналов вихретоковых преобразователей во временной области, который позволяет идентифицировать тип металла в пределах подмножества немагнитных и магнитных материалов, что позволяет повысить эффективность обнаружения объектов, выполненных из цветных и драгоценных металлов, скрытых в диэлектрической среде.

Временной сигнал, полученный ВТП, оцифровывается и превращается программным обеспечением в графический образ, в котором непрерывное изменение сигнала заменяется характерными линиями (графическим образом). Графические образы имеют большую информационную насыщенность, потому что их характерные линии отличаются координатами, высотой и полярностью. Фиксируются также точки перехода сигнала через нуль.

Такая форма сигнала наглядна и удобна для сравнения сигналов.

Результаты. Предложенный метод реализован программно и экспериментально подтверждена возможность его использования для решения задачи идентификации типа металла в рамках подмножества немагнитных и магнитных материалов.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного метода обработки сигналов вихретоковых преобразователей и программного обеспечения его реализующего. Они позволяют рекомендовать метод для решения задач идентификации металла, из которого изготовлен объект, находящийся в диэлектрической среде (грунте). Перспективы дальнейших исследований заключаются в адаптации математического и программного обеспечения для идентификации сигналов серийных вихретоковых преобразователей, что позволит расширить их функциональные возможности.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, металлические неоднородности, идентификация металлов.

НОМЕНКЛАТУРА

x – дискретные отсчеты;
 m – количество отсчетов у выборке;
 n – степень полинома;
 A – матрица коэффициентов;
 F_0 – вектор численных значений полинома в дискретных точках;
 Z – вектор неизвестных коэффициентов полинома;
 A^T – транспонированная матрица;
 $P(x)$ – полином аппроксимации участка из дискретных отсчетов;

$a_1 \dots a_{n-1}$ – коэффициенты полинома аппроксимации;
 $[1 \ x_{1,1} \ x_{1,1}^2 \dots x_{1,1}^n]$ – дискретные отсчеты первого участка первой точки с возрастанием степени от 0 до n ;
 $[1 \ x_{1,m} \ x_{1,m}^2 \dots x_{1,m}^n]$ – дискретные отсчеты первого участка m -й точки с возрастанием степени от 0 до n ;
 $a_1^I \dots a_{n-1}^{II}$ – коэффициенты полинома аппроксимации для первого участка;
 $a_1^I \dots a_{n-1}^{II}$ – коэффициенты полинома аппроксимации для второго участка;
 Z_I – вектор неизвестных коэффициентов полинома для первого участка;

Z_{II} – вектор неизвестных коэффициентов полинома для второго участка;

$P_I(x)$ – полином аппроксимации первого участка из дискретных отсчетов;

$P_{II}(x)$ – полином аппроксимации второго участка из дискретных отсчетов;

$\frac{dP_I(x)}{dx}$ – производная полинома аппроксимации первого участка из дискретных отсчетов;

$\frac{dP_{II}(x)}{dx}$ – производная полинома аппроксимации второго участка из дискретных отсчетов.

ВВЕДЕНИЕ

Современные радиолокационные системы [1] позволяют обнаруживать цель (объект), определять ее координаты в пространстве и сопровождать ее, если она движется. Кроме того, они позволяют определить тип цели, т.е. идентифицировать ее по заранее заложенным в базе данных образцам. Большинство радиолокационных станций работают в импульсном режиме, используя наносекундные зондирующие импульсы. В этом случае информации о типе цели лежит в форме отраженного от нее сигнала. Известные типы РЛС определяют спектр отраженного от цели сигнала, анализируют его, выделяют из него с помощью фильтрующих систем определенные частоты спектра и сравнивают их с информацией, имеющейся в базе данных. Это позволяет с некоторой вероятностью определить тип цели.

Однако такой метод не всегда применим. Например, при работе вихретоковых импульсных преобразователей

[2], спектр отраженного сигнала которых, не имеет четко выраженных частот, что не позволяет использовать известные методы радиолокации для идентификации металлических целей, находящихся в диэлектрической среде (грунте).

Ранее одним из авторов был предложен метод определения металлических предметов в диэлектрической среде импульсным вихретоковым методом с помощью спектрального анализа. Однако такой метод достаточно неудобен в работе и не позволяет идентифицировать два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг с другом (на расстоянии меньшем половины диаметра излучающей антенны).

Объектом исследования является метод обработки отраженных сигналов, лишенный указанных недостатков.

Предметом исследования являлись форма сигнала ВТП и метод сравнения параметров этого сигнала.

Промышленные металлоискатели, построенные на вихретоковом методе обнаружения [1], решают задачу дихотомической идентификации исследуемых объектов, которая состоит в разбиении их множества на два подмножества: цветных (немагнитных) и черных (магнитных). Однако важной остается задача идентификации металлов внутри подмножества.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Отраженные от целей (объектов) сигналы вихретокового преобразователя, полученные в результате взаимодействия зондирующего импульса с объектами [3], выполненными из разных металлов (например, меди, стали) показаны на рис. 1. Объекты имеют одинаковые размеры и геометрическую форму. Сигналы нормированы по амплитуде и длительности.

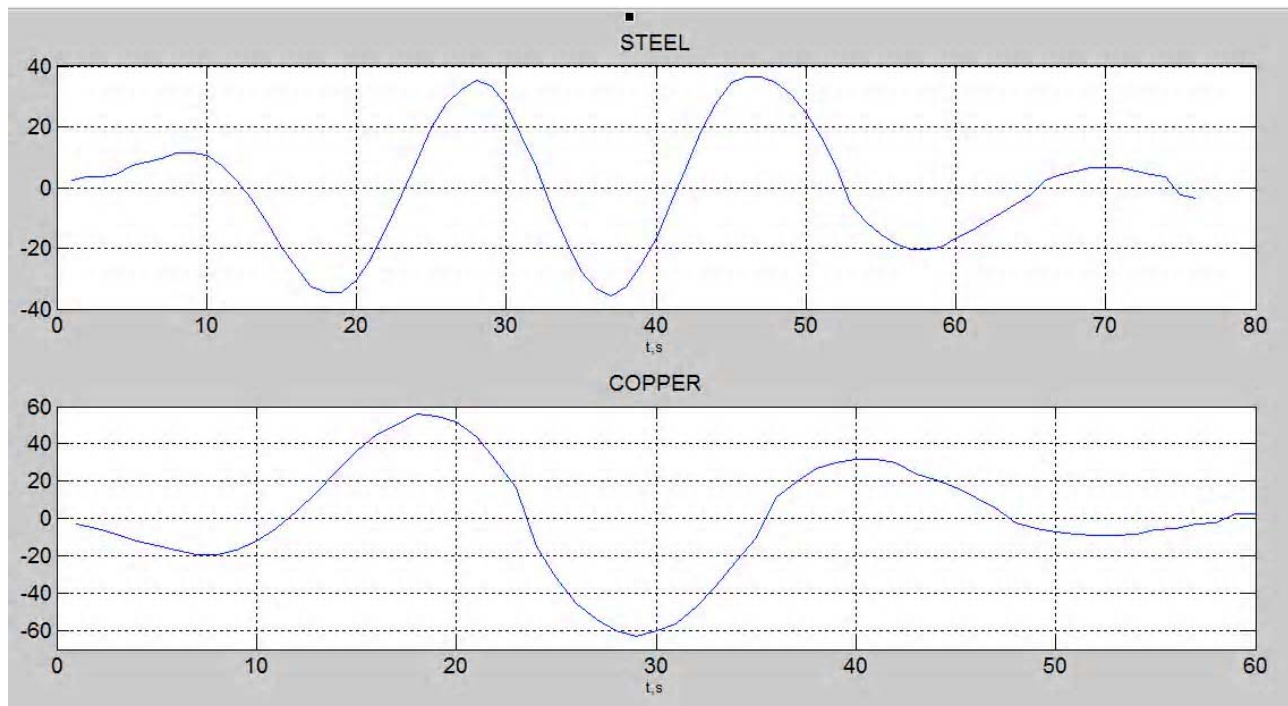


Рисунок 1 – Форма сигналов вихретокового преобразователя для целей, выполненных из стали и меди

Как видно на рис. 1, временные сигналы, полученные от разных целей, имеют различную форму и количество экстремумов.

В этих сигналах надо выделить характерные свойства, которые можно объективно сравнивать. Для сравнения наилучшей будет аналогия со спектрометром, выделяющим спектральные линии различных металлов. В данной задаче спектральные линии должны быть заменены характерными линиями, определяющими положение экстремумов сигнала и точек перехода сигнала через нулевой уровень. Тогда временной сигнал преобразуется в другую графическую форму, удобную для сравнения.

Преобразование должно удовлетворять следующим критериям:

- реальное время работы. Быстродействие техники и выполнение программы должно согласовываться с физическими возможностями оператора и не создавать задержек;

- высокая надежность программного обеспечения. Допускаются сбои в работе техники, но в работе программного обеспечения они исключаются. Исключаются также аварийные остановки, перезагрузка, закликивание и неоднозначные ответы;

- соответствие классу прибора. Технические устройства, реализующие работу программного обеспечения, должны иметь возможность интеграции в реальный прибор и быть соизмеримы с его размерами и весом.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время существует большое количество ВТП, работающих на разных принципах. На современном рынке это металлоискатели зарубежных фирм Minelab, Fisher, Garret [5]. Все их множество можно разделить на два класса: тональные и импульсные. К тональным относятся приборы типа VLF (Very Low Frequency (VLF) detectors), которые для индикации наличия объекта используют звуковую (разносную) частоту между опорным и перестраиваемым под воздействием выявляемого объекта генераторами. Они позволяют оператору на слух по изменению тона сигнала определить наличие объекта. Квалифицированный оператор может отличить черный металл от цветного.

Способ выделения небольшой по величине разностной частоты, который лежит в основе работы тональных ВТП, ограничивает технические возможности приборов из-за взаимной синхронизации генераторов, работающих на близких частотах. Как показывает практика, если не применять специальные методы развязки генераторов, то получить разносную частоту ниже 10 кГц достаточно проблематично, а это ограничивает чувствительность металлоискателя.

Избирательность по типу металла проявляется слабо. Кроме того, по сдвигу разностной частоты определить фазу отраженного сигнала практически невозможно. Поэтому тоновые ВТП могут осуществлять только дихотомическую оценку объекта. Т.е. определить из черного или цветного он металла. Селективность у тональных металлоискателей отсутствует.

Преобразователи типа PI (pulse induction) работают с импульсными сигналами [1] и по своей сути являются низкочастотными радиолокационными станциями ближ-

него обнаружения [1, 3, 4]. Информация об исследуемом объекте лежит в амплитуде и форме отраженного от объекта сигнала. Обычно один из этих параметров является информативным, а два других мешающими.

Для определения и анализа информативного параметра в современных металлоискателях используют амплитудный, фазовый или частотный методы обработки сигнала.

Амплитудный метод [6] широко используется для анализа сигнала в случае, когда информативным фактором есть амплитуда сигнала, а мешающими фаза или частота принятого сигнала. Для этого в состав ВТП вводят амплитудный детектор, который определяет уровень входного сигнала. Он сравнивается с пороговым уровнем, который задает чувствительность металлоискателя. И при достижении порогового значения входного сигнала подается информация на индикаторное устройство о наличии металлического объекта. При необходимости селективными устройствами можно определить, из какого металла изготовлен объект (черного или цветного). В этом случае изменение фазы или частоты сигнала на результат измерения не влияют. Большинство современных металлоискателей как раз и используют идентификацию наличия металла по пороговому уровню, что позволяет выполнять только дихотомический анализ.

Фазовый и частотный методы применяются при существенном влиянии мешающего фактора на амплитуду сигнала. В структурной схеме ВТП, который реализует указанные методы, вместо амплитудного детектора используют фазовый или частотный. Эти два метода используются, как правило, в приборах неразрушающего контроля дефектов металлических объектов.

Амплитудный подход к определению информативного параметра приводит к большому количеству ложных срабатываний при поисковых работах на участках с большим количеством мусора (металлическая стружка, гвозди, пробки и т.д.). Для устранения влияния мусора искусственно снижают чувствительность прибора, а это приводит к потере информации о металлических предметах малых размеров. Поэтому металлоискатели, построенные на вихретоковом методе обнаружения, не позволяют определить тип металла, если два предмета из разных металлов лежат в непосредственной близости один от другого. Минимальное расстояние, на котором можно различить предметы, равно половине диаметра приемной антенны.

Ранее одним из авторов [10] был предложен метод определения металлических предметов в диэлектрической среде импульсным вихретоковым методом с помощью спектрального анализа сигнала, отраженного от исследуемого объекта. Применение спектрального анализа позволяет легко произвести дихотомическую классификацию металла, а также при наличии высокоточных спектроанализаторов (погрешность измерения не хуже 0,5...1%), различение материалов в подгруппе цветных. Это позволяет отличить, например, медь от золота или серебра. Однако такой метод достаточно неудобен в работе и не позволяет идентифицировать два объекта, которые находятся в непосредственной близости друг с другом (на расстоянии меньшем половины диаметра излучающей антенны).

Таким образом, возникает необходимость в разработке новых методов обработки отраженных сигналов в вихреговом методе обнаружения металлов, позволяющих анализировать тип металла в подгруппах цветных или черных металлов.

В работе предлагается метод анализа сигналов вихревой системы обнаружения объектов по временному отклику (метод графических образов). При использовании предложенного метода с помощью соответствующего программного обеспечения отраженный от объекта сигнал превращается в цифровые коды и графические образы, что позволяет их легко сравнивать, с имеющимися в базе данных ранее набранными эталонами, что позволяет идентифицировать объект, в случае медленного изменения спектра сигнала, который не имеет выраженных несущих.

Целью данной работы является создание метода обработки сигнала ВТП, который удобен для накопления базы данных известных материалов и сравнения сигнала от неизвестного объекта с имеющимися в базе эталонов, что позволяет расширить функциональные возможности вихревого метода. Метод позволяет определить из подмножеств немагнитных (медь, золото, серебро и других) и магнитных (сталь, никель) материалов тип металла, из которого выполнен объект.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Временные сигналы, отраженные от объектов, изготовленных из разных материалов (рис. 1), имеют вид осциллирующих кривых с различным периодом и количеством экстремумов. Они в разных точках переходят через ноль.

Сложность рассматриваемых временных сигналов не позволяет использовать для их аппроксимации одну группу функций и требует кусочной аппроксимации отдельных временных участков сигнала. Использование стандартных методов кусочно-линейной, кусочно-квадратичной, кусочно-кубической аппроксимаций затруднительно ввиду больших массивов обработки информации. Наименьший объем массивов имеет кусочно-полиномиальная аппроксимация.

Степень полинома аппроксимации и количество участков полной аппроксимации изменяется в зависимости от сложности сигнала и необходимой точности аппроксимации. На каждом участке задаем количество дискретных точек $x_{1,1}, x_{1,2}, \dots, x_{1,m}$, полученных в эксперименте, и записываем полином аппроксимации участка [4, 5]

$$P(x) = a_1 + a_2x + a_3x^2 + \dots + a_{n-1}x^n. \quad (1)$$

Расчеты полинома (1) в дискретных точках представим в виде прямоугольной матрицы

$$A = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,1}^2 & \dots & x_{1,1}^n \\ 1 & x_{1,2} & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,2}^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1,m} & x_{1,m}^2 & \dots & x_{1,m}^n \end{bmatrix}. \quad (2)$$

В работе поставлена вычислительная задача кусочно-полиномиальной аппроксимации заданного сигнала при минимальном количестве участков аппроксимации или максимальном значении m на каждом участке. Наиболее простая реализация получается в случае $n = m - 1$. Для расчета коэффициентов полинома (1) необходимо решить систему линейных уравнений

$$\begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{1,1}^2 & \dots & x_{1,1}^{m-1} \\ 1 & x_{1,2} & x_{1,2}^2 & \dots & x_{1,2}^{m-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{1,m} & x_{1,m}^2 & \dots & x_{1,m}^{m-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(x_{1,1}) \\ P(x_{1,2}) \\ \vdots \\ P(x_{1,m}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Однако для значений $m \geq 25$ система линейных уравнений (3) оказывается плохо обусловленной (некорректной) и не может быть решена известными методами [6, 7].

В работе применен другой способ решения поставленной задачи, заключающийся в уменьшении степени аппроксимирующего полинома, вследствие чего система линейных уравнений оказывается несовместной, и в матрице (2) количество строк значительно превышает количества столбцов ($m \gg n$). Введем вектор F_0 численных значений полинома (1) в дискретных точках и вектор Z неизвестных коэффициентов полинома (1)

$$F_0 = \begin{bmatrix} P(x_{1,1}) \\ P(x_{1,2}) \\ \vdots \\ P(x_{1,m}) \end{bmatrix}; Z = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тогда из выражений (1) и (2) следует система линейных уравнений в матричной форме

$$A \cdot Z = F_0. \quad (5)$$

Система уравнений (5) является несовместной [7] и для ее решения применяем матричный алгоритм использования псевдоматриц

$$A^T \cdot A \cdot Z = A^T \cdot F_0. \quad (6)$$

где A^T – транспонированная матрица (2). Матричное уравнение (6) имеет решение

$$Z = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot F_0 \quad (7)$$

Для любых дискретных точек матрица $A^T \cdot A$ остается положительно определенной, что обеспечивает единственность решения (6) и минимум квадратичной ошибки аппроксимации. Однако это не гарантирует точности решения. Поэтому для полной надежности решение (6) подставляется в выражение (5), и в случае приемлемой точности уравнений (5), задача считается решенной. Для случаев существенных ошибок в уравнениях (5) результаты (6) ликвидируются, уменьшается размер участка аппроксимации и расчет по формулам (5)–(7) повторяется.

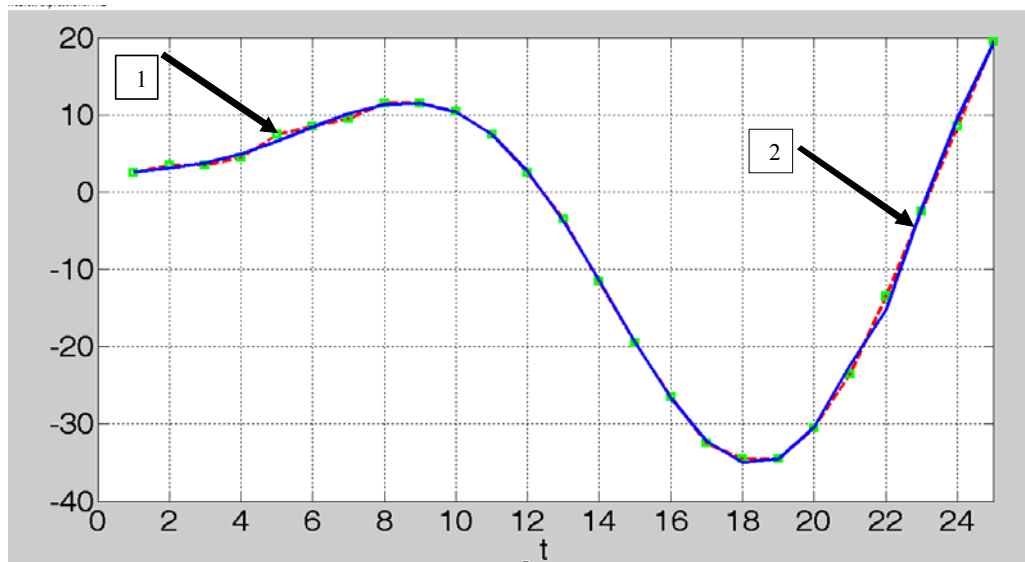


Рисунок 2 – Сопоставление сигнала и функции аппроксимации:
1 – аппроксимованная кривая, 2 – дискретные значения временного сигнала

На рис. 2 (кривая 1) представлены результаты решения задачи аппроксимации сигнала. На первом участке для $m = 25$; $n = 6$ имеем хорошее совпадение заданных и вычисленных дискретных значений сигнала. Заданные дискретные значения временного сигнала соединены на рисунке штриховыми линиями (кривая 1), а вычисленные значения изображены сплошными линиями (кривая 2).

После успешного расчета на всех участках получаем векторы решений

$$Z_I = \begin{bmatrix} a_1^I \\ a_2^I \\ \vdots \\ a_{n1-1}^I \end{bmatrix}; \quad Z_{II} = \begin{bmatrix} a_1^{II} \\ a_2^{II} \\ \vdots \\ a_{n2-1}^{II} \end{bmatrix}; \dots \quad (8)$$

Расчет по всем векторам $Z_I, Z_{II}, \dots$ обеспечивает совпадение полной аппроксимирующей кривой с заданной кривой временного сигнала.

На следующем этапе анализируются аппроксимирующие полиномы участков

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + \dots + a_{n1-1}^I x^{n1-1}; \\ P_{II}(x) &= a_1^{II} + a_2^{II} x + a_3^{II} x^2 + \dots + a_{n2-1}^{II} x^{n2-1}. \end{aligned} \quad (9)$$

Каждый полином пересекает вещественную ось в нескольких точках (корни, нули) и имеет несколько экстремумов (минимумов, максимумов), и все эти характерные точки необходимо преобразовать в характерные линии.

Для поиска корней полиномов (9) существуют стандартные программы. Однако эксперимент показывает, что полиномы на отдельных участках оказываются сложным для стандартных программ.

Для примера на первом участке определен полином степени $n = 6$, аппроксимирующий дискретные значения на рис. 2

$$\begin{aligned} P_I(x) &= a_1^I + a_2^I x + a_3^I x^2 + a_4^I x^3 + a_5^I x^4 + a_6^I x^5 + a_7^I x^6 = \\ &= -2,736789505196347e-5 + 1,824844329574749e-3 \cdot x - \\ &- 0,04135468883812621 \cdot x^2 + 0,3657651088735747 \cdot x^3 - \\ &- 1,161814528086325 \cdot x^4 + 1,709377375918848 \cdot x^5 + \\ &+ 0,903306791777141 \cdot x^6. \end{aligned}$$

Как видно на рис. 2, кривая переходит через нулевой уровень в точках (вещественные корни полинома)

$$\overline{x_1} = 12,3; \quad \overline{x_2} = 23,2.$$

В среде Matlab найдены корни полинома:

$$\begin{aligned} \overline{x_1} &= -1,427660473208311; \quad \overline{x_2} = 0,0368029116621054; \\ \overline{x_3} &= 0,0431838328398604; \quad \overline{x_4} = 0,08105909387906636; \\ \overline{x_{5,6}} &= 0,1842527080086087 \pm 0,21031447719915121 i \end{aligned}$$

Кроме ошибочных результатов, проведенные вычисления определяют еще одну важную проблему – комплексно-сопряженные корни полинома, которые для вещественного временного сигнала не содержат полезной информации и засоряют информационное поле. Для устранения этих недостатков предусмотрено сканирование дискретных точек участка и выбор малых интервалов, в которых временной сигнал меняет полярность. Выделенные интервалы сокращаются методом секущих до определения корней полинома с требуемой точностью.

Для определения координат экстремумов отдельных участков рассматриваются дифференцированные аналитические полиномы (9)

$$\begin{aligned}\frac{dP_I(x)}{dx} &= a_2^I + 2a_3^I x + \dots + (n1)a_{n1}^I - 2x^{n1-1}, \\ \frac{dP_{II}(x)}{dx} &= a_2^{II} + 2a_3^{II} x + \dots + (n2)a_{n2}^{II} - 2x^{n2-1}. \quad (10) \\ &\vdots\end{aligned}$$

Для каждого участка вновь решается задача определения корней полиномов

$$\frac{dP_I(x)}{dx} = 0; \frac{dP_{II}(x)}{dx} = 0; \dots \quad (11)$$

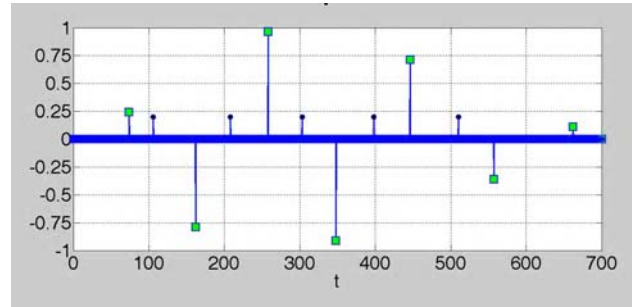
Теперь корни полиномов (10) определяют расположение экстремумов на участке, а временной сигнал – их высоту.

Степени полиномов (10) меньше степени полиномов (9), вследствие чего на стыке участков появляются «мертвые зоны», в которые могут попадать экстремумы. В этом случае при выборе участков надо предусмотреть их перекрытие.

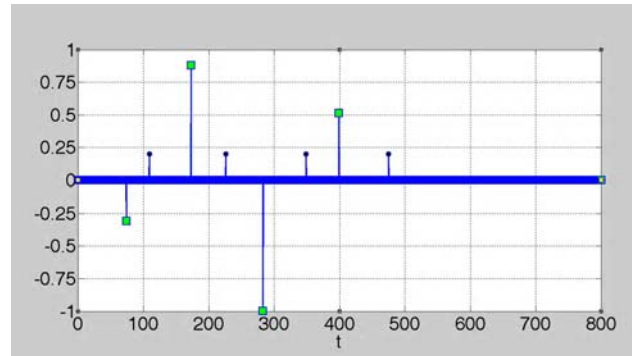
Анализируя этапы работы алгоритма, важно отметить, что численное решение на каждом участке единственное и надежно контролируется по точности. Заданный временной сигнал, полученный системой, преобразуется программой в графический образ, в котором непрерывное изменение сигнала заменяется характерными линиями. Графические образы имеют большую информационную насыщенность, т.к. их характерные линии различаются координатами, высотой и полярностью. Кроме того, образ дополняется точками перехода сигнала через нулевой уровень.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Графические образы имеют большую информационную насыщенность, т.к. их характерные линии различаются координатами, высотой и полярностью. Кроме того, образ дополняется точками перехода сигнала через нулевой уровень. Соответствующие временным сигналам (рис. 1) графические образы представлены на рис. 3.



а



б

Рисунок 3 – Форма сигналов вихревого преобразователя для объектов выполненных из стали и меди (а – сталь, б – медь)

Временные сигналы, показанные на рис. 1, действительно различны, однако их различие сложно фиксировать визуально, тогда как различие их графических образов является очевидным.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных экспериментов получены графические образы ряда объектов, которые изготовлены из различных металлов. Параметры графических образов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Параметры графических образов исследованных металлов

№ экстремума	1	2	3	4	5	6	7	К, % *
Сталь								
Амплитуда	0,3055	-0,9471	0,9461	-0,9007	0,9826	-0,5326	0,1844	3,7
Координаты экстремумов	8	18	28	36	46	57	69	
Координаты нулей	12	23	32	41	52	65		
Медь								
Амплитуда	-0,2551	0,8720	-0,9963	0,4949	-0,1403	–	–	43
Координаты экстремумов	7	18	29	41	52	–	–	
Координаты нулей	11	23	36	49	56	–	–	
Серебро								
Амплитуда	-0,2462	0,8406	-0,9917	0,5086	-0,1494	–	–	39,49
Координаты экстремумов	7	17	28	40	50	–	–	
Координаты нулей	10	22	35	47	57	–	–	
Титан								
Амплитуда	0,5026	-0,9139	1,0000	-0,5525	–	–	–	50
Координаты экстремумов	5	14	26	35	–	–	–	
Координаты нулей	8	20	31	41	–	–	–	
Алюминий								
Амплитуда	-0,3073	0,8535	-1,0000	0,4309	-0,1411	0,0240	-0,042	49,5
Координаты экстремумов	7	18	27	38	50	57	60	
Координаты нулей	11	22	34	46	56	58	–	

* – К процентное различие между двумя наибольшими позитивными максимумами

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного метода графических образов и реализующих их программных средств.

Как видно табл. 1, объекты, изготовленные из разных металлов, можно оценить по процентной разнице между двумя наибольшими позитивными максимумами графического образа и временным расположением максимумов и нулей графического образа, что позволяет в конечном счете идентифицировать объекты по типу металла, из которого они изготовлены [8, 9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложена и экспериментально подтверждена методика обработки сигналов вихретокового преобразователя ближней локации с помощью метода графических образов и показана возможность идентификация объектов (целей) по типу металла, из которого они выполнены.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках инициативной научно-исследовательской темы «Исследование возможности применения кепстрального анализа сигналов металлоискателя с целью дихотомического определения типа металла» (номер гос. регистрации 0216U0007428) кафедры радиотехнических устройств и систем радиотехнического факультета Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Научный руководитель доцент, канд.техн.наук. Мрачковский О. Д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Г. Н. Увеличение предельной глубины обнаружения локальных ферромагнитных объектов в толще проводящих ук-рывающих сред методом дистанционного параметрического подмагничивания / Г. Н. Щербаков // Радиотехника. – 2005. – № 12. – С. 42–45.
2. Правда В. І. Георади / В. І. Правда, О. Д. Мрачковський, А. О. Абрамович // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія – Радіоелектроніка та телекомунікації. – 2015. – № 818. – С. 49–54.
3. Промышленная группа Лаборант. Анализаторы металлов и руд [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laborant.net/catalog> (дата звернення 21.04.2017) – Назва з екрана.
4. Абрамович А. О. Радиолокационно-вихретоковый георадар / А. О. Абрамович // Вестник НТТУ «КПИ». Сер. Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2014. – Вып. 57. – С. 77–82.
5. Березин И. С. Методы вычислений / И. С. Березин, Н. П. Жидков. – М.: Наука, 1966. – т.1, 632 с.
6. Кунц К. С. Численный анализ / К. С. Кунц. – М.: Техника, 1964. – 389 с.
7. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука, 1967. – 575 с.
8. CRS Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition / Ed. D. R. Lide. – Taylor & Francis : CRC Press, 2007. – P. 9.77.
9. Сайфуллин Р. С. Новая таблица Менделеева / Р. С. Сайфуллин, А. Р. Сайфуллин // Химия и жизнь. – 2003. – № 12. – С. 14–17.
10. Абрамович А. О. Дихотомічне розрізнення металу на чорний-кольоровий за допомогою спектрального аналізу / А. О. Абрамович, О. Д. Мрачковський, В. Ю. Фурманчук // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер: Технічні науки. – 2017. – Вип. №1(79). – С. 48–51.

Статья поступила в редакцию 21.06.2017.

После доработки 30.08.2017.

Абрамович А. О.¹, Каширский И. С.², Піддубний В. О.³

¹Аспірант кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

³Канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних пристроїв та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МЕТОД ОБРОБКИ ВІДБИТИХ СИГНАЛІВ ВИХРОСТРУМОВИХ ІМПУЛЬСНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Актуальність. Розглянуто задачу обробки сигналів вихрострумових перетворювачів (ВСП), відбитих від металевих неоднорідностей, що знаходяться в діелектричному середовищі (грунті). Об'єктом дослідження був метод обробки відбитих сигналів.

Мета роботи – створення зручного методу для цифрової обробки сигналів, що дозволяє розширити можливості ВСП шляхом аналізу типу металу в підмножині немагнітних (мідь, золото, срібло і інших) і магнітних (сталь, нікель) матеріалів.

Метод. Запропоновано метод обробки відбитих від металевих неоднорідностей сигналів вихрострумових перетворювачів в часовій області, який дозволяє ідентифікувати тип металу в межах підмножини немагнітних і магнітних матеріалів, що дозволяє підвищити ефективність виявлення об'єктів, виконаних з кольорових і дорогоцінних металів, прихованих в діелектричному середовищі.

Часовий сигнал, отриманий ВСП, оцифровується і перетворюється програмним забезпеченням в графічний образ, в якому безперервна зміна сигналу замінюється характерними лініями (графічним чином). Графічні образи мають велику інформаційну насиченість, тому що їх характерні лінії відрізняються координатами, висотою і полярністю. Фіксуються також точки переходу сигналу через нульовий рівень.

Така форма сигналу наочна і зручна для порівняння сигналів.

Результати. Запропонований метод реалізований програмно і експериментально підтверджена можливість його використання для розв'язання задачі ідентифікації типу металу в рамках підмножини немагнітних і магнітних матеріалів.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження підтвердили працездатність запропонованого методу обробки сигналів вихрострумових перетворювачів і програмного забезпечення, що його реалізує. Вони дозволяють рекомендувати метод для вирішення завдань ідентифікації металу, з якого виготовлений об'єкт, що знаходиться в діелектричному середовищі (грунті). Перспективи подальших досліджень полягають в адаптації математичного і програмного забезпечення для ідентифікації сигналів серійних вихрострумових перетворювачів, що дозволить розширити їх функціональні можливості.

Ключові слова: вихрострумовий перетворювач, металеві неоднорідності, ідентифікація металів.

Abramovych A. A.¹, Kashirsky I. S.², Poddubny V. A.³

¹Postgraduate Student of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev, Ukraine

²PhD., Associate Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev, Ukraine

³PhD., Associate Professor of the Department of Radio Engineering Devices and Systems of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky", Kiev, Ukraine

METHOD OF PROCESSING THE REFLECTED SIGNALS FROM PULSED EDDY CURRENT CONVERTERS

Context. The problem of processing signals of eddy current converters (ECC) reflected from metal inhomogeneities in a dielectric medium (soil) is considered. The object of the study was the method of processing reflected signals.

Objective. The purpose of the work is to create a method of digital signal processing that is convenient for digital processing, which allows to expand the capabilities of an ECC by analyzing the type of metal in a subset of nonmagnetic (copper, gold, silver, etc.) and magnetic (steel, nickel) materials.

Method. The method of processing reflected from metal inhomogeneities signals of eddy current converters in the time domain is proposed, which allows to identify the type of metal within a subset of non-magnetic and magnetic materials, which makes it possible to increase the detection efficiency of objects made of non-ferrous and precious metals hidden in a dielectric medium.

The time signal obtained by the ECC is digitized and converted into a graphic image by the software, in which the continuous signal change is replaced by the characteristic lines (graphically). Graphic images have a high information saturation, because their characteristic lines differ in coordinates, height and polarity. The crossing points of the signal through zero are also fixed.

This form of signal is clear and convenient for comparing signals.

Results. The proposed method is implemented programmatically and experimentally confirmed the possibility of its use for solving the problem of identifying the type of metal within the subset of non-magnetic and magnetic materials.

Conclusions. The conducted experimental researches have confirmed the efficiency of the proposed method for processing signals of eddy current converters and the software of its implementer. They allow us to recommend a method for solving the problems of identifying the metal from which the object is made, which is located in a dielectric medium (soil). Prospects for further research are the adaptation of mathematical and software to identify the signals of the serial eddy current transducers, which will expand their functionality.

Keywords: eddy current transducer, metal inhomogeneities, metal identification.

REFERENCES

1. Scherbakov G. N. Uvelichenie predelnoy glubiny obnaruzheniya lokalnykh ferromagnitnykh obektov v tolsche provodyaschikh ukryivayuschiy sred metodom distantsionnogo parametricheskogo podmagnichivaniya, *Radiotekhnika*, 2005, No. 12, pp. 42–45.
2. Pravda V. I., Mrachkovskiy O. D., Abramovych A. O. Georadary, *Visnik natsionalnogo universitetu «Lvivska politehnika». Seriya Radioelektronika ta telekomunikatsiyi*, 2015, No. 818, pp. 49–54.
3. Promyishlennaya gruppa Laborant. Analizatoryi metallov i rud [Elektronniy resurs]. Rezhim dostupu: <http://www.laborant.net/catalog> (data zvernennya 21.04.2017), Nazva z ekrana.
4. Abramovych A.O. Radlolokatsiyno-vihrostrumoviy radar, *Visnik NTU «KPI» . Ser. Radlotehnika. Radioaparotobuduvannya*, 2014, Vyp. 57, pp. 77–82.
5. Berezin I. S., Zhidkov N. P. Metodyi vychisleniy, t.1. Moscow, Nauka, 1966, 632p.
6. Kunts K. S. Chislennyiy analiz. Moscow, Tekhnika, 1964, 389 p.
7. Gantmaher F. R. Teoriya matrits. Moscow, Nauka, 1967, 575 p.
8. CRS Handbook of Chemistry and Physics, 87th Edition / Ed. D. R. Lide. Taylor & Francis, CRC Press, 2007, P. 9.77.
9. Sayfullin R. S., Sayfullin A. R. Novaya tablitsa Mendeleeva, *Himiya i zhizn*, 2003, No. 12, pp. 14–17.
10. Abramovych A. O., Mrachkovskiy O. D., Furmanchuk V. Yu (). Dykhotomichne rozrinnennya metalu na chornyy-kol'orovy za dopomohoyu spektral'noho analizu, *Visnyk Zhytomys'koho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Ser: Tekhnichni nauky*, 2017, No. 1(79), pp. 48–51.

ПРИНЦИПИ РОЗРАХУНКУ ЕЛЕКТРИЧНОГО ІМПЕДАНСУ КОЛИВАЛЬНОГО П'ЄЗОКЕРАМІЧНОГО ДИСКА В ОБЛАСТІ СЕРЕДНІХ ЧАСТОТ

Актуальність. Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в силових і інформаційних системах пояснюється, перш за все, їх високою надійністю. Кінцевою метою математичного моделювання фізичного стану коливальних п'єзокерамічних елементів є якісний і кількісний опис характеристик і параметрів існуючих в них електричних та еластичних полів.

Мета роботи – розрахунок електричного імпедансу коливального п'єзоелектричного диска в області середніх частот.

Метод. При досить загальних початкових припущеннях отримана математична характеристика електричного імпедансу п'єзокерамічного тонкого диска з суцільним електродуванням торцевих поверхонь, який коливається у вакуумі. Показано, що електричний імпеданс визначається усередненими значеннями компонентів вектора зміщення матеріальних частинок п'єзокераміки.

Результати. Побудовано вираз для розрахунку електричного імпедансу п'єзокерамічного диска, який коливається в області середніх частот, де вектор зсуву матеріальних частинок диска практично повністю визначається радіальним компонентом.

Висновки. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'єзоелектроніки, обумовлених в технічному завданні. Це істотно скорочує час і вартість розробки нових функціональних елементів п'єзоелектроніки. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в побудові методики обчислення коефіцієнтів трансформації в п'єзоелектричному трансформаторі з декількома вторинними електричними колами.

Ключові слова: тонкий диск, п'єзокераміка, електричний імпеданс, вектор зміщення матеріальних частинок п'єзокераміки.

НОМЕНКЛАТУРА

U_0 – амплітудне значення електричного потенціалу;

ω – колова частота зміни знака потенціалу;

t – час;

ρ_0 – густина п'єзокераміки;

D_k – амплітудне значення k -го компонента вектора електричної індукції;

e_{knt} – компонент тензора п'єзоелектричних модулів;

ε_{nm} – амплітудне значення компонента тензора нескінченно малих деформацій;

χ_{kj}^{ε} – компонент тензора діелектричної проникності, який експериментально визначається в режимі сталості (рівності нулю) пружних деформацій (верхній символ ε);

E_j – амплітудне значення j -го компонента вектора напруженості електричного поля в об'ємі деформованого п'єзоелектрика;

σ_{ij} – амплітудне значення компонента тензора механічних напружень;

$c_{ijk\ell}^E$ – компонент тензора модулів пружності, який експериментально визначається в режимі сталості (рівності нулю) напруженості електричного поля (верхній символ E) в об'ємі п'єзоелектрика, який деформується.

ВСТУП

Актуальність застосування різних функціональних елементів п'єзоелектроніки в силових і інформаційних системах пояснюється, перш за все, їх високою надійністю. Одним із основних елементів таких систем є п'єзокерамічний трансформатор [1], який є альтернативою електромагнітним трансформаторам в тих сферах їх застосування, де необхідна висока надійність, стабільність, автономність, максимальна тривалість без-

відмовної роботи [2]. Об'єктами, де необхідне застосування таких наднадійних трансформаторів напруги є: автоматичні міжпланетні станції; автономні глибоководні плаваючі об'єкти; будь-які інші об'єкти, доступ до яких сильно утруднений, неможливий або надзвичайно небезпечний для людини (ядерні реактори; хімічно небезпечні об'єкти, станції в Антарктиді і Арктиці, підземні об'єкти, орбітальні супутники тощо).

П'єзоелектричний трансформатор має ряд переваг в порівнянні з електромагнітним, а саме [3, 4]: високу питому потужність; відсутність електромагнітних завад; високу ефективність; можливість мініатюризації; широкий частотний діапазон; вогнестійкість; проста технологія виготовлення. Надзвичайно широкі можливості п'єзотрансформаторів дозволяють використовувати їх при створенні різноманітних аналогових і дискретних пристроїв перетворення сигналів.

В даний час п'єзотрансформатори знаходять все більше застосування в областях, де потрібне отримання високих напруг. Практика застосування п'єзотрансформаторів показує, що вони досить ефективно працюють на першій або на другій моді коливальних в області частот від декількох десятків до сотень кілогерц [5].

П'єзотрансформатори знаходять широке застосування в сучасній світлотехнічній апаратурі і приладах. Вони дозволяють мінімізувати габарити пристроїв запалення і живлення різного класу газорозрядних ламп, створювати високоефективні високочастотні джерела живлення з ККД до 95%, що забезпечують підвищення довговічності ламп в 5–10 разів і світловіддачу більш ніж в 1,4 рази [6–8].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Використання п'єзотрансформаторів стримується складністю адекватного аналітичного опису їх моделей [9]. Кінцевою метою математичного моделювання фізич-

ного стану коливальних п'єзокерамічних елементів є якісний і кількісний опис характеристик і параметрів існуючих в них електричних і пружних полів.

Практична значимість адекватної реальному об'єкту математичної моделі очевидна. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'єзоелектроніки, обумовлених в технічному завданні. Це істотно скорочує час і вартість розробки нових функціональних елементів п'єзоелектроніки. Вартість зекономлених ресурсів становить комерційну ціну математичної моделі.

Таким чином, актуальність розробки фізично змістовних математичних моделей дискових п'єзоелектричних трансформаторів зберігається і в даний час.

Очевидно, що отримання змістовних і достовірних кількісних оцінок параметрів фізичного стану п'єзоелектричних (п'єзокерамічних) елементів не представляється можливим без достовірних даних про величини фізико-механічних констант матеріалів. Інтенсивне і широкомасштабне практичне застосування синтетичних п'єзоелектриків (п'єзокераміка) стало новим імпульсом, що стимулює розвиток експериментальних методів визначення фізико-механічних параметрів п'єзоактивних матеріалів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

При ближчому розгляді різноманіття методів можна розбити на три групи, а саме:

- метод резонансу-антирезонансу та його модифікації;
- метод кругових діаграм і його модифікації;
- ультразвукові методи.

Ультразвукові методи в своїй теоретичній основі спираються на формалізм власних чисел і власних векторів тензора Крістофеля [10] і припускають вимірювання швидкостей поширення плоских хвиль різної поляризації [11, 12]. Недоліками цього методу експериментальних досліджень є складність підготовки зразків і складність збудження плоских хвиль, які повинні поширюватися в суворо визначених в просторі кристалографічних осей напрямках.

Метод кругових діаграм і деякі його модифікації досить докладно описані в монографії [13]. Цей метод базується на математичній моделі електричного імпедансу досліджуваного зразка. Достовірність результатів, які отримують за допомогою цього методу, визначається ступенем адекватності математичної моделі реальному об'єкту.

Метод резонансу-антирезонансу, за свідченням У. Кеді [14], сходиться до робіт Уоррена Мезона і передбачає вимір частот електромеханічних резонансів і антирезонансів сталих коливальних досліджуваних зразків. Як і в методі кругових діаграм, теоретичною основою є математична модель електричного імпедансу досліджуваного зразка. З цієї причини всі похибки методу кругових діаграм при таманні і методу резонансу-антирезонансу.

В роботі [15] вперше була зроблена спроба розробки методики експериментального визначення фізико-механічних властивостей п'єзоелектричної кераміки, яка спиралася на основні уявлення механіки деформованого твердого тіла з ускладненими (п'єзоелектричними) властивостями. Єдиним слабким місцем способу, описаного в роботі [15], є склеювання двох п'єзокерамічних дисків. Це склеювання має погано відтворювані (особливо на тривалому інтервалі часу) характеристиками, які хоча і в незначній мірі, але впливають на результати експериментального визначення модулів пружності біморфного п'єзокерамічного елемента. Саме з цієї причини вважається за необхідне так змінити тридіапазонний метод резонансу-антирезонансу [15], щоб виключити з результатів експерименту важко прогнозований вплив параметрів шару склеювання.

Відомо [16], що при описі різних форм коливальних одного і того ж об'єкта використовуються різні набори матеріальних констант. Так, при описі товщинних коливальних поляризованої по товщині п'єзокерамічної пластинки потрібно, як мінімум, знання модуля пружності c_{33}^E (модуль пружності, вимірюваний в режимі сталості (рівності нулю) напруженості електричного поля), п'єзомодуля e_{33} і діелектричної проникності χ_{33}^E (діелектрична проникність, яка вимірюється в режимі сталості (рівності нулю) деформації або, як іноді кажуть, але це правильно лише наполовину, проникність затиснутого п'єзоелектрика). При описі радіальних коливальних поляризованого по товщині п'єзокерамічного диска потрібне знання набагато більшого числа матеріальних констант, а саме c_{11}^E , c_{12}^E , c_{13}^E , c_{33}^E , e_{31} , e_{33} і χ_{33}^E . Зіставляючи між собою результати вимірювання модулів пружності c_{12}^E і c_{13}^E , нескладно помітити, що вони відрізняються один від одного на величину, яка рідко перевищує рівень 0,3–0,5% від номінального значення (див., наприклад, таблиці, наведені в монографіях [16, 17]). Насправді, пружні властивості поляризованої по товщині п'єзокерамічної пластинки в площині, яка перпендикулярна до кристалографічної осі Z , є трансверсально ізотропними. Цей факт дає підстави для висновку, що оцінка числових значень модулів пружності $c_{\alpha\beta}^E$ може і повинна проводитися в припущенні, що $c_{12}^E = c_{13}^E$. Більш того, можна довести шляхом формальних міркувань, що напружено-деформований стан пластинки в режимі товщинних коливальних описується за допомогою модуля пружності c_{33}^E тільки в тому випадку, коли виконується рівність $c_{12}^E = c_{13}^E$.

Таким чином, необхідно побудувати несуперечливу методику експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки, яка доставляє достовірні значення мінімум трьох модулів пружності, двох елементів матриці п'єзомодулів і одного елемента матриці діелектричної проникності.

Передуючи побудові цієї методики, необхідно поспідовно розглянути електричний імпеданс коливально-

го п'єзокерамічного диска в області низьких, середніх і високих частот. Метою даної роботи є розрахунок електричного імпедансу коливального диска в області середніх частот.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо (рис. 1) диск, товщина якого α в багато разів менше радіуса R . Поверхні диска $z = 0$ і $z = \alpha$ (z – координатна вісь циліндричної системи координат ρ, φ, z , початок якої поєднано з центром нижньої поверхні диска) електродовані – покриті тонким (не більше 10 мкм) шаром срібла. На верхню поверхню $z = \alpha$ подається електричний потенціал $U_0 e^{i\omega t}$ (величина U_0 вибирається з умови $U_0/\alpha \ll 0,1 E_0$, де $E_0 \cong 2$ МВ/м – напруженість електричного поля, яким поляризовано матеріал диска, що гарантує відсутність нелінійних ефектів; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця). Нижня електродована поверхня $z = 0$ заземлена, тобто має нульовий потенціал.

Прикладена до диска різниця електричних потенціалів створює в його об'ємі електричне поле, яке зміщує іони цирконію, титану, свинцю і кисню з положення рівноваги. В результаті гармонійно змінного в часі деформування диска в ньому виникають поляризаційні заряди, які взаємодіють на електродованих поверхнях з електричними зарядами, які доставляються на ці поверхні генератором різниці електричних потенціалів. Результуючий електричний заряд $Q e^{i\omega t}$ на поверхні $z = \alpha$ своїм електричним полем формує електричний струм $I e^{i\omega t}$ в провіднику, який з'єднує поверхню $z = \alpha$ з виходом електричного генератора. У будь-який момент часу $I e^{i\omega t} = -\partial Q/\partial t = -i\omega Q e^{i\omega t}$, тобто амплітуди струму і електричного заряду на поверхні $z = \alpha$ зв'язані лінійною залежністю $I = -i\omega Q$.

Очевидно, що електричний імпеданс $Z_{el}(\omega)$ коливального диска повинен підкорятися закону Ома для ділянки кола з чого випливає, що

$$Z_{el}(\omega) = \frac{U_0}{I} = -\frac{U_0}{i\omega Q}. \quad (1)$$

Амплітудне значення поверхневої густини σ_0 електричного заряду визначається через амплітудне значення нормального цій поверхні компонента вектора електрич-

ної індукції $\vec{D}(\rho, \varphi, z)$. У ситуації, що розглядається $\sigma_0 = D_z(\rho, z)$ і, оскільки всі фізичні поля в коливальному п'єзокерамічному диску априорі мають осьову симетрію, то

$$Q = \int_S \sigma_0 dS = \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho D_z(\rho, z) d\rho d\varphi = 2\pi \int_0^R \rho D_z(\rho, z) d\rho. \quad (2)$$

Електричний стан диска визначається законом електричної поляризації діелектрика, який має п'єзоелектричні властивості [18], і в термінах амплітудних значень характеристик гармонійно змінних в часі фізичних полів записується в наступному вигляді

$$D_k = e_{knm} \varepsilon_{nm} + \chi_{kj}^E E_j, \quad k, n, m, j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

При записі співвідношення (3) за замовчуванням передбачається, що виконується погодження про підсумовування по двічі повторюваним індексам. Між індексами координатних осей правосторонньої декартової системи координат і символами осей циліндричної системи координат існує взаємно однозначна відповідність, а саме: $1 \Leftrightarrow \rho$; $2 \Leftrightarrow \varphi$ і $3 \Leftrightarrow z$.

Компоненти тензора нескінченно малих деформацій задовольняють узагальненому закону Гука для пружного середовища з п'єзоелектричними властивостями [18], який записується наступним чином:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} - e_{kij} E_k. \quad (4)$$

Пружні напруження σ_{ij} і сили інерції, які виникають в об'ємі динамічно деформованого твердого тіла, пов'язані між собою другим законом Ньютона в диференціальній формі або, як частіше говорять, рівняннями руху, які в разі вісесиметричного, змінного в часі за гармонійним законом напружено-деформованого стану записуються в циліндричній системі координат наступним чином [19]:

$$\frac{\partial \sigma_{\rho\rho}}{\partial \rho} + \frac{\partial \sigma_{\rho z}}{\partial z} + \frac{1}{\rho} (\sigma_{\rho\rho} - \sigma_{\varphi\varphi}) + \rho_0 \omega^2 u_\rho = 0, \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \sigma_{z\rho}) + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \rho_0 \omega^2 u_z = 0, \quad (6)$$

де u_ρ і u_z – амплітудні значення компонентів вектора зміщення матеріальних частинок – нескінченно малих об'ємів п'єзокераміки. Нормальні і дотичні напруження на поверхнях диска повинні задовольняти третьому закону Ньютона. Якщо диск коливається в вакуумі або, що, практично, те ж саме, в повітрі, тобто не має механічних контактів з іншими матеріальними об'єктами (рис. 1), то на поверхнях диска повинні виконуватися наступні умови:

$$\sigma_{z\rho}|_{z=0, \alpha} = \sigma_{zz}|_{z=0, \alpha} = 0 \quad \forall \rho \in [0, R], \quad (7)$$

$$\sigma_{\rho z}|_{\rho=R} = \sigma_{\rho\rho}|_{\rho=R} = 0 \quad \forall z \in [0, \alpha]. \quad (8)$$

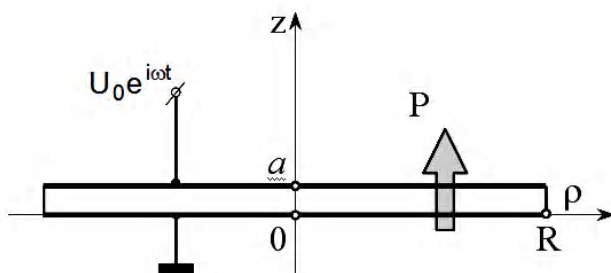


Рисунок 1 – Розрахункова схема коливального п'єзокерамічного диска

Оскільки деформації визначаються через компоненти вектора зміщення (в розглянутій задачі це $\varepsilon_{\rho\rho} = \partial u_\rho / \partial \rho$, $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_\rho / \rho$, $\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z$ і $\varepsilon_{\rho z} = (\partial u_\rho / \partial z + \partial u_z / \partial \rho) / 2$), оскільки можна стверджувати, що адекватний реальній ситуації математичний опис електричного імпедансу передбачає адекватний математичний опис динамічного напружено-деформованого стану коливального п'єзокерамічного диска. Природно, що на якісні і кількісні характеристики напружено-деформованого стану в об'ємі диска робить істотний вплив електричне поле, яке є алгебраїчною сумою електричного поля, створеного генератором різниці електричних потенціалів (надалі – електричне поле зовнішнього джерела), і електричного поля, яке виникає через зміщення іонів з положення рівноваги (прямий п'єзоелектричний ефект). Це поле в подальшому будемо називати внутрішнім електричним полем.

Середніми частотами будемо називати частотний діапазон, в якому масштабна одиниця просторової неоднорідності напружено-деформованого стану (довжина пружної хвилі) стає порівняною з радіусом п'єзокерамічного диска. Для тонких дисків, коли відношення $\alpha/R \ll 1$, з наведеного вище формулювання випливає, що напружено-деформований стан практично не змінюється по товщині диска. З граничних умов (7) випливає, що $\sigma_{\rho z} = \sigma_{zz} = 0 \forall (\rho, z) \in V$. Рівність $\sigma_{\rho z} = 0$ при $E_\rho = 0$ означає, що $\varepsilon_{\rho z} = \varepsilon_{z\rho} = 0 \forall (\rho, z) \in V$.

При зроблених припущеннях узагальнений закон Гука (4) доставляє наступні співвідношення:

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31}^E E_z, \quad (9)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} - e_{31}^E E_z, \quad (10)$$

$$0 = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{33}^E \varepsilon_{zz} - e_{33}^E E_z. \quad (11)$$

Зі співвідношення (11) випливає, що

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{c_{12}^E}{c_{33}^E} (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + \frac{e_{33}^E}{c_{33}^E} E_z. \quad (12)$$

Підстановка виразу (12) в формули (9) і (10) приводить до наступних результатів

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11} \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12} \varepsilon_{\varphi\varphi} - e_{31}^* E_z, \quad (13)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12} \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11} \varepsilon_{\varphi\varphi} - e_{31}^* E_z, \quad (14)$$

де $c_{11} = c_{11}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$; $c_{12} = c_{12}^E - (c_{12}^E)^2 / c_{33}^E$; $e_{31}^* = e_{31} - e_{33} / c_{33}^E$ – матеріальні константи для режиму планарних коливань, тобто для режиму деформування, коли $\sigma_{zz} = 0$.

Компонент вектора електричної індукції

$D_z = e_{31} (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + e_{33} \varepsilon_{zz} + \chi_{33}^E E_z$ після виключення деформації ε_{zz} визначається наступним виразом

$$D_z = \frac{e_{31}^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho u_\rho^{(z)}(\rho) \right] - \chi_{33}^* \frac{U_0}{\alpha}, \quad (15)$$

де $\chi_{33}^* = \chi_{33}^E (1 + \Delta\chi_{33}^*)$ – діелектрична проникність для режиму планарних коливань. Надбавка

$\Delta\chi_{33}^* = e_{33}^2 / (\chi_{33}^E c_{33}^E)$ при типових для п'єзокерамік ЦТС

значеннях матеріальних констант ($c_{11}^E = 110$ ГПа;

$c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²;

$e_{31} = -8$ Кл/м² і $\chi_{33}^E = 1400 \chi_0$; $\chi_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму або діелектрична постійна) не перевищує 0,262.

При визначенні компонента D_z виразом (15) формула для розрахунку електричного імпедансу коливального диска записується в наступному вигляді

$$Z_{el}(\omega) = -\frac{U_0}{i\omega C_\delta^* \Xi^*(\omega)}, \quad (16)$$

де $C_\delta^* = \pi R^2 \chi_{33}^* / \alpha$ – динамічна електрична ємність п'єзокерамічного диска для режиму планарних коливань, тобто електрична ємність в області середніх частот. Функція $\Xi^*(\omega)$ розраховується за формулою

$$\Xi^*(\omega) = \frac{2e_{31}^* \alpha}{\chi_{33}^* R} u_\rho^{(z)}(R) - U_0. \quad (17)$$

Введемо позначення

$$u_\rho^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha u_\rho(\rho, z) dz,$$

і будемо називати величину $u_\rho^{(z)}(\rho)$ усередненим по товщині диска радіальним компонентом вектора зміщення матеріальних частинок диска.

Для визначення усередненого по товщині диска радіального компонента вектора зміщення матеріальних частинок диска на середніх частотах піддамо операції усереднення рівняння сталих радіальних коливань (5). Приймаючи до уваги, що

$$\frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \frac{\partial \sigma_{\rho z}}{\partial z} dz = \frac{1}{\alpha} [\sigma_{\rho z}(\rho, \alpha) - \sigma_{\rho z}(\rho, 0)] = 0,$$

результат усереднення можна представити таким виразом

$$\frac{\partial \sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} [\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho) - \sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho)] + \rho_0 \omega^2 u_\rho^{(z)}(\rho) = 0. \quad (18)$$

Нормальні напруження $\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho)$ і $\sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho)$ визначаються з співвідношень (13) і (14):

$$\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \sigma_{\rho\rho}(\rho) dz = c_{11} \frac{\partial u_\rho^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12} \frac{u_\rho^{(z)}(\rho)}{\rho} - e_{31}^* E_z^{(z)}(\rho), \quad (19)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}^{(z)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha \sigma_{\varphi\varphi}(\rho) dz = c_{12} \frac{\partial u_\rho^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{11} \frac{u_\rho^{(z)}(\rho)}{\rho} - e_{31}^* E_z^{(z)}(\rho). \quad (20)$$

Так, як

$$D_z(\rho) = \frac{e_{31}^*}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_\rho^{(z)}(\rho)] + \chi_{33}^* E_z^{(z)}(\rho), \quad (21)$$

то з порівняння двох, фізично еквівалентних, визначень (15) і (21) аксіального компонента вектора електричної індукції слідує, що

$$E_z^{(z)}(\rho) = -U_0/\alpha. \quad (22)$$

Підставляючи співвідношення (19) і (20) в звичайне диференціальне рівняння (18), отримуємо стандартне рівняння для функцій Бесселя

$$\rho^2 \frac{\partial^2 u_\rho^{(z)}(\rho)}{\partial \rho^2} + \rho \frac{\partial u_\rho^{(z)}(\rho)}{\partial \rho} + [(\lambda\rho)^2 - 1] u_\rho^{(z)}(\rho) = 0,$$

рішення якого, очевидно, має такий вигляд

$$u_\rho^{(z)}(\rho) = A J_1(\lambda\rho), \quad (23)$$

де A – константа, що підлягає визначенню; $J_1(\lambda\rho)$ – функція Бесселя першого порядку; $\lambda = \omega/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ – хвильове число радіальних коливань п'єзокерамічного диска.

Константа A визначається з граничної умови $\sigma_{\rho\rho}^{(z)}(R) = 0$ (умова виконується автоматично) наступним чином

$$A = -\frac{e_{31}^* U_0}{\alpha c_{11}} \frac{R}{[\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k) J_1(\lambda R)]},$$

де $J_0(\lambda R)$ – функція Бесселя нульового порядку; $k = c_{12}/c_{11}$ – число менше одиниці.

Підставляючи значення константи в формулу (23), а отриманий результат – в співвідношення (17), отримуємо

можливість записати вираз (16) в наступному вигляді:

$$Z_{el}(\omega) = \frac{1}{i\omega C_\delta^*} F^{(*)}(\omega), \quad (24)$$

де

$$F^{(*)}(\omega) = \frac{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k) J_1(\lambda R)}{\lambda R J_0(\lambda R) - (1-k - 2K_{31}^2) J_1(\lambda R)}; \quad (25)$$

$K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11} \chi_{33}^*)$ – квадрат коефіцієнта електромеханічного зв'язку п'єзокераміки в режимі радіальних коливань диска, поляризованого по товщині.

Функція $F^{(*)}(\omega)$, що задана виразом (25), має ряд характерних точок на осі частот ω . На частоті ω_{rm} , яка відповідає m -му за номером кореню рівняння

$$x J_0(x) - (1-k) J_1(x) = 0, \quad (26)$$

функція $F^{(*)}(\omega_{rm}) = 0$. На частоті ω_{rm} частота зміни знаку сил Кулона, які деформують п'єзокерамічний диск, збігається з m -ою по номеру власною частотою радіальних вісесиметричних коливань круглого диска і відбувається резонансне споживання енергії джерела пружних коливань. Оскільки ідеальне джерело гармонійно змінної в часі різниці електричних потенціалів має нескінченний запас енергії, остільки на частотах радіальних електромеханічних резонансів амплітудні значення

радіального компонента $u_\rho^{(z)}(\rho)$ вектора зміщення матеріальних частинок диска необмежено зростають. Відповідно до цього зростають амплітудні значення компонентів тензора деформацій і, як наслідок, необмежено зростають амплітудні значення електричного заряду на поверхні $z = \alpha$. Останнє є причиною необмеженого зростання амплітудних значень змінного струму в провідниках, які підключені до електродованих поверхонь диска. Нескінченні струми на виході ідеального генератора електричної напруги виникають в результаті короткого замикання, тобто коли опір навантаження $Z_{el}(\omega_{rm}) = 0$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

У таблиці 1 наведені числові значення перших двох коренів (x_1 і x_2) рівняння (26) і їх відношення $\xi_{21} = x_2/x_1$ в залежності від значень параметра k . Необхідно підкреслити, що відношення ξ_{21} в точності дорівнює відношенню $\omega_{21} = \omega_{r2}/\omega_{r1}$, тобто кругових частот другого і першого радіальних електромеханічних резонансів, яке легко і точно визначається експериментально. Необхідно звернути увагу ще й на те, що числові значення коренів рівняння (26) змінюються досить мало в порівнянні зі зміною параметра k . Це необхідно враховувати при виконанні вимірювань, які необхідно виконувати з усією можливою ретельністю.

Слідом за частотами ω_{rm} радіальних резонансів слідує частоти, на яких обертається в нуль знаменник виразу (25). На цих частотах функція $F^{(*)}(\omega)$ необмежено зростає. Відповідно до цього необмежено зростає електричний імпеданс п'єзокерамічного диска. Це відбувається через те, що поляризаційні заряди повністю компенсують електричний заряд, який формує на електродах поверхнях диска генератор електричних сигналів. Результируючий заряд Q обертається в нуль і електричний струм в провідниках зникає. Це відповідає розімкнутому електричному колу або електричному колу, в якому включено нескінченно великий опір. При цьому п'єзокерамічний диск, природно, не споживає енергії від джерела коливань, тобто від генератора. Щоб підкреслити специфіку і відмінність цього стану від стану на частотах електромеханічного резонансу, частоти ω_{am} , на яких $Z_{el}(\omega_{am}) \rightarrow \infty$, називають частотами електромеханічного антирезонансу.

У реальному експерименті нулі і нескінченності відсутні, оскільки в реальних пружних матеріалах завжди існують втрати на в'язке тертя. Ці втрати можна врахувати за допомогою параметра Q_M , який має зміст механічної добротності матеріалу. Як відомо, добротністю називається безрозмірне число, величина якого обернено пропорційна втратам енергії в коливальній системі за період. В ідеальних пружних тілах, де втрати енергії на

в'язке тертя відсутні, $Q_M \rightarrow \infty$. У реальних об'єктах добротність Q_M має кінцеве значення. При цьому модулі пружності $c_{\beta\lambda}^E(Q_M)$ записуються наступним чином [20]

$$c_{\beta\lambda}^E(Q_M) = c_{\beta\lambda}^E (1 + i/Q_M), \quad (27)$$

де $c_{\beta\lambda}^E$ – статичний модуль пружності; $i = \sqrt{-1}$ – уявна одиниця.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 2 показані модулі радіальних зміщень $u_r^{(z)}(\rho)$

в п'єзокерамічному диску радіусом $R = 33 \cdot 10^{-3}$ м і товщиною $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ м. Параметри матеріалу диску (п'єзокераміки) $c_{11}^E = 110$ ГПа; $c_{12}^E = 60$ ГПа; $c_{33}^E = 100$ ГПа; $e_{33} = 18$ Кл/м²; $e_{31} = -8$ Кл/м² і $\chi_{33}^E = 1400 \chi_0$; $Q_M = 100$; $k = c_{12}/c_{11} = 0,324$. Розрахунки були виконані на частотах перших трьох електромеханічних резонансів. Номер резонансної частоти представлений в полі рисунку біля відповідної кривої. Для зазначеного вище значення параметра k резонансним частотам відповідають наступні значення коренів рівняння (26): $x_1 = 2,063690$; $x_2 = 5,393958$ і $x_3 = 8,574693$. Різниця електричних потенціалів $U_0 = 1$ В. По осі абсцис на рис. 2 відкладені значення безрозмірною радіальної координати ρ/R .

Звертає на себе увагу надзвичайно швидко зменшення рівнів радіальних зміщень у міру зростання номера електромеханічного резонансу.

Цей факт додатково ілюструється на рис. 3, де показана зміна модуля радіального зміщення $u_r^{(z)}(R)$ бічної поверхні $\rho = R$ п'єзокерамічного диска в широкому діапазоні частот. Обчислення проводилися при зазначеному вище наборі геометричних і фізико-механічних параметрів коливального диска. Цифрами в полі рисунку вказані номери електромеханічних резонансів. По осі абсцис на рис. 3 відкладено безрозмірне хвильове число $x = \lambda R$. З представлених на рис. 3 результатів обчислень випливає, що на частотах в околиці першого товщинного резонансу (це приблизно відповідає значенням $\lambda R \cong 40 \div 60$) радіальні зміщення матеріальних частинок диска, розраховані в припущенні, що $\sigma_{zz} = 0$, перестають існувати.

На рис. 4 показана зміна модуля електричного імпедансу п'єзокерамічного диска в діапазоні середніх частот (рис. 4а). На вставці в поле рис. 4а показано зміну значень модуля $Z_{el}(\omega)$ в найближчій околиці частоти ω_{r1} першого електромеханічного резонансу. На рис. 4б показана зміна модуля електричного імпедансу в околиці частоти ω_{a1} першого електромеханічного антирезонансу. Геометричні і фізико-механічні параметри диска, які використовувалися при обчисленнях за формулою (24), вказані в коментарях до рис. 3.

Таблиця 1 – Перші два кореня рівняння

$$x J_0(x) - (1 - k) J_1(x) = 0$$

k	x_1	x_2	ξ_{21}
0,00	1,841184	5,331443	2,895660
0,05	1,878980	5,341153	2,842582
0,10	1,915393	5,350843	2,793601
0,15	1,950511	5,360511	2,748259
0,20	1,984414	5,370155	2,706167
0,25	2,017172	5,379773	2,666988
0,30	2,048850	5,389364	2,630434
0,35	2,079508	5,398928	2,596253
0,40	2,109198	5,408462	2,564226
0,45	2,137971	5,417963	2,534162
0,50	2,165871	5,427433	2,505889
0,55	2,192942	5,436869	2,479259
0,60	2,219221	5,446270	2,454137
0,65	2,244744	5,455635	2,430404
0,70	2,269547	5,464962	2,407953
0,75	2,293658	5,474251	2,386690
0,80	2,317109	5,483500	2,366527
0,85	2,339926	5,492708	2,347385
0,90	2,362135	5,501874	2,329195
0,95	2,383761	5,510998	2,311892
1,00	2,404826	5,520078	2,295417

Як випливає з формули (27), вирази (24) і (25) є функціями малого параметра $\varepsilon = 1/Q_M$. Розкладаючи функцію $Z_{el}(\omega)$ в степеневий ряд по малому параметру ε , і обмежуючи розкладання першим ступенем цього пара-

метра, отримуємо наступну оцінку механічної добротності п'єзокераміки:

$$Q_M = \frac{R \left[(x_m^2 + k - 1) J_1(x_m) - k J_0(x_m) \right]}{4x_m \nu C_\partial^*(0) K_{31}^2 J_1(x_m) Z_{el}(x_m)}, \quad (28)$$

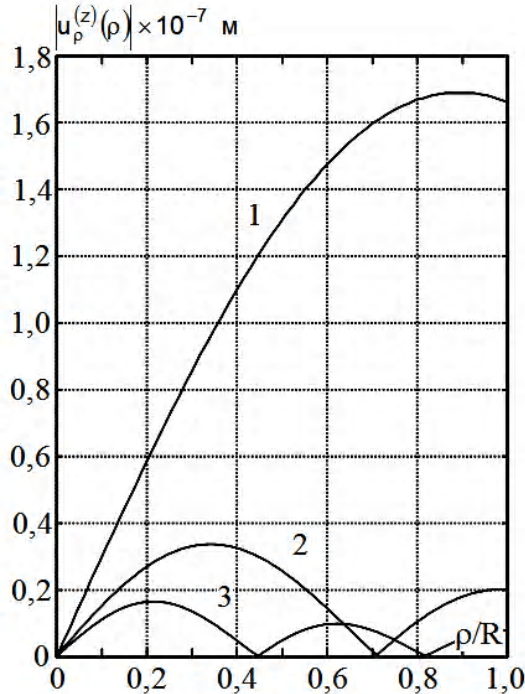


Рисунок 2 – Радіальні зміщення матеріальних частинок п'єзокерамічного диска на частотах перших трьох електро-механічних резонансів

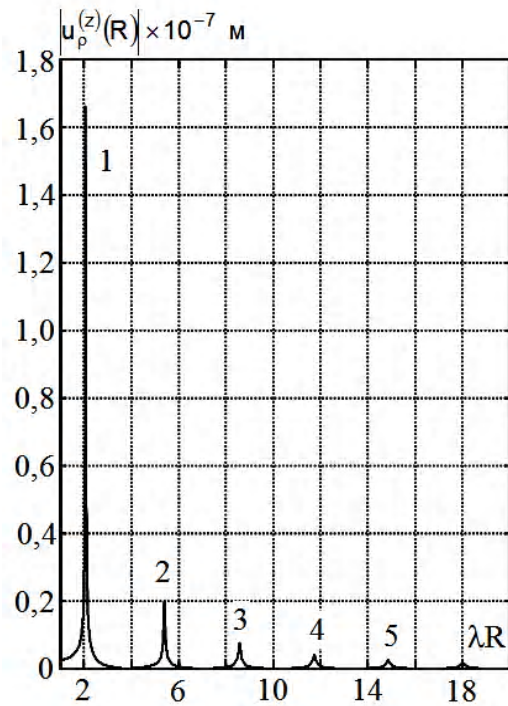


Рисунок 3 – Радіальні зміщення бічної поверхні п'єзокерамічного диска в широкому діапазоні частот

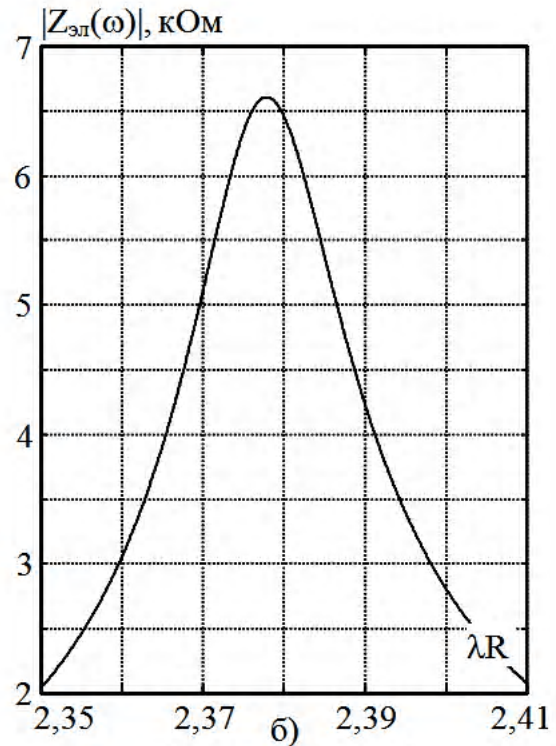
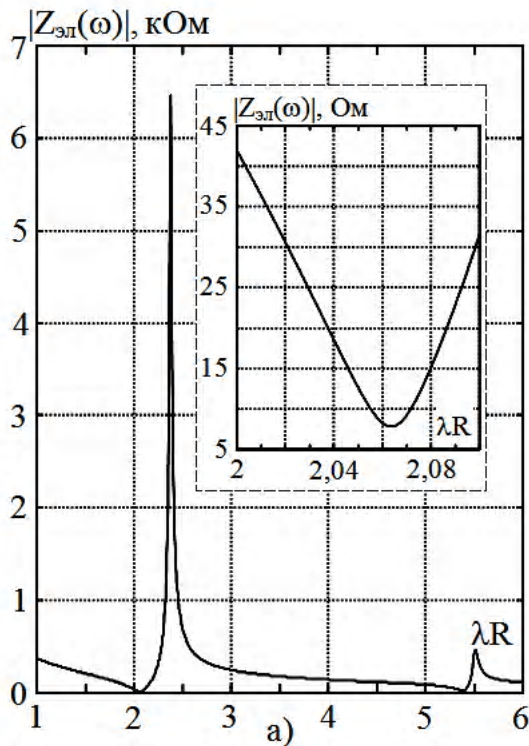


Рисунок 4 – Модуль електричного імпедансу диска в області середніх частот

де x_m – m -ий корінь рівняння (26); $v = \sqrt{\text{Re} c_{11}/\rho_0}$ – швидкість поширення радіальних коливань в п'єзокераміці, визначена без урахування втрат на в'язке тертя; $C_\partial^*(0)$ – динамічна електрична ємність коливального диска, визначена через діелектричну проникність $\text{Re} \chi_{33}^*$, в якій не враховуються втрати на в'язке тертя; $Z_{el}(x_m)$ – електричний імпеданс диска на частоті m -го електромеханічного резонансу. Слід підкреслити, що $Z_{el}(x_m)$ є дійсною величиною. З показаної на рис. 3а вставці, можна визначити $Z_{el}(x_1) = 7,8 \text{ Ом}$. Підстановка цієї величини в формулу (28) дає значення $Q_M = 100,096$. У розрахунок було закладено значення $Q_M = 100$, тобто отримана оцінка знаходиться в добрій згоді з істинним значенням механічної добротності.

У деяких роботах робляться спроби визначення механічної добротності як відношення $\omega_{a1}/\Delta\omega_{0,707}$, де ω_{a1} – кругова частота першого електромеханічного антирезонансу; $\Delta\omega_{0,707}$ – смуга частот на рівні -3 дБ від значення модуля $Z_{el}(\omega_{a1})$, тобто максимального значення електричного імпедансу на частоті першого антирезонансу. Виконуючи ці розрахунки за допомогою графіка, який показаний на рис. 4б, отримуємо значення $Q_M = 153,3$, яке істотно відрізняється від закладеної в розрахунок величини $Q_M = 100$. Причина такого стану речей полягає в тому, що електромеханічний антирезонанс формується за рахунок взаємодії (взаємної компенсації) електричного заряду, який наводиться на електродованій поверхні диска генератором різниці електричних потенціалів, і поляризаційного заряду, який утворюється в результаті деформування п'єзоелектрика. Говорячи іншими словами, втрати на в'язке тертя не є, на відміну від електромеханічного резонансу, єдиним фактором, який визначає величину електричного імпедансу.

На рис. 5 показано частотно залежну зміну модуля безрозмірної функції $F^{(*)}(\omega)$, яка визначена виразом (25). Розрахунок був виконаний для того ж набору геометричних і фізико-механічних параметрів, який використовувався при обчисленнях, результати яких показані на рис. 3 і рис. 4. На вставці в поле рис. 5 показана зміна модуля функції $F^{(*)}(\omega)$ в діапазоні безрозмірних хвильових чисел $3 \leq \lambda R \leq 5$ або, що те ж саме, безрозмірних частот $3 \leq \omega\tau_0 \leq 5$ ($\tau_0 = R/v$), де $|F^{(*)}(\omega)| \approx 1$. При значеннях $\lambda^* R = \omega^* \tau_0 = 3,83$ модуль функції $F^{(*)}(\omega)$ дорівнює одиниці і електричний імпеданс $|Z_{el}(\omega^*)| = 1/\omega^* |C_\partial^*|$. Знаючи значення $|Z_{el}(\omega^*)|$, мож-

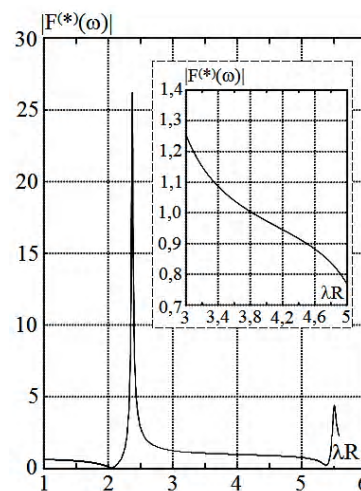


Рисунок 5 – Частотно залежна зміна модуля функції $F^{(*)}(\omega)$

на визначити модуль динамічної електричної ємності в режимі планарних коливань п'єзокерамічного диска, і, як наслідок, отримати оцінку модуля діелектричної проникності χ_{33}^* . Оскільки під час виконання вимірювань

значення частоти ω^* , на якій $|F^{(*)}(\omega^*)| = 1$, а пріорі невідомо, остільки її значення, в першому наближенні, можна оцінити таким чином: $\omega^* \cong (\omega_r + \omega_a)/2$, де $\omega_r = (\omega_{r1} + \omega_{r2})/2$ і $\omega_a = (\omega_{a1} + \omega_{a2})/2$.

6 ОБГОВОРЕННЯ

З теорії Ліфшиця-Пархомовського-Меркулова [21] випливає, що коефіцієнт загасання ультразвуку в широкому діапазоні частот можна описати таким виразом

$$\beta \cong \delta_1 f^2 + \delta_2 f^4,$$

де δ_1 і δ_2 – структурні параметри, числові значення яких визначаються середньостатистичними розмірами зерен матеріалу; f – циклічна частота.

Коефіцієнт загасання β і механічна добротність Q_M пов'язані між собою в області середніх частот в такий спосіб: $\beta = \lambda / (2Q_M^{(p)})$, де λ і γ – хвильові числа радіальних і товщинних коливань круглого диска. Знаючи значення механічних добротностей $Q_M^{(p)}$ і $Q_M^{(z)}$ на частотах першого і другого резонансу, а також першого і другого електромеханічних резонансів можна побудувати оцінки частотної залежності механічної добротності в області середніх і високих частот. Крім того, можна сформулювати оцінку частотної залежності добротності в перехідному частотному діапазоні. Зазначені оцінки надзвичайно важливі при математичному моделюванні функціональних пристроїв п'єзоелектроніки, які працюють в широкому частотному діапазоні.

Розглянувши електричний імпеданс коливального п'єзокерамічного диска в області низьких, середніх і ви-

соких частот можна буде побудувати методику експериментального визначення матеріальних констант п'єзокераміки. Перспектива подальших досліджень також може полягати в побудові методики обчислення коефіцієнтів трансформації в п'єзоелектричному трансформаторі з декількома вторинними електричними колами.

Слід зауважити, що п'єзоелектричні диски з частковим електродуванням однієї або двох поверхонь досить часто використовуються для створення різних функціональних пристроїв п'єзоелектроніки. Зокрема, диски з секторним електродуванням поверхні є практично основним елементом багатьох мікроелектромеханічних систем. Множинність і різноманіття практичного застосування дисків з секторним електродуванням природним чином стимулює теоретичні дослідження, метою яких є прогнозування характеристик і технічних параметрів пристроїв п'єзоелектроніки, які створюються на їх основі. Прогноз здійснюється на підставі математичної моделі, яка є основним результатом теоретичного опису реального пристрою. Практична значимість адекватної реальному об'єкту математичної моделі очевидна. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'єзоелектроніки, обумовлених в технічному завданні. Це істотно скорочує час і вартість розробки нових функціональних елементів п'єзоелектроніки. Вартість зекономлених ресурсів становить комерційну ціну математичної моделі.

ВИСНОВКИ

Основні результати цієї статті можна зафіксувати наступним чином.

1. Вперше при досить загальних початкових припущеннях отримано вираз для розрахунку електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диска.

2. Показано, що електричний імпеданс визначається усередненими значеннями компонентів вектора зміщення матеріальних частинок п'єзокераміки.

3. Побудовано вираз для розрахунку електричного імпедансу коливального п'єзокерамічного диска в області середніх частот, де вектор зсуву матеріальних частинок диска практично повністю визначається радіальним компонентом.

4. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'єзоелектроніки, обумовлених в технічному завданні. Це істотно скорочує час і вартість розробки нових функціональних елементів п'єзоелектроніки.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках науково-дослідної роботи Черкаського державного технологічного університету «Створення високоефективного інтелектуального комплексу для розробки та дослідження п'єзоелектричних

компонентів для приладобудування, медицини та робототехніки» (№ держ. реєстрації 0117U000936).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Исследование характеристик пьезоэлектрического трансформатора на основе радиальных колебаний в тонких пьезокерамических дисках / [А. В. Богдан, О. Н. Петрищев, Ю. И. Якименко, Ю. Ю. Яновская] // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. – 2009. – Ч. 1. – С. 269–274.
2. Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники / А. В. Богдан, О. Н. Петрищев, Ю. И. Якименко, Ю. Ю. Яновская // *Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии»*. – 2009. – Ч. 2. – С. 35–42.
3. Hsu Yu-Hsiang. Electrical and Mechanical Fully Coupled Theory and Experimental Verification of Rosen-Type Piezoelectric Transformers / Yu-Hsiang Hsu, Chih-Kung Lee, Wen-Hsin Hsiao // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2005. – Vol. 52, No. 10. – P. 1829–1839.
4. Flynn Anita M. Fundamental Limits on Energy Transfer and Circuit Considerations for Piezoelectric Transformers / Anita M. Flynn, Seth R. Sanders // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2002. – Vol. 17, No. 1. – P. 8–14.
5. Паэранд Ю. Э. Влияние места закрепления пьезотрансформатора на эффективность его работы / Ю. Э. Паэранд, П. В. Охрименко, К. Ю. Филоненко // *МНПК «Современные информационные и электронные технологии»*. – 2014. – С. 69–70.
6. Новые области применения пьезотрансформаторов / [В. М. Климашин, В. Г. Никифоров, А. Я. Сафронов, В. К. Казаков] // *Компоненты и технологии*. – 2004. – № 1. – С. 56–60.
7. Day Michael. Understanding piezoelectric transformers in CCFL backlight applications / Michael Day, Bang S. Lee // *Analog Applications Journal*. – 2002. – 4Q. – P. 18–24.
8. Wells Eddy. Comparing magnetic and piezoelectric transformer approaches in CCFL applications / Eddy Wells // *Analog Applications Journal*. – 2002. – 1Q. – P. 12–18.
9. Експериментальні частотні характеристики п'єзотрансформатора поперечно-поперечного типу для стабілізації струму люмінесцентної лампи / [Шкодзінський О., Белякова І., Пісьціо В., Медвідь В.] // *Вісник ТНТУ*. – 2011. – Том 16, № 3. – С. 142–148.
10. Лямов В. Е. Поляризационные эффекты и анизотропия взаимодействия акустических волн в кристаллах / В. Е. Лямов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1983. – 223 с.
11. Богданов С. В. Определение упругих и пьезокерамических постоянных ромбических кристаллов акустическим методом / С. В. Богданов // *Акуст. журн.* – 1997. – Т. 43, № 3. – С. 304.
12. Богданов С. В. Акустический метод определения упругих и пьезоэлектрических постоянных кристаллов 6 mm- и 4 mm-классов / С. В. Богданов // *Акуст. журн.* – 2000. – Т. 46, № 5. – С. 609.
13. Шульга Н. А. Колебания пьезоэлектрических тел / Н. А. Шульга, А. М. Болкисев. – Киев: Наукова думка, 1990. – 228 с.
14. Кэди У. Пьезоэлектричество и его практические применения / У. Кэди. – М.: ИЛ, 1949. – 718 с.
15. Дидковский В. С. К вопросу об определении физико-механических констант пьезокерамических материалов / В. С. Дидковский, О. Н. Петрищев, А. Н. Шаблатович // *Электроника и связь*. – 2004. – № 22. – С. 76–87.
16. Гринченко В. Т. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость / В. Т. Гринченко,

- А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга. – Киев : Наукова думка, 1989. – 280 с.
17. Партон В. З. Электромагнитоупругость пьезоэлектрических и электропроводных тел / В. З. Партон, Б. А. Кудрявцев. – М. : Наука, 1988. – 472 с.
 18. Петрищев О.Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / О. Н. Петрищев. – Киев : Аверс, 2012. – 300 с.
 19. Новацкий В. Теория упругости / В. Новацкий. – М. : Мир, 1975. – 873 с.
 20. Улитко А. Ф. Амплитуды и фазы продольных колебаний пьезокерамических стержней с учетом переменной механической добротности / А. Ф. Улитко. – Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2004. – С. 204–208.
 21. Пападакис Э. Затухание ультразвука, обусловленное рассеянием в поликристаллических средах. – В кн. Физическая акустика, т. IV. Часть Б. Приложения физической акустики в квантовой физике и физике твердого тела / Э. Пападакис. – М. : Мир, 1970. – С. 317–381.
- Стаття надійшла до редакції 22.09.2017.
Після доробки 28.10.2017.

Базило К. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютеризованных и информационных технологий в приборостроении Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина

ПРИНЦИПЫ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ИМПЕДАНСА КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКОГО ДИСКА В ОБЛАСТИ СРЕДНИХ ЧАСТОТ

Актуальность. Актуальность применения различных функциональных элементов пьезоэлектроники в силовых и информационных системах объясняется, прежде всего, их высокой надежностью. Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей.

Цель работы – расчет электрического импеданса колеблющегося пьезоэлектрического диска в области средних частот.

Метод. При достаточно общих начальных предположениях получено математическое описание электрического импеданса колеблющегося в вакууме пьезокерамического тонкого диска со сплошным электродированием торцевых поверхностей. Показано, что электрический импеданс определяется усредненными значениями компонентов вектора смещения материальных частиц пьезокерамики.

Результаты. Построено выражение для расчета электрического импеданса колеблющегося пьезокерамического диска в области средних частот, где вектор смещения материальных частиц диска практически полностью определяется радиальным компонентом.

Выводы. В результате исследования математической модели реального устройства можно определить тот набор геометрических, физико-механических и электрических параметров реального объекта, который обеспечивает реализацию технических показателей функционального элемента пьезоэлектроники, оговоренных в техническом задании. Это существенно сокращает время и стоимость разработки новых функциональных элементов пьезоэлектроники. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в построении методики вычисления коэффициентов трансформации в пьезоэлектрическом трансформаторе с несколькими вторичными электрическими цепями.

Ключевые слова: тонкий диск, пьезокерамика, электрический импеданс, вектор смещения материальных частиц пьезокерамики.

Bazilo C. V.

PhD, Associate professor, Associate professor of department of Computerized and Information Technologies in Instrument Making, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine

PRINCIPLES OF ELECTRICAL IMPEDANCE CALCULATING OF OSCILLATING PIEZOCERAMIC DISK IN THE AREA OF MEDIUM FREQUENCIES

Context. The relevance of the use of various functional elements of piezoelectronics in power and informational systems is due, above all, to their high reliability. The final goal of mathematical modeling of the vibrating piezoelectric elements physical condition is a qualitative and quantitative description of characteristics and parameters of existing electrical and elastic fields.

Objective. The aim of this work is to calculate the electrical impedance of oscillating piezoelectric disk in the mid-frequency range.

Method. At sufficiently general initial assumptions a mathematical description of the electrical impedance of the oscillating thin piezoceramic disk with end surfaces continuous covering by electrodes in vacuum is obtained. It is shown that electric impedance is determined by the averaged values of the components of piezoceramics material particles displacement vector.

Results. Expression for electrical impedance calculating of the oscillating piezoceramic disk at middle frequencies is built, where the disk's material particles displacement vector is almost completely determined by the radial component.

Conclusions. As a result of research of real device's mathematical model a set of geometrical, physical and mechanical and electrical parameters of a real object can be determined which provides realization of technical parameters of piezoelectric functional element specified in technical specifications. This significantly reduces the time and cost of new functional elements of piezoelectronics development. Prospects for further research can be defined as the construction of technology for calculating of transformation coefficients in piezoelectric transformer with several secondary electrical circuits.

Keywords: thin disk, piezoelectric ceramics, electrical impedance, piezoelectric ceramics material particles displacement vector.

REFERENCES

1. Bogdan A. V., Petrishhev O. N., Yakimenko Yu. I., Yanovskaya Yu. Yu. Issledovanie karakteristik p'ezoe'lektricheskogo transformatora na osnove radial'nyx kolebanij v tonkix p'ezokeramicheskix diskax, *E'lektronika i svyaz'*, Tematicheskij vypusk «E'lektronika i nanotexnologii», 2009, Part 1, pp. 269–274.
2. Bogdan A. V., Petrishhev O. N., Yakimenko Yu. I., Yanovskaya Yu. Yu. Matematicheskoe modelirovanie kolebanij tonkix p'ezokeramicheskix diskov dlya sozdaniya funkcional'nyx e'lementov p'ezoe'lektroniki, *E'lektronika i svyaz'*, Tematicheskij vypusk «E'lektronika i nanotexnologii», 2009, Part 2, pp. 35–42.

3. Yu-Hsiang Hsu, Chih-Kung Lee, Wen-Hsin Hsiao Electrical and Mechanical Fully Coupled Theory and Experimental Verification of Rosen-Type Piezoelectric Transformers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2005, Vol. 52, No. 10, pp. 1829–1839.
4. Flynn Anita M., Sanders Seth R. Fundamental Limits on Energy Transfer and Circuit Considerations for Piezoelectric Transformers, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, Vol. 17, No. 1, pp. 8–14.
5. Pae'rand Yu. E., Oxrimenko P. V., Filonenko K. Yu. Vliyanie mesta zakrepleniya p'ezotransformatora na e'ffektivnost' ego raboty, *MNPK «Sovremennye informacionnye i e'lektronnye tekhnologii»*, 2014, pp. 69–70.
6. Klimashin V. M., Nikiforov V. G., Safronov A. Ya., Kazakov V. K. Novye oblasti primeneniya p'ezotransformatorov, *Komponenty i tekhnologii*, 2004, No. 1, pp. 56–60.
7. Day Michael, Lee Bang S. Understanding piezoelectric transformers in CCFL backlight applications, *Analog Applications Journal*, 2002, 4Q, pp. 18–24.
8. Wells Eddy Comparing magnetic and piezoelectric transformer approaches in CCFL applications, *Analog Applications Journal*, 2002, 1Q, pp. 12–18.
9. Shkodzinskyi O., Bieliakova I., Pistisio V., Medvid V. Eksperymentalni chastotni kharakterystyky piezotransformatora poperechno-poperechnoho typu dlia stabilizatsii strumu liuminestsentnoi lampy, *Visnyk TNTU*, 2011, Vol. 16, No. 3, pp. 142–148.
10. Lyamov V. E. Polyarizatsionnye e'ffekty i anizotropiya vzaimodeystviya akusticheskikh voln v kristallax. Moscow, *Izd-vo Mosk. un-ta*, 1983, 223 p.
11. Bogdanov S. V. Opredelenie uprugix i p'ezokeramicheskix postoyannykh rombicheskikh kristallov akusticheskim metodom, *Akust. zhurn.*, 1997, Vol. 43, No. 3, P. 304.
12. Bogdanov S. V. Akusticheskij metod opredeleniya uprugix i p'ezoe'lektricheskix postoyannykh kristallov 6 mm- i 4 mm- klassov, *Akust. zhurn.*, 2000, Vol. 46, No. 5, pp. 609.
13. Shul'ga N. A., Bolkisev A. M. Kolebaniya p'ezoe'lektricheskix tel, Kiev, *Naukova dumka*, 1990, 228 p.
14. Ke'di U. P'ezoe'lektrichestvo i ego prakticheskie primeneniya. Moscow, *IL*, 1949, 718 p.
15. Didkovskij V. S., Petrishhev O. N., Shablatovich A. N. K voprosu ob opredelenii fiziko-mexanicheskij konstant p'ezokeramicheskix materialov, *E'lektronika i svyaz*, 2004, No. 22, pp. 76–87.
16. Grinchenko V. T., Ulitko A. F., Shul'ga N. A. Mexanika svyazannykh polej v e'lementax konstrukcij, Vol. 5, *E'lektroprugost'*. Kiev, *Naukova dumka*, 1989, 280 p.
17. Parton V. Z., Kudryavtsev B. A. E'lektromagnitoprugost' p'ezoe'lektricheskix i e'lektroprovodnykh tel. Moscow, *Nauka*, 1988, 472 p.
18. Petrishhev O. N. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskix e'lementov. Chast' 1. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskix e'lementov v vakuume i metod rezonansa – antirezonansa. Kiev, *Avers*, 2012, 300 p.
19. Novackij V. Teoriya uprugosti. Moscow, *Mir*, 1975, 873 p.
20. Ulitko A. F. Amplitudy i fazy prodol'nykh kolebanij p'ezokeramicheskix sterzhnej s uchetom peremennoj mexanicheskij dobrotnosti, Kyiv, *Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Kyivskiy universytet»*, 2004, pp. 204–208.
21. Papadakis E'. Zatuxanie ul'trazvuka, obuslovlennoe rasseyaniem v polikristallicheskix sredax, V kn. *Fizicheskaya akustika*, Vol. IV, P. B, Prilozheniya fizicheskij akustiki v kvantovoj fizike i fizike tverdogo tela. Moscow, *Mir*, 1970, pp. 317–381.

Piza D. M.¹, Bugrova T. I.², Lavrentiev V. M.³, Semenov D. S.⁴¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Pro-rector on scientific and pedagogical work and questions of prospects for the development of the university Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine²Ph.D., Associate Professor of Radioengineering and Telecommunication Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine³Ph.D., Head of the department State Enterprise "Scientific and production complex "Iskra", Zaporizhzhya, Ukraine⁴Head of the division State Enterprise "Scientific and production complex "Iskra", Zaporizhzhya, Ukraine

SELECTOR OF CLASSIFIED TRAINING SAMPLES FOR SPATIAL PROCESSING OF SIGNALS UNDER THE IMPACT OF COMBINED CLUTTER AND JAMMING

Context. In the conditions of combined clutter and jamming radar performance is significantly degraded. This is due to the decorrelation of a point source of an active jamming by spatially distributed passive clutter. The methods of forming classified training samples to adjust the weight coefficients of spatial filters are introduced.

Objective. The goal is developing an effective method of forming of classified training samples generated by an active masking jamming, for spatial processing of radar signals in a situation of the clutter influence.

Methods. The scientific novelty of this work is in developing a new method of forming the training samples based on the estimation of the width of the normalized autocorrelation function in each range resolution element. On-the-fly analysis of the components of combined clutter and jamming in each range resolution element improves the quality of the components classification and, as a result, minimizes the effect of passive clutter on a spatial filter adaptation process.

Results. The theoretical and practical aspects of the forming of the classified training samples are analyzed. A functional flow block diagram of the classifier of combined clutter components was developed.

Conclusions. Using of the on-the-fly analysis of the combined clutter and jamming components in each range resolution element improves the quality of the clutter classification, which is important in complex hydrometeorological conditions.

Keywords: radar signals processing, adaptive spatial filtering, combined clutter and jamming, classified training samples, normalized autocorrelation function, functional flow block diagram.

NOMENCLATURE

ACF – autocorrelation function;

ADC – analog to digital converter;

D – divisor;

COMP – comparator;

AA – adder-accumulator;

DR – delay register;

 $B(\tau)$ – correlation function of a random process; c – speed of the electromagnetic wave; ΔD – range resolution of the radar; i – sample number of the received signal; k – number of the phase channel; N – number of Fourier transformation points; n – number of repetition period; p – variable for signal delay; R_1 – normalized autocorrelation function of active jamming; R_2 – normalized autocorrelation function of passive clutter; $R(p)$ – signal autocorrelation function, normalized to its power, in each element of range resolution; $[0, t]$ – interval of forming weight coefficient; U_i – jamming amplitude in i -sample; τ – time of signal delay while calculating the ACF; $\dot{U}_0$ – complex value of the signal at the main input of the spatial filter; $\dot{U}_\Sigma$ – complex value of the signal at the output of the spatial filter; $\dot{U}_k$ – complex value of the signal at the input of the compensation channel; $\dot{W}$ – complex value of the weight coefficient; $\dot{W}_0$ – initial complex value of the weight coefficient; $\dot{W}_{i+1}$ – current complex value of the weight coefficient; $W(\omega)$ – energy spectrum of a random process; $\dot{X}_i(n)$ – complex value of the signal amplitude at the i -th time in the n -th repetition period; $\dot{X}(k)$ – complex value of the signal at the output of the k -th phase filter; $|\rho|$ – absolute value of the normalized inter-channel correlation coefficient.

INTRODUCTION

The most difficult conditions for a radar system operation are the simultaneous effect of active jamming and passive clutter. As it is known, active masking jamming may have of natural or artificial origin [1]. However, regardless of its origin, it is a point source. Passive clutter is the result in of reflections of the probing signal from the hydrometeors, dipole clouds, and underlying surface [2]. Spatially distributed nature of clutter degrades the spatial correlation for point sources of active masking jamming [3]. This leads to a significant deterioration in the quality of its compensation.

Information on the spatial distribution of hydrometeors in range and altitude of their location from the [4], gives possibility to assume that the signals reflected from them are non-stationary in time. Non-stationary are also the signals reflected by the underlying surface and chaff clouds [6]. The dimensions of the cloud of one chaff batch in the

vertical (horizontal) plane are 0.6 ... 1 km in 5 min after the throw and 1.6 ... 2 km in 10 min after the throw [2]. Therefore, we can assume that, taking into consideration real spatial distribution of passive clutter, on the scanning range it is possible to find time intervals to form the classified training samples which related to the active masking jamming [5]. Using classified training samples in spatial signal processing enhances the efficiency of signal processing under the impact of combined clutter that determines the relevance of the topic of this article.

The goal is developing an effective method of forming of classified training samples generated by an active masking jamming, for spatial processing of radar signals in a situation of the clutter influence.

1 PROBLEM STATEMENT

Optimal signal processing in the conditions of combined interference with the using of adaptive antenna arrays can be provided by joint (non-separable) space-time processing with simultaneous compensation of active (jamming) and passive (clutter) interference. However, its implementation even on the modern element base is extremely difficult [5]. Therefore, during designing modern samples of radar stations, it is necessary to use a separate two-stage signal processing procedure. Possible realizations are space-time or time-space signal processing [6]. In this case, the well-known auto-compensators of the interference are used as the adaptation element of the spatial filter [1]. It was noted in [5] that, from the point of view of the possibility of obtaining the classified training samples, spatio-temporal (space-time) processing is preferable. Therefore, we can clarify the problem that will be solved in this article and formulate it as follows. It is necessary to review the existing methods of forming the classified training samples for adapting the weight coefficients of the auto-compensator of interference while spatio-temporal (space-time) signal processing and the structure optimization of the interference classifier.

The main problem to be solved in this work is the development of a new method for classifying the components of the combined interference, which ensures their classification in each element of the range resolution.

2 LITERATURE REVIEW

When the two-stage space-time signal processing is doing in separated way, the jamming acting on the side lobes of the antenna pattern is compensated firstly by adjusting the weight coefficients of the auto-compensator. Then spectral analysis of signals is performed (DFT based) as temporal processing in modern radar systems:

$$\hat{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} a_n \hat{X}_i(n) \exp\left\{j \frac{2\pi nk}{N}\right\}. \quad (1)$$

Further we will assume that the number of probing pulses in the emitted pulses sequence is equal to the number of points of the Fourier transform. An example is an American ASR-9 radar with a number of filter channels, depending on the pulse repetition frequency, equal to 8 or 10 [7], or the Ukrainian radar station 36D6 [8], in which 8, 12 or 16 filter channels are realized.

A simplified block diagram of the space-time processing is shown on Fig. 1.

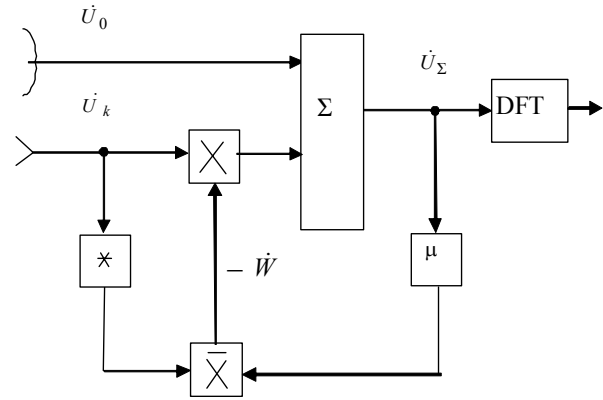


Figure 1 – Simplified block diagram of space-time processing

In accordance with this block diagram, the complex value of the interference at the output of the spatial filter can be written in the following form:

$$\dot{U}_{\Sigma_i} = \dot{U}_{0_i} - \dot{W}_i \dot{U}_{k_i}. \quad (2)$$

In this case, the complex value of the weight coefficient $\dot{W}$ in the circuit using the classical Widrow algorithm [9] is defined as

$$\dot{W}_{i+1} = \dot{W}_i - 2\mu \dot{U}_{k_i}^* \dot{U}_{\Sigma_i}. \quad (3)$$

or

$$\dot{W}(t) = 2\mu \int_0^{t_\phi} \dot{U}_k^*(t) \dot{U}_\Sigma(t) dt + \dot{W}_0. \quad (4)$$

In [10], it was proposed to use the time interval which corresponded to the end of the radar range to form the classified training samples when adaptation of the weight coefficients of the auto-compensator of the interference. The duration of the interval t in the expression (4) when forming the weight coefficients is determined by the speed of the auto-compensator for the interference. The proposed technical solution was based on the assumption that the intensity of passive interference decreases substantially with increasing distance. However, in an experiment conducted in polygon conditions, it was determined that for spatially distributed cloud systems of the Cb type [4], the intensity of passive interference, even at the maximum range, can significantly exceed the noise level of the receiving parts of the radar station. It does not let ensure effective compensation of the active component of the combined interference.

In patents [11, 12] the methods of forming the training samples with real non-stationary nature of clutter in range are introduced. The methods proposed in the patents are based on the posteriori information on the distribution of the passive component of the combined clutter in range. When active jamming and passive clutter act simultaneously, the latter decorrelates the signals from a point source of active clutter. Therefore, in the proposed methods current estimation of the distribution of a normalized coefficient of the inter-channel correlation in range is carried out. In this case it is possible to select the time interval for the forming of the classified training samples with the maximum value of

the correlation coefficient, which corresponds to the lowest level (or eliminated) of passive clutter.

Absolute value of the normalized inter-channel correlation coefficient $|\dot{\rho}|$ can be calculated by the method of “sliding window” at intervals which has of m range elements

$$|\dot{\rho}| = \frac{|\dot{U}_0 \dot{U}_k^*|}{\sqrt{|\dot{U}_0|^2 |\dot{U}_k|^2}}. \quad (5)$$

The number of range elements subject to averaging in the expression (5) is determined by the time of adaptation weight coefficients in a spatial filter.

In the patent [11] with calculating by the expression (5), the value of the normalized coefficient of inter-channel correlation is processed in the threshold device. In this case, if the calculated value of the current distance interval exceeds a threshold, that is corresponds to “no passive clutter”, this interval is used as the classified training samples while adapting a spatial filter.

The disadvantage of this method is the use of a threshold device, which does not allow considering in detail the distribution of a normalized correlation coefficient in range, for example, for determining the time interval with a maximum value of the inter-channel correlation.

The patent [12] proposes a method, which provides a more detailed analysis of the distribution of an inter-channel correlation coefficient in range, which is the following. Values calculated by the expression (5) are stored, and at the end of the probe pulse repetition period by comparing all calculated values in the interval with a maximum value of the normalized inter-channel correlation coefficient is determined. In the next repetition period in a given interval the classified training samples for the adaptation of weight coefficients of a spatial filter is formed.

The common disadvantage of both methods is a certain probability of presence in m averaging intervals of some range elements exposed to passive clutter, which defines the limit the possibilities of classification. Therefore, to improve the quality of the clutter classification it is interesting to develop a method for estimation the possible

impact of passive clutter on the forming of the classified training samples in each range resolution element.

3 MATERIALS AND METHODS

There is a theorem of Wiener-Khinchin [13], asserting that a correlation function of a random process $B(\tau)$ and an energy spectrum $W(\omega)$ are interconnected by the Fourier transform:

$$B(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W(\omega) e^{j\omega\tau} d\omega, \quad (6)$$

$$W(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} B(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau. \quad (7)$$

This follows from expressions (6) and (7) that the wider an energy spectrum of a random process is, the shorter is a correlation interval and, accordingly, the more a correlation interval is, the narrower is an energy spectrum of the process.

Given that the correlation function of passive clutter is wider than active noise jamming, it is possible to determine the moment of exposure to passive clutter by the value of the correlation interval.

In Fig. 2 curves R_1 and R_2 show normalized autocorrelation functions (ACF) of active jamming and passive clutter at ratio of the spectral width of five to one, respectively.

A possible solution to this problem can be achieved by the on-the-fly calculation and estimation of the width of the normalized autocorrelation function of combined clutter in each interval ΔD , which determines the range resolution of the radar:

$$\Delta D = \frac{c}{2} \tau_i, \quad (8)$$

where c is the speed of the electromagnetic wave, τ_i – the duration of the probe pulse.

The essence of the proposed method of forming the classified training samples is following. Taking into consideration a sufficiently bigger processing productivity of the existing electronic components, it is possible to form n received signal samples in the interval, which determines the range resolution of the radar ΔD . This allows to

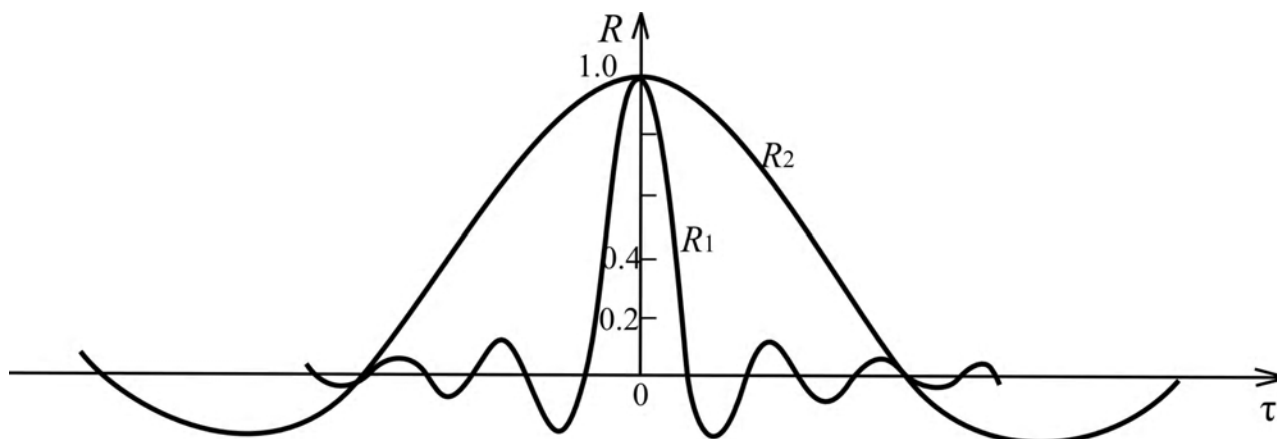


Figure 2 – Normalized ACF of active jamming R_1 and passive clutter R_2

calculate the signal autocorrelation function $R(p)$, which normalized to its power [14], in each element of range resolution.

$$R(p) = \frac{\sum_{i=1}^n U_i U_{i+p}}{\sum_{i=1}^n U_i^2} \quad (9)$$

where i – the sequenced number of the received signal sample, n – the number of them, U_i – the signal amplitude in i – samples, p – variable determining a signal delay in the forming of ACF ($p=1, \dots, n$). Wherein the time of signal delay ϕ while calculating the ACF is equal to:

$$\tau = p \frac{\tau_i}{n} \quad (10)$$

In the future, by comparing the width of the ACF to a threshold the range resolution elements affected by passive clutter are detected and excluded while forming the training samples. This makes it possible to create the classified training samples generated by active clutter only, and be ensured in high quality of the compensation of the latter.

4 EXPERIMENTS

A functional flow block diagram of the device that implements the proposed method of forming the training samples is shown in Fig. 3.

For calculating the ACF the envelope of the signal is demodulated, then in each range resolution element the analog to digital converter ADC forms n samples, which, in accordance with formula (10) are delayed in delay registers $DR_1 \dots DR_n$ and then supplied to the first inputs of the multipliers X . To the second inputs of n multipliers X the respective nondelayed samples get directly from the ADC. On the outputs of n multipliers X n products of the numerator of the expression (9) are formed, they accumulate in respective adder-accumulators AA and are fed to first inputs of n divisors D (as a dividend). The signals from the output

of the ADC also supplied to both inputs of $(n+1)$ -th multiplier. Squared signal samples in accordance with expression (9) are accumulated in adder AA_{n+1} and supplied to the second inputs of n divisors D . As a result, on the outputs of n divisors D ACF values of the received signal, normalized according to power (9) will be formed, wherein each calculated value of ACF corresponds to its delay time (10).

The calculated values of the ACF get to n inputs of the ACF width calculating block, where by means of comparison the sequence number of the p_k divider is determined, on the output of which the normalized correlation function is close to some fixed level, e.g., 0.5. Estimated in this way the width of the ACF ($p_k * \tau_i / n$) is supplied to the comparator COMP. The value of the threshold is set so that the probability of exceeding it under the influence of active jamming were small enough. When the threshold is exceeded it is determined that in the given range ΔD (8), equal to the range resolution element, there is passive clutter. At the same time, on the output of the comparator COMP a logic level, prohibiting the use of this interval to forming the classified training samples is generated.

A significant advantage of the proposed method is the possibility of obtaining the classified training samples of maximum duration. This is achieved by the analysis of the components of combined clutter in each range resolution element.

5 RESULTS

As a result of the research, a new method of forming the classified training samples using a posteriori information was proposed to form the weight coefficients of the adaptive spatial or polarization filters under conditions of the combined clutter and jamming.

In the known correlation method [12], a posteriori information is used on the current estimation of the distribution of the normalized inter-channel correlation coefficient at range intervals. In this method, range intervals

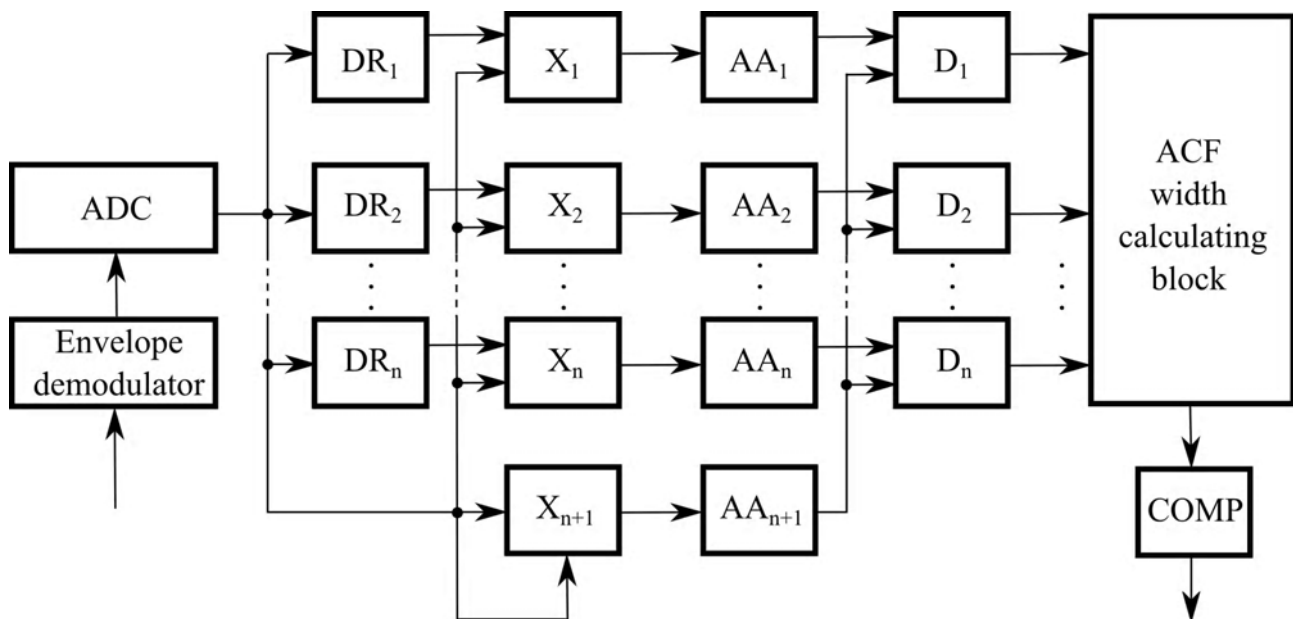


Figure 3 – Functional flow block diagram of the device for the forming of the training samples

at which passive interference decorrelates the active noise interference are eliminated from the forming of the training samples. However it is impossible to obtain a time interval of sufficient duration for forming the classified training samples in the lower beams of the radar in complex hydrometeorological conditions and intensive reflections from the underlying surface.

It is possible to classify the components of the combined interference in the proposed method by forming a set of samples in an interval equal to the resolution element, followed by averaging in calculating the width of the normalized ACF. In this case, each resolution element in which there is no passive interference (clutter) can be used to form the classified training samples for generating the weight coefficients of the adaptive filters for suppressing the active component of the combined interference.

6 DISCUSSION

Figure 4 shows energy “azimuth-range portraits” of reflections obtained in the lower beam of the S-band radar 36D6, which are taken from article [15]. In the near part of the range (up to 100 kilometers) clutter is formed by reflections from the underlying surface of the earth. Their intensity reaches 50–60 dB. In the middle part of the range (100–150 kilometers) clutter is formed by reflections from rain clouds. It is shown in [16] (by modeling), the compensation of the jamming becomes problematic if the level of jamming is less than level of clutter.

An analysis of the given energy characteristics shows that even in the lower beam of the directivity pattern of the antenna at the range coordinate there are small intervals at which clutter is absent or have a much lower intensity. It is obviously, the proposed method makes it possible to generate the classified training samples generated by an active noise interference by using samples from resolution elements, where there is no clutter.

CONCLUSIONS

1. The scientific novelty of this work is in the development of a new method of forming the training samples, based on the estimation of the width of a normalized autocorrelation function in each range resolution element. On-the-fly analysis of the components of combined clutter and jamming in each resolution element improves the quality of

classification of clutter components and, as a result, minimizes the effect of passive clutter on spatial filter adaptation process.

2. The advantage of the proposed method is also the possibility of obtaining the classified training samples with maximum duration. It is achieved by the analysis of the components of combined clutter and jamming in each range resolution element.

3. The practical novelty is in the development of a functional flow block diagram realizing the proposed method.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper was conducted within the framework of research project “Development and improvement of signal processing algorithms in radio engineering and telecommunication systems” (№0117U000013T) at Zaporizhzhya National Technical University with the financial support of the Ministry of Education and Science of Ukraine.

REFERENCES

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. Радиозлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп. / Под ред. Я. Д. Ширмана. – М. : Радиотехника, 2007. – 512 с.
3. Журавльов А. К. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавльов, В. А. Хлебников и др. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544 с.
4. Атлас облаков / Федер. Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова; [Д.П. Беспалов и др.; ред.: Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д’АРТ, 2011. – 248 с.
5. Оценка интервала фиксации пространственного вектора при последовательной пространственно-временной обработке сигналов на фоне комбинированных помех / [В. П. Рябуха, Д. С. Рачков, А. В. Семеняка, Е. А. Катюшин] // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2012. – № 10. – С. 13–25.
6. Залевский А. П. Оценка эффективности пространственно-временной и время-пространственной фильтрации сигналов в когерентно-импульсных РЛС / [А. П. Залевский, Д. М. Пиза, И. С. Пресняк, А. С. Сиренко] // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2012. – № 2. – С. 39–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1604-3274-2012-7>.
7. Тейлор Дж.У. Новая диспетчерская РЛС ASR-9 / Дж.У. Тейлор, Г. Бруникс // ТИИЭР. – 1985. – Т. 73, № 2. – С. 284–289.
8. Радиолокационная станция 36Д6М. Эксплуатация и техническое обслуживание [Текст] : учеб. пособие / [И. Д. Май, А. Г. Каспирович, В. А. Винник и др.] – Запорожье : КП «НПК «Искра». – 140 с.
9. Уидроу Б. Адаптивная обработка сигналов : пер. с англ. / Б. Уидроу, С. Стирнз. – М. : Радио и связь, 1989. – 440 с.
10. 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 «Искра». – № u200911296; Заявл. 2009.11.06; Опубл. 2010.03.25, Бюл. №6, 2010 р. – 4 с.
11. Пат. 59472 Україна, МПК G01S 7/36. Спосіб захисту когерентно-імпульсної РЛС від комбінованих завад / Пиза Д. М., Залевський О. П., Рудик О. В.; заявник та патентовласник Запо-

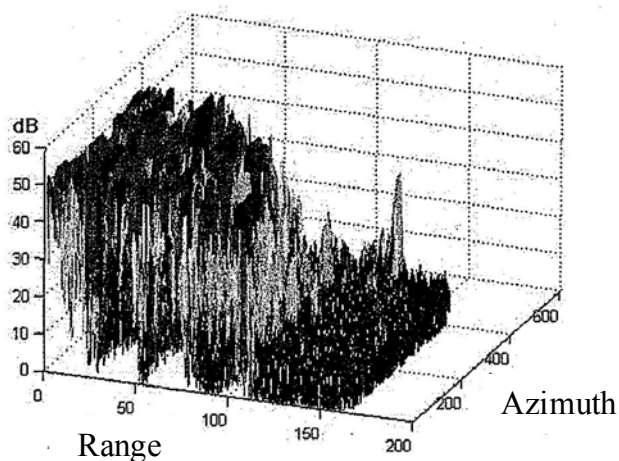


Figure 4 – Azimuth-range portraits of clutters for 36D6 radar

- різький національний технічний університет; заявл. 28.08.2011; опубл. 10.05.2011, Бюл. № 9.
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. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / И. С. Гоноровский. – М. : «Сов. радио», 1977. – 608 с.
14. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гоулд. – М. : Мир, 1978. – 444 с.
15. Леховицкий Д. И. СДЦ в импульсных РЛС: 1. Физический смысл и экстремальные свойства операций оптимальной междупериодной обработки гауссовых сигналов на фоне гауссовых пассивных помех [Текст] / Д. И. Леховицкий, В. П. Рябуха, Г. А. Жуга // Прикладная радиоэлектроника. – 2011. – Том 10, №4.
16. Піза Д. М. Метод компенсації активної складової комбінованої помехи в когерентно-імпульсній РЛС [Текст] / Д. М. Піза, Е. А. Звягинцев, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 23–29. DOI:10.20535/S0021347016060030

Article was submitted 19.06.2017.

After revision 25.09.2017.

Піза Д. М.¹, Бугрова Т. І.², Лаврентьев В. М.³, Семенов Д. С.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспектив розвитку університету, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри Радіотехніки та телекомунікацій, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

³Канд. техн. наук, начальник науково-дослідного відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», Запоріжжя, Україна

⁴Начальник відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», Запоріжжя, Україна

ФОРМУВАЧ КЛАСИФІКАЦІЙНОЇ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ПРИ ПРОСТОРОВІЙ ОБРОБЦІ РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ ДІЇ КОМБІНОВАНОЇ ЗАВАДИ

Актуальність. В умовах впливу комбінованих завад ефективність роботи радіолокаційних засобів істотно погіршується. Це обумовлено декореляцією точкового джерела активної завади просторово-розподіленим характером пасивної завади. Розглядаються методи формування класифікаційної навчальної вибірки для адаптації вагових коефіцієнтів просторових фільтрів.

Мета. Розробка ефективного методу формування класифікаційної навчальної вибірки, породженої активною маскуючою завадою, для просторової обробки радіолокаційних сигналів в умовах одночасного впливу пасивних завад.

Методи. Наукова новизна роботи полягає в розробці нового методу формування навчальної вибірки, заснованого на оцінці ширини нормованої автокореляційної функції в кожному елементі розділення по дальності. Поточний аналіз складових комбінованої завади в кожному елементі розділення підвищує якість класифікації складових завад і, як наслідок, мінімізує вплив пасивної завади на процес адаптації просторового фільтра.

Результати. Розглянуто теоретичні та практичні аспекти формування класифікаційної навчальної вибірки. Розроблено функціональну схему класифікатора складових комбінованої завади.

Висновки. Поточний аналіз складових комбінованої завади в кожному елементі розділення по дальності підвищує якість класифікації завад, що важливо в умовах складної гідрометеорологічної обстановки.

Ключові слова: обробка радіолокаційних сигналів, адаптивна просторова фільтрація, комбінована завада, класифікаційна навчальна вибірка, нормована автокореляційна функція, функціональна схема.

Піза Д. М.¹, Бугрова Т. І.², Лаврентьев В. М.³, Семенов Д. С.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, Проректор по научно-педагогической работе и вопросам перспектив развития университета, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

²Канд. техн. наук, доцент кафедры Радиотехники и телекоммуникаций, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

³Канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отделения, Казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», Запорожье, Украина

⁴Начальник отдела, Казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», Запорожье, Украина

ФОРМИРОВАТЕЛЬ КЛАССИФИЦИРОВАННОЙ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ПРИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБРАБОТКЕ РАДІОЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ПОМЕХИ

Актуальность. В условиях воздействия комбинированных помех эффективность работы радиолокационных средств существенно ухудшается. Это обусловлено декорреляцией точечного источника активной помехи пространственно-распределенным характером пассивной помехи. Рассматриваются методы формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов пространственных фильтров.

Цель. Разработка эффективного метода формирования классифицированной обучающей выборки, порожденной активной маскирующей помехой, для пространственной обработки радиолокационных сигналов в условиях одновременного воздействия пассивных помех.

Методы. Научная новизна работы состоит в разработке нового метода формирования обучающей выборки, основанного на оценке ширины нормированной автокорреляционной функции в каждом элементе разрешения по дальности. Текущий анализ составляющих комбинированной помехи в каждом элементе разрешения повышает качество классификации составляющих помех и, как следствие, минимизирует влияние пассивной помехи на процесс адаптации пространственного фильтра.

Результаты. Рассмотрены теоретические и практические аспекты формирования классифицированной обучающей выборки. Разработана функциональная схема классификатора составляющих комбинированной помехи.

Выводы. Текущий анализ составляющих комбинированной помехи в каждом элементе разрешения по дальности повышает качество классификации помех, что важно в условиях сложной гидрометеорологической обстановки.

Ключевые слова: обработка радиолокационных сигналов, адаптивная пространственная фильтрация, комбинированная помеха, классифицированная обучающая выборка, нормированная автокорреляционная функция, функциональная схема.

REFERENCES

1. Shirman Ja. D., Golikov V. N., Busygin I. N. i dr.; pod obshh. red. Ja. D. Shirmana. Teoreticheskie osnovy radiolokacii: ucheb. posobie dlja vuzov. Moscow, Sov. radio, 1970, 560 p.
2. Radioelektronnye sistemy: Osnovy postroenija i teorija. Spravochnik. Izd. 2-e, pererab. i dop.: Pod red. Ja. D. Shirmana. Moscow, Radiotekhnika, 2007, 512 p.
3. Zhuravl'ov A. K., Hlebnikov V. A. i dr. Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshetkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
4. Bepalov D. P. i dr.; red.: Surygina L. K. Atlas oblakov Feder. Sluzhba po gidrometeorologii i monitoringu okruzhajushhej sredy (Ros-gidromet), Gl. geofiz. observatorija im. A. I. Voejkova. Sankt-Peterburg, D'ART, 2011, 248 p.
5. Rjabuha V. P., Rachkov D. S., Semenjaka A. V., Katjushin E. A. Ocenka intervala fiksacii prostranstvennogo vesovogo vektora pri posledovatel'noj prostranstvenno-vremennoj obrabotke signalov na fone kombinirovannyh pomeh, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2012, No. 10, pp. 13–25.
6. Zalevskij A. P., Piza D. M., Presnjak I. S., Sirenko A. S. Ocenka jeffektivnosti prostranstvenno-vremennoj i vremja-prostranstvennoj fil'tracii signalov v kogerentno-impul'snyh RLS, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2012, No. 2, pp. 39–44. DOI: <http://dx.doi.org/10.15588/1604-3274-2012-7>.
7. Tejlor Dzh.U., Bruniks G. Novaja dispetcherskaja RLS ASR-9 [Tekst], *TIIJeR*, 1985, Vol. 73, No. 2, pp. 284–289.
8. Maj I. D., Kaspirovich A. G., Vinnik V.A.i dr.Radiolokacionnaja stancija 36D6M. Jekspluatacija i tehničeskoe obsluzhivanie [Tekst]: ucheb. posobie. Zaporozh'e, KP «NPK «Iskra», 140 p.
9. Uidrou B., Stirnz S. Adaptivnaja obrabotka signalov : per. s angl. Moscow, Radio i svjaz', 1989, 440 s.
10. Kononovich V. Ja., Kukol'nic'kij A. P., Zalevs'kij O. P., Kaspirovich O. G.; Majster Ju. L., Deneka A. A.; Pat. 48705 Ukraïna, MPK G01 S 7/36 H04B 15/00. Sposib kompensacii aktivnoï skladovoï kombinovanoï zavadi [Tekst]. Kazenne pidpriemstvo "Naukovo-virobnichij kompleks "Iskra". № u200911296; Zajavl. 2009.11.06; Opubl. 2010.03.25, Bjul. №6, 2010 r, 4 p.
11. Piza D. M., Zalevs'kij O. P., Rudik O. V. Pat. 59472 Ukraïna, MKI G01S 7/3b. Sposib zahistu kogerentno-impul'snoï RLS vid kombinovanih zavad [Tekst]; zajavnik ta patentovlasnik. Zaporiz'kij nacional'nij tehničnij universitet; zajavl. 28.08.2011; opubl. 10.05.2011, Bjul. № 9.
12. Piza D. M., Sirenko A. S.; Pat. 78120 Ukraïna, MPK G01S 7/36 Sposib zahistu kogerentno-impul'snih radiolokacijnih stancij vid kombinovanih zavad [Tekst]. Zaporiz'kij nacional'nij tehničnij universitet; zajavl. 28.08.2012; opubl. 11.03.2013, Bjul. № 5.
13. Gonorovskij I. S. Radiotekhnicheskie cepi i signaly. Uchebnik dlja vuzov. Moscow, Sov. radio, 1977, 608 p.
14. Rabiner L., Gould B. Teorija i primenenie cifrovoj obrabotki signalov. Moscow, Mir, 1978, 444 p.
15. Lehovickij D. I., Rjabuha V. P., Zhuga G. A. SDC v impul'noyh RLS: 1. Fizicheskij smysl i jekstremal'nye svojstva operacij optimal'noj mezhduperiodnoj obrabotki gaussovyh signalov na fone gaussovyh passivnyh pomeh, *Prikladnaja radioelektronika*, 2011, Tom 10 No. 4.
16. Piza D. M., Zvjagincev E. A., Moroz G. V. Metod kompensacii aktivnoj sostavljajushhej kombinirovannoï pomehi v kogerentno-impul'snoj RLS [Tekst], *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2016, No. 6, pp. 23–29. DOI:10.20535/S0021347016060030

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

УДК 625.113:514.18

Борисенко В. Д.¹, Устенко С. А.², Устенко І. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені
В.О. Сухомлинського, Миколаїв, Україна

²Д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені
В.О. Сухомлинського, Миколаїв, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного
університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ПЕРЕХІДНИХ КРИВИХ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

Актуальність. Питання геометричного моделювання перехідних кривих, які влаштовуються між прямолінійними і круговими ділянками залізничних колій, можна вважати розв'язаним у достатньому ступені. Але існує ряд чинників, що сприяють розробці нових методів моделювання цих важливих ділянок залізничних шляхів. Основними з них є підвищення швидкості руху потягів, збільшення їх маси, обмеженість розмірів території, на якій будується залізнична колія тощо. Важливість цього питання суттєво зростає при прокладці рейок в гірській місцевості, коли потягам доводиться долати підйоми і спуски, огинати природні та штучні перепони. За цих обставин перехідні криві набувають просторового характеру.

Мета. Подальший розвиток методу геометричного моделювання просторових перехідних кривих, які влаштовуються між прямолінійними та круговими ділянками залізничних колій, розташованих у двох паралельних площинах.

Метод. Перехідні ділянки залізничного шляху моделюються із застосуванням параметричних кривих, в яких за параметр приймається довжина дуги кривої. Для замкнення математичної моделі перехідних кривих приймається, що кривина кривої підпорядковується поліноміальній залежності четвертого степеня, а скруту – другого степеня. Невідомі коефіцієнти цих поліноміальних залежностей, які необхідні для розрахунку координат модельованих перехідних кривих, визначаються числовим методом, зокрема, мінімізацією функціоналу, за який приймається відхилення проміжно отриманої кінцевої точки перехідної кривої від заданої.

Результати. На підставі запропонованих теоретичних положень розроблено програмний код розрахунку та візуалізації просторових перехідних кривих, які забезпечують плавний перехід від прямолінійних ділянок залізничного шляху до кругових за умови, що обидві ці ділянки знаходяться в паралельних площинах.

Висновки. Запропоновано новий метод моделювання просторових перехідних кривих залізничних колій, які прокладаються на місцевості зі складних рельєфом. Практичною реалізацію багатьох варіантів просторових перехідних кривих, що влаштовуються між прямолінійною і круговою ділянками залізничного шляху, доведена працездатність методу їх геометричного моделювання.

Ключові слова: просторова перехідна крива, залізнична колія, геометричне моделювання, натуральна параметризація, кривина, скрут.

НОМЕНКЛАТУРА

K – кривина кривої;

S – довжина перехідної кривої;

s – криволінійна координата;

χ – скрут кривої;

$a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ – коефіцієнти розподілу кривини;

a_2, b_2, c_2 – коефіцієнти розподілу скруту;

Δ – цільова функція;

φ – кут нахилу дотичної;

ψ – кут відхилення кривої від дотичної площини.

ВСТУП

Залізничний шлях на перший погляд має дуже просту геометрію у вигляді двох паралельних рейок, але насправді йому притаманні певні геометричні особливості, обумовлені як рельєфом місцевості, наявністю населених пунктів, так і силовою взаємодією рейок з колісними парами локомотивів і вагонів.

У цілому шлях можна розглядати як сукупність прямих і кривих ділянок різної протяжності та різного радіуса округлення. При цьому можливі ділянки з підйомом

або спуском шляху, що примушує розглядати його як об'єкт просторовий.

Між прямими та кривими ділянками залізничного шляху влаштовують так звані перехідні криві, які використовуються для того, щоб кривина рейок в місці сполучення елементів шляху з різною кривиною змінювалася плавно, а не стрибкоподібно. Перехідні криві застосовуються між прямою та круговою ділянками шляху, між круговими ділянками різних радіусів або круговими ділянками, спрямованими в різні сторони у вигляді літери *S*.

При різкій зміні кривини шляху поперечні сили, які діють на транспортний засіб, змінюються стрибкоподібно, що призводить до підвищеного динамічного впливу на рейки та колеса вагонів і локомотиву, збільшуючи їх знос, підвищує ймовірність сходу з рейок і перекидання транспортного засобу, скорочує термін служби шпал, а також викликає дискомфорт у пасажирів.

Перехідну криву між прямою та круговою ділянками шляху проектує таким чином, щоб у своєму початку вона мала кривину, що дорівнює нулю, а потім плавно її змінювала, наприкінці сягаючи значення, зворотного радіусу криволінійної ділянки шляху. Оскільки перехідна крива є частиною віражу, на ній забезпечується наростаючий поперечний ухил дорожнього полотна (підйом зовнішнього рейки на рейкових дорогах) до рівня, рівного ухилу на круговій кривій (і навпаки для сходу з віражу).

Особливо важливим є влаштування перехідних кривих при високих швидкостях руху потягів, застосуванні колійних кривих малого радіуса, важкому рухомому складі, проходженні довгобазового рухомого складу.

Щоб задовольнити своєму основному призначенню, перехідна крива має відповідати вказаним вище умовам стосовно кривини в початковій і кінцевій точках, подібні умови подаються і до скруту, що дуже важливо для просторових кривих.

Треба зазначити, що в різних країнах протяжність криволінійних ділянок залізничного шляху може сягати 25 та більше відсотків загальної довжини мережі. У Німеччині та Швейцарії протяжність криволінійних ділянок залізничного шляху сягає 37 %, у Франції – приблизно 31%. Але на деяких окремих шляхах питома вага криволінійних ділянок може доходити до 50%. У першу чергу, це відноситься до тих залізничних шляхів, які прокладені в гірській місцевості. Ці статистичні дані підтверджують актуальність і важливість розробки нових підходів до влаштування перехідних кривих.

Отже, об'єктом цього дослідження є геометричне моделювання просторових перехідних кривих залізничних колій. Предметом дослідження є просторові перехідні криві залізничних колій.

Метою цієї роботи є подальший розвиток методу геометричного моделювання просторових перехідних кривих, які влаштовуються між прямолінійними та круговими ділянками залізничних колій, розташованих у двох паралельних площинах.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Ця робота присвячена розробці нового підходу до геометричного моделювання перехідних кривих залізничного шляху, які влаштовуються на ділянках спуску

або підйому потягів, коли початок і кінець перехідної кривої знаходяться на різній висоті. Перехідна крива має моделюватися в натуральній параметризації, що надає можливості шляхом відповідного вибору залежностей кривини та скруту від довжини дуги модельованої кривої впливати на ці важливі диференціальні характеристики просторової кривої, забезпечувати бажані умови їх моделювання.

Відомі в практиці проектування залізничних шляхів перехідні криві описуються кривими, які не в повній мірі відповідають сучасним вимогам, обумовленим зростанням швидкості руху потягів, їх маси, а для пасажирських високошвидкісних потягів забезпечення підвищеного комфорту для пасажирів.

Для розв'язання задачі, пов'язаної з геометричним моделюванням просторової перехідної кривої мають бути задані координати x , y і z початкової і кінцевої її точок, кути нахилу в них дотичних, а також радіус кола кругової ділянки. Треба визначити координати просторової перехідної кривої, для чого числовим методом знаходяться значення коефіцієнтів поліномів, якими описуються розподіли кривини та скруту модельованих кривих від довжини їх дуги. Вибір четвертого степеня для поліному, яким описується кривина, та другого степеня для скруту обумовлюється наявними граничними умовами. Так, в початковій точці перехідної кривої її кривина має дорівнювати нулю, а в кінцевій точці – величині, оберненій радіусу кола кругової ділянки.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Влаштуванню перехідних кривих в літературі приділено достатньо уваги [1–6]. Фактично це питання почало турбувати залізничників ще з самого початку експлуатації залізничних шляхів. Але на той час відносно невисокі швидкості руху потягів і невелика їх маса дозволяли миритися з певними негараздами, які обумовлювалися стрибкоподібною зміною кривини в місцях переходу від прямих рейок до кругових. Поступово зі зростанням швидкості руху потягів влаштуванню перехідних кривих почали приділяти більш серйозну увагу.

Зараз на залізничних шляхах при поданні перехідних кривих застосовують математичні криві, яким, треба відзначити, притаманні як певні переваги, так і недоліки. У сучасній практиці влаштування перехідних кривих можна виділити наступні криві:

- спіральну радіоїду (клотоїду) – криву зі змінною кривиною, зростаючою прямопропорційно її довжині (ця крива дуже часто застосовується на залізницях пост-радянського простору);
- кардіоїду – криву, яка має певні переваги перед клотоїдою, коли потяг на віражі змушений пригальмовувати;
- мажорантну, пружну, швидкісну криві;
- лемніскату Бернуллі;
- кубічну параболу (застосовується на невідповідальних ділянках шляху як простіша для розрахунків);
- Віденську дугу (нім.), яка краще інших кривих враховує динаміку руху транспортного засобу. Зокрема, вона перед поворотом трохи відхиляється в протилежний повороту бік з одночасним наростанням поперечного ухилу, щоб центр мас транспортного засобу, який піднімається над дорогою, увійшов в криву максимально гладко.

Відомо, що клотоїди, кубічні параболи, лемніскати Бернуллі та деякі інші криві, які застосовуються при моделюванні перехідних кривих, здійснюють більш менш плавне спряження графіків відцентрового прискорення на ділянках кривих, що спрягаються, але вони з незадовільним ступенем забезпечують неперервність зміни наростання відцентрового прискорення в стикових точках. У цих перехідних кривих на графіках наростання прискорення мають місце розриви неперервності. Це пояснюється тим, що вказані криві були отримані та вивчені аж ніяк не для цілей проектування залізничних шляхів. Вони значно пізніше почали досліджуватися для застосування в якості перехідних кривих. На той час вони задовольняли потребам проєктантів залізниць, що пояснюється не достатньо високими швидкостями руху потягів.

На завершення огляду літератури, треба зазначити, що всі вище перелічені криві за своєю геометрією є кривими плоскими, що в певній мірі ускладнює моделювання просторових перехідних кривих.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Оскільки ця робота присвячена перехідним кривим залізничних колій, що мають просторову форму, то спочатку розглянемо особливості моделювання просторових кривих в теоретичному плані. Візьмемо довільну ділянку просторового криволінійного обводу (рис. 1). На цьому рисунку застосовані наступні позначення: ds – диференціал дуги; $\varphi(s)$ – кут нахилу дотичної до кривої в поточній точці; $\psi(s)$ – кут відхилення кривої від дотичної площини в поточній точці, dx , dy , dz – прирости координат x , y і z , відповідно.

Моделювання просторової кривої будемо виконувати в натуральній параметризації, коли кривина і скрут кривої залежать від так званого натурального параметра, яким виступає довжина дуги кривої. Показаний на рис. 1 просторовий кривий відповідають певні графіки розподілу кривини $K(s)$ і скриту $X(s)$, визначені в залежності від довжини дуги обводу.

Згідно з теорією просторових кривих [7] їх кривина та скрут визначаються як швидкість зміни кутів нахилу дотичної φ та відхилення кривої від дотичної площини ψ , відповідно, тобто:

$$\frac{d\varphi}{ds} = K(s); \quad \frac{d\psi}{ds} = X(s). \quad (1)$$

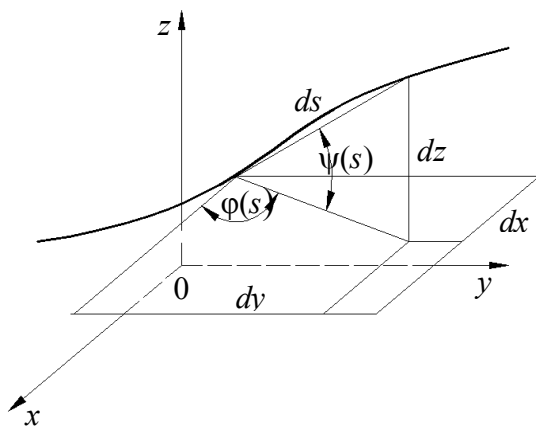


Рисунок 1 – Ділянка просторової кривої

Виражаючи з рівнянь (1) диференціали кутів та інтегруючи їх, можна знайти кут нахилу дотичної та кут відхилення кривої від дотичної площини в довільній точці кривої, що моделюється:

$$\varphi(s) = \varphi(0) + \int_0^s K(s) ds;$$

$$\psi(s) = \psi(0) + \int_0^s X(s) ds,$$

де $\varphi(0)$ і $\psi(0)$ – кути нахилу дотичної та відхилення кривої від дотичної площини в початковій точці кривої, відповідно.

З розгляду рис. 1 випливає [8], що

$$dx = ds \cos \psi(s) \cos \varphi(s);$$

$$dy = ds \cos \psi(s) \sin \varphi(s);$$

$$dz = ds \sin \psi(s).$$

Після інтегрування цих виразів отримують параметричні рівняння просторової кривої, в залежності від довжини дуги:

$$x(s) = x(0) + \int_0^s \cos \psi(s) \cos \varphi(s) ds;$$

$$y(s) = y(0) + \int_0^s \cos \psi(s) \sin \varphi(s) ds;$$

$$z(s) = z(0) + \int_0^s \sin \psi(s) ds.$$

Виконати розрахунки за наведеними вище виразами можна за умови, що відомі залежності розподілу кривини та скриту.

Розглянемо геометричне моделювання перехідної кривої, яка реалізує плавний перехід від прямолінійної ділянки залізничного шляху до кругової за умови, що обидві ці ділянки знаходяться в площинах, паралельних між собою.

Позначимо початкову і кінцеву точки перехідної кривої літерами A і B , відповідно (рис. 2). Їх координати застосовуються в якості вихідних даних при моделюванні перехідної кривої. Крім того, мають бути відомими кут φ_A – кут, утворений прямолінійною ділянкою з віссю

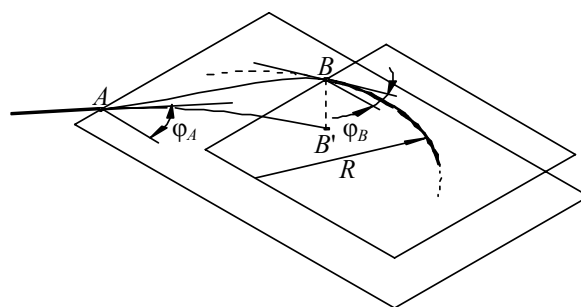


Рисунок 2 – Просторова перехідна крива

абсцис, і кут φ_B – кут, утворений дотичною до кругової ділянки також з віссю абсцис. З вихідними даними задається радіус R кругової ділянки. За умовами розв'язання поставленої задачі відхилення прямолінійної та кругової ділянок від площин, в яких вони знаходяться, тобто в точках A і B , дорівнюють нулю.

Попередній аналіз показав, що кривину K перехідної кривої доцільно описати поліномом четвертого степеня, а скрут X – поліномом другого степеня, тобто задати їх у такому вигляді:

$$K(s) = a_1 s^4 + b_1 s^3 + c_1 s^2 + d_1 s + e_1; \quad (2)$$

$$X(s) = a_2 s^2 + b_2 s + c_2, \quad (3)$$

де $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, a_2, b_2, c_2$ – невідомі параметри розподілів кривини та скруту, що знаходяться в процесі моделювання кривої; s – криволінійна координата.

Оскільки перехідна крива з'єднує прямолінійну та кругову ділянки, то в початковій точці A її кривина дорівнює нулю, а в кінцевій точці B – величині, оберненій радіусу кривини кругової ділянки, тобто $1/R$.

Запишемо вираз похідної від рівняння кривини:

$$\frac{dK}{ds} = 4a_1 s^3 + 3b_1 s^2 + c_1 s + d_1. \quad (4)$$

Залежність для визначення кута нахилу дотичної в точці B має вигляд:

$$\varphi_B = \varphi_A + \frac{a_1 S^5}{5} + \frac{b_1 S^4}{4} + \frac{c_1 S^3}{3} + \frac{d_1 S^2}{2} + e_1 S. \quad (5)$$

Підставляючи вихідні дані до виразів (2), (4) і (5), отримуємо:

$$e_1 = 0; \quad d_1 = 0;$$

$$b_1 = \frac{20}{3S} \left(\frac{\Delta\varphi}{S^3} + \frac{K_B}{5S^2} - \frac{c_1}{3} \right);$$

$$a_1 = - \left(\frac{K_B}{S^4} + \frac{b_1}{2S} \right),$$

де $K_B = \frac{\Delta\varphi}{R}$, $\Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$; S – довжина перехідної кривої між точками A і B .

Вираз для визначення кута ψ відхилення кривої від дотичної площини в точці B знаходять інтегруванням залежності (3):

$$\psi_B = \psi_A + \frac{a_2 S^3}{3} + \frac{b_2 S^2}{2} + c_2 S.$$

Визначимо з цього виразу коефіцієнт a_2 за умови, що ψ_A і ψ_B згідно з вихідними даними дорівнюють нулю

$$a_2 = - \frac{3}{2S^2} (b_2 S + 2c_2).$$

Таким чином, для моделювання просторової перехідної кривої треба знати коефіцієнти c_1, b_2 і c_2 , а також довжину дуги S .

Визначення цих невідомих величин реалізуємо шляхом розв'язання задачі мінімізації, в якій за цільову функцію приймемо відхилення проміжно отриманої кінцевої точки перехідної кривої від заданої точки B :

$$\Delta = \sqrt{(x_B - x_K)^2 + (y_B - y_K)^2 + (z_B - z_K)^2}.$$

У цьому виразі індекс «к» відповідає кінцевій точці проміжно змодельованої кривої.

Для мінімізації записаного функціоналу застосовано високоефективний алгоритм, запропонований Хуком-Дживсом [9] і призначений для мінімізації функції багатьох змінних. Перевагою цього алгоритму є те, що він не передбачає визначення частинних похідних від функції, яка мінімізується. Загально відомо, що саме частинні похідні при числовому їх знаходженні дуже часто затрудняють пошук оптимальних параметрів, оскільки їх визначенню притаманні певні коливання і, навіть, похибки.

Алгоритм Хука-Дживса також не передбачає наявності обласних обмежень параметрів, що оптимізуються. Це є дуже важливим для розв'язання задач, коли межі варіювання параметрів невідомі.

При розв'язанні задачі мінімізації задається вихідна точка в просторі параметрів, що оптимізуються. Процес розрахунків закінчується, коли кінцева точка проміжно кривої наближається до заданої точки з наперед обумовленою точністю.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На підставі запропонованого методу моделювання просторових перехідних кривих розроблено програмний код, застосування якого дозволяє проводити обчислювальний експеримент з візуалізацією отриманих графічних результатів.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті проведених обчислювальних експериментів отримані результати, наведені нижче у графічному вигляді.

На рис. 3 показані перехідні криві, побудовані за умови, що варіюється кут нахилу дотичної в початковій точці в межах від 30° до 50° з кроком 5° . Слід зазначити, що при менших значеннях кута, що варіюється, отримані перехідні криві в горизонтальній проекції в певній мірі нагадують так звану Віденську дугу.

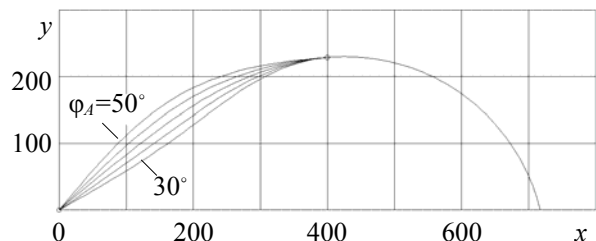


Рисунок 3 – Перехідні криві в плані в залежності від кута нахилу дотичної в початковій точці

Виконання поставлених умов до моделювання просторових перехідних кривих можна побачити на рис. 4, де показані фронтальні і горизонтальні проекції кривих, розглянутих вище на рис. 3. Щодо рис. 4, то на ньому застосовано розташування координатних осей, притаманних комплексним кресленням нарисної геометрії. Фронтальні проекції перехідних кривих чітко свідчать про те, що їх лінійні і кругові ділянки розташовані у паралельних площинах.

Для більшої інформативності на рис. 5 показані просторові перехідні криві, які отримані із застосуванням розробленої програми та візуалізовані у середовищі проектування AutoCAD завдяки сформованим у розробленій програмі так званих *script*-файлів. Представлені на цьому рисунку результати відображають вплив кута нахилу дотичної в початковій точці. Вони отримані із застосуванням можливостей 3D моделювання середовища проектування AutoCAD.

На рис. 5 виділені тільки криволінійні ділянки залізничного шляху, тобто безпосередньо перехідні криві.

Вплив кута нахилу дотичної в кінцевій точці перехідної кривої продемонстровано на рис. 6. Цей кут зменшувався у межах від 15° до -5° з кроком -5° .

Графічні результати, наведені на рис. 3–6, отримані за умови, що кінцева точка *B* перехідних кривих свого положення не змінювала.

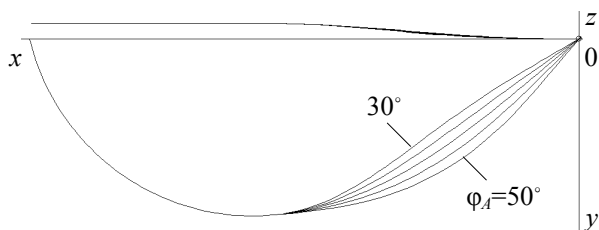


Рисунок 4 – Фронтальні і горизонтальні проекції перехідних кривих, отримані при варіюванні кута нахилу дотичної в початковій точці

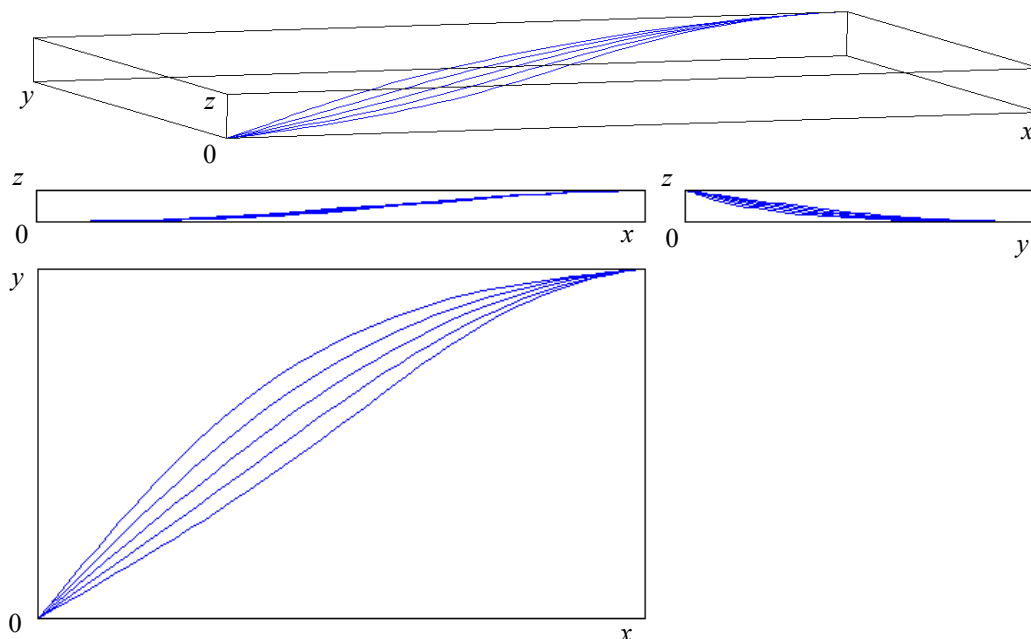


Рисунок 5 – Аксиометрична та ортогональні проекції просторових перехідних кривих

Вплив же зміни положення кінцевої точки перехідних кривих показано на рис. 7. Ці дані візуально підтверджують можливість моделювання перехідних кривих при зміні положення кінцевих точок цих кривих.

Таким чином, розроблено новий підхід до геометричного моделювання перехідних кривих у просторі, що базується на застосуванні поліномів четвертого степеня для розподілу кривини та другого степеня для розподілу скруту. За граничні умови беруться координати кінця прямолінійної ділянки залізничного шляху, значення кута нахилу цієї ділянки, радіус кругової ділянки, координати її початкової точки та кут нахилу дотичної в цій точці. Відхилення кривої від дотичної площини в кінцевих точках приймаються рівними нулю.

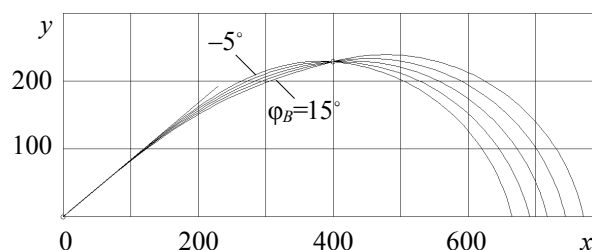


Рисунок 6 – Перехідні криві в залежності від кута нахилу дотичної в кінцевій точці

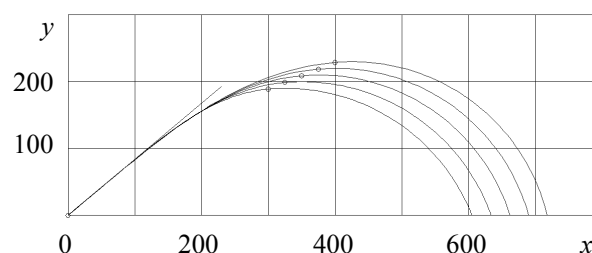


Рисунок 7 – Перехідні криві в залежності від положення кінцевої точки

Перехідні криві, отримані за запропонованим методом геометричного моделювання, можна використовувати для геометричного моделювання криволінійних обводів об'єктів у різних галузях промисловості, у тому числі при проектуванні перехідних кривих верхньої будови залізничної колії.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані в роботі результати мають не тільки теоретичний, але й практичний інтерес. Вони комплексно реалізують процес геометричного моделювання просторових перехідних кривих, забезпечуючи одночасно їх моделювання, як в горизонтальній, так і фронтальній площинах проєкцій, що, як вказувалося вище, суттєво ускладнено при застосуванні традиційних підходів до реалізації плавних переходів між прямими і круговими ділянками шляху, особливо коли вони розташовані у різних рівнях.

Подальші дослідження в сфері моделювання перехідних кривих мають бути спрямовані на ділянки шляху, де здійснюється плавний перехід між двома прямолінійними або двома круговими ділянками. Певний інтерес подає моделювання перехідних кривих між означеними ділянками шляху, розташованими у двох непаралельних площинах з різними кутами нахилу до горизонту.

ВИСНОВКИ

Запропоновано новий підхід до геометричного моделювання просторових перехідних ділянок залізничних колій, який базується на застосуванні кривих в натуральній параметризації та законів розподілу кривини і скруту у вигляді поліноміальних залежностей, невідомі коефіцієнти яких визначаються в процесі моделювання бажаної просторової перехідної кривої, що влаштовується між прямолінійною і круговою ділянками шляху, розташованими у двох паралельних площинах.

Борисенко В. Д.¹, Устенко С. А.², Устенко И. В.³

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії Николаевского национального университета имени В.А. Сухомлинского, Николаев, Украина

²Д-р техн. наук, доцент, заведуючий кафедрой комп'ютерной инженерии Николаевского национального университета имени В.А. Сухомлинского, Николаев, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения автоматизированных систем Национального университета кораблестроения имени адмирала Макарова, Николаев, Украина

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПЕРЕХОДНЫХ КРИВЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПУТЕЙ

Актуальность. Задачу геометрического моделирования переходных кривых, которые размещаются между прямолинейными и круговыми участками железнодорожных путей, можно считать решенной в достаточной степени. Однако существует ряд факторов, способствующих разработке новых методов моделирования этих важных участков железнодорожных путей. Основными из них являются повышение скорости движения поездов, увеличение их массы, ограниченность размеров территории, на которой строится железная дорога и др. Важность этого вопроса существенно возрастает при прокладке рельсов в горной местности, когда поездам приходится преодолевать подъемы и спуски, огибать природные и искусственные преграды. В этих условиях переходные кривые приобретают пространственный характер.

Цель. Дальнейшее развитие метода геометрического моделирования пространственных переходных кривых, которые размещаются между прямолинейными и круговыми участками железнодорожных путей, расположенных в двух параллельных плоскостях.

Метод. Переходные участки железнодорожного пути моделируются с применением параметрических кривых, в которых за параметр берется длина дуги кривой. Для замыкания математической модели переходных кривых принимается, что кривизна кривой подчиняется полиномиальной зависимости четвертой степени, а кручение – второй степени. Неизвестные коэффициенты этих полиномиальных зависимостей, необходимые для расчета координат моделируемых переходных кривых, определяются численным методом, в частности, минимизацией функционала, за который принимается отклонение промежуточно полученной конечной точки переходной кривой от заданной.

Результаты. На основании предложенных теоретических положений разработана программа расчета и визуализации пространственных переходных кривых, обеспечивающих плавный переход от прямолинейных участков железнодорожного пути к круговым при условии, что оба эти участка находятся в параллельных плоскостях.

ПОДЯКИ

Роботу виконано відповідно з тематичним планом наукових досліджень кафедри комп'ютерної інженерії Миколаївського національного університету імені В. О. Сухомлинського (0115U001250 «Розробка геометричних моделей кривих ліній і поверхонь та програмно-го продукту для їх побудови»).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Амелин С. В. Путь и путевое хозяйство / С. В. Амелин, Л. М. Дановский. – М. : Транспорт, 1986. – 215 с.
2. Ельфинов Г. В. Теория переходных кривых [текст] / Г. В. Ельфинов. – М. : Трансжелдориздат, 1948. – 31 с.
3. Лагута В. В. Удосконалення проектування кривих залізничної колії в плані [текст] : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.22.06 «Залізнична колія» / В. В. Лагута. – Дніпропетровськ, 2002. – 18 с.
4. Лазарян В. А. О форме переходной кривой (Теоретические основы выбора рациональной формы переходной кривой) [текст] / В. А. Лазарян. – Динамика транспортных средств. – Киев : Наукова думка, 1985. – С. 10–24.
5. Шахунянц Г. М. Проектирование железнодорожного пути / Г. М. Шахунянц. – М. : Транспорт, 1972. – 140 с.
6. Lipicnik M. New form of road/railway transition curve / M. Lipicnik // Journal of transportation engineering. – 1998. – November / December. – P. 546–556.
7. Рашевский А. В. Курс дифференциальной геометрии / А. В. Рашевский. – М. – Л. : ГОНТИ, 1939. – 360 с.
8. Устенко С. А. Геометрична теорія моделювання криволінійних форм лопаткових апаратів турбомашин з оптимізацією їх параметрів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.01.01 «Прикладна геометрія, інженерна графіка» / С. А. Устенко. – К., 2013. – 40 с.
9. Hooke R. Direct search solution of numerical and statistical problems [Text] / R. Hooke, T.A. Jeeves // Journal of the ACM. – 1961. – Vol. 8, No 2. – P. 212–229.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2017.

Після доробки 25.04.2017.

Выводы. Предложен новый метод моделирования пространственных переходных кривых железнодорожных путей, которые прокладываются на местности со сложным рельефом. Практической реализацией многих вариантов пространственных переходных кривых, размещаемых между прямолинейным и круговым участками железнодорожного пути, доказана работоспособность метода их геометрического моделирования.

Ключевые слова: пространственная переходная кривая, железная дорога, геометрическое моделирование, натуральная параметризация, кривизна, кручение.

Borisenko V. D.¹, Ustenko S. A.², Ustenko I. V.³

¹Dr. Sc., Professor of Computer Engineering Department of V.O. Sukhomlynsky Mykolayiv National University, Mykolayiv, Ukraine

²Dr. Sc., Associate Professor, Head of Computer Engineering Department of V.O. Sukhomlynsky National University, Mykolayiv, Ukraine

³ Phd., Associate Professor of software of the automated systems department of Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv, Ukraine

GEOMETRIC MODELLING OF RAILWAYS SPATIAL TRANSITION CURVE

Context. The problem of geometric modelling of transitional curves, which are placed between rectilinear and circular sections of railway tracks, can be considered solved sufficiently. However, there are a number of factors that contribute to the development of new methods for modelling these important sections of the railway tracks. The main of them are the increase in the speed of the train, the increase in their mass, the limited size of the territory on which the railway is built, etc. The importance of this issue is greatly increased when laying rails in a mountainous area, when trains have to overcome the ups and downs, bend around natural and artificial obstacles. Under these conditions, the transition curves acquire a spatial character.

Objective. Further development of the method of geometric modelling of spatial transition curves, which are placed between rectilinear and circular sections of railway tracks located in two parallel planes.

Method. Transitional sections of the railway track are modelled using parametric curves, in which the length of the curve arc is taken as the parameter. To close the mathematical model of the transition curves, it is assumed that the curvature of the curve is subject to a polynomial dependence of the fourth degree, and torsion to the second degree. The unknown coefficients of these polynomial dependencies, which are necessary for calculating the coordinates of the simulated transition curves, are determined by a numerical method, in particular, by minimization of the functional for which the deviation of the intermediate obtained final point of the transition curve from the given one is accepted.

Results. On the basis of the proposed theoretical proposition, a program code for calculating and visualizing spatial transition curves providing a smooth transition from rectilinear sections of a railway track to a circular one is developed, provided that both these sections are in parallel planes.

Conclusions. A new method is proposed for modelling the spatial transition curves of railway tracks, which are laid on the terrain with a complex relief. Practical implementation of many variants of spatial transition curves placed between the rectilinear and circular sections of the railway track has proved the operability of the method of their geometric modelling.

Keywords: spatial transition curve, the railways, geometric modeling, natural parameterization, curvature, torsion.

REFERENCES

1. Amelin S. V., Danovskij L. M. Put' i putevye hozjajstvo. Moscow, Transport, 1986, 215 p.
2. El'fimov G. V. Teoriya perehodnyh krivyh. Moscow, Transzheldorizdat, 1948, 31 p.
3. Laguta V. V. Udoskonalennja proektuvannja kryvyh zaliznychnoi' kolii' v plani [tekst]: avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja kand. tehn. nauk: spec. 05.22.06 "Zaliznychna kolija". Dnipropetrovs'k, 2002, 18 p.
4. Lazarjan V. A. O forme perehodnoj krivoj (Teoreticheskie osnovy vybora racional'noj formy perehodnoj krivoj). Dinamika transportnyh sredstv. Kiev, Naukova dumka, 1985, pp. 10–24.
5. Shahunjanc G. M. Proektirovanie zheleznodorozhnogo puti. Moscow, Transport, 1972, 140 p.
6. Lipicnik M. New form of road/railway transition curve, *Journal of transportation engineering*, November / December, 1998, pp. 546–556.
7. Rashevskij A. V. Kurs differencial'noj geometrii. Moscow-Leningrad, GONTI, 1939, 360 p.
8. Ustenko S. A. Geometrychna teoriya modeljuvannja kryvolinijnyh form lopatkovyh aparativ turbomashyn z optymizacijeu i'h parametriv: avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk: spec. 05.01.01 "Prykladna geometrija, inzhenerna grafika". Kiev, 2013, 40 p.
9. Hooke R., Jeeves T. A. Direct search solution of numerical and statistical problems, *Journal of the ACM*, 1961, Vol. 8, No. 2, pp. 212–229.

¹Д-р техн. наук, старший науковий співробітник, професор кафедри програмного забезпечення Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу геоелектромагнітних методів Карпатського відділення Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАНУ, Львів, Україна

РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ПРУЖНОДИНАМІЧНОЇ ЗАДАЧІ У ПОРИСТОМУ ФЛЮІДОНАСИЧЕНОМУ КУСКОВО-ОДНОРІДНОМУ ПІВПРОСТОРІ НЕПРЯМИМ МЕТОДОМ ПРИГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Актуальність. Розв'язуючи різноманітні прикладні задачі інженерної та нафтогазової геології, геофізики та геодинаміки, дослідники часто використовують методи, що базуються на явищі сейсмoeлектричного ефекту 2 роду, оскільки електромагнітне поле електрокінетичного походження набагато інформативніше, ніж сейсмічне, що його породило, і дозволяє визначати важливі петрофізичні параметри (наприклад, пористість та флюїдопроникність) геологічного середовища. На першому етапі дослідження цього ефекту виникає необхідність розв'язування пружнодинамічної задачі, об'єктом дослідження якої є процеси поширення пружних хвиль у пористих вологонасичених кусково-однорідних середовищах. Ця задача також має самостійне значення при моніторингу екобезпеки, зокрема, деформаційних процесів в ґрунтових масивах (особливо у гірських районах), які пов'язані з їх просіданням внаслідок карстопроявів, землетрусів, фільтрації атмосферних опадів на схилах та іншими явищами.

Мета роботи. Побудова математичної моделі поширення пружних хвиль у кусково-однорідних середовищах; створення програмних засобів для її числової реалізації та апробація її ефективності; проведення числових досліджень залежності розподілу компонент переміщень на границі півпростору від параметрів середовища.

Метод. Для створення математичної моделі задачі використано теорію Біо, а для побудови її числово-аналітичного розв'язку – непрямий метод приграничних елементів, який базується на теорії методів граничних інтегральних рівнянь.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує метод приграничних елементів для чисельно-аналітичного моделювання пружнодинамічної задачі, та обґрунтовано його ефективність. Проведено обчислювальні експерименти для оцінки похибок дискретизації приграничної області та апроксимації математичної моделі.

Висновки. Досліджено вплив зміни флюїдопроникності та пористості включення у формі паралелепіпеда на розподіл компонент переміщень на границі півпростору. Наведено практичні рекомендації по розпізнаванню включень.

Ключові слова: непрямий метод приграничних елементів, сейсмoeлектричний ефект 2-го роду, пружнодинамічна задача, кусково-однорідні середовища Біо, поперечні хвилі, поздовжні хвилі.

НОМЕНКЛАТУРА

НМГЕ – непрямий метод граничних елементів та;

НМППЕ – непрямий метод приграничних елементів;

СЕ – сейсмoeлектричний ефект;

СЛАР – система лінійних алгебричних рівнянь;

СФР – спеціальний фундаментальний розв'язок;

K_m, K_{mf}, K_{mc} – модулі всестороннього стиску твердої фази, рідкої фази, сухого скелету;

R^3 – півпростір;

P – хвилі (первинні хвилі) – поздовжні або компресійні хвилі;

$P_m, Q_m, R_m, D_m^s, D_m^p$ – коефіцієнти з рівняння Біо;

S – хвилі (вторинні хвилі, хвилі зсуву) – поперечні хвилі;

$U^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$ та $U_h^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$ – фундаментальний та спеціальний фундаментальний розв'язок;

$U_{,l}^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$, $U_{h,l}^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$ – похідні по l компоненті від $U^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$ та $U_h^{mq}(\mathbf{x}, \xi)$;

V – кількість приграничних елементів;

$d_{kv}^{(mq)}$ – компоненти функцій невідомих переміщень

на елементі v у Ω_m для типу хвиль q ;

h – товщина приграничної області;

k_{m0} та $k_m(\omega)$ – проникність в стаціонарному полі та у Ω_m ;

k_{ms}, k_{mpj} – хвильові числа з рівняння Гельмгольца у

Ω_m для S хвиль та Pj ;

$n_l(\mathbf{x})$ – компоненти зовнішньої однозначно визначеної нормалі до межі геосередовища Ω_1 ;

$\mathbf{u}^{(m)}, \mathbf{u}_f^{(m)}$ – переміщення твердої й рідкої фаз середовища та включення у Ω_m ;

$u_{gk}^{(mq)}$ – компоненти функції джерела;

v – номер елементу;

$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$ – декартові координати;

Ω – півпростір;

Ω_m – область з номером m ;

Γ та Γ_m – границя півпростору та границя Ω_m ;

Δ та δ – абсолютна та відносна похибки;

α_{mj} та β_m – швидкості j -ї поздовжньої та поперечної хвиль у Ω_m ;

$\alpha_{m\infty}$ – звивистість пор у Ω_m ;

η_m – в'язкість рідини у Ω_m ;

μ_{mc} – модуль зсуву скелету у Ω_m ;

ρ_{mf} та ρ_m – густина рідкої та твердої фази;

ϕ_m – пористість середовища у Ω_m ;

$\sigma_{Bkl}^{(1q)}(\mathbf{x})$ – компоненти тензора напружень;

ω_{mb} – критична частота Біо у Ω_m

ω – частота.

ВСТУП

Земна кора є пористою поліфазною структурою складної будови, яка містить тверду, рідку і газоподібну фази і знаходиться в енергетично нестійкому стані. У ній, внаслідок дії пружних фізичних полів природного чи штучного походження, виникають різноманітні складні фізико-хімічні процеси, які, у свою чергу, спричиняють вторинне багатокомпонентне електромагнітне поле. Таке явище називають сейсмоелектричним ефектом (СЕ) другого роду. Основна галузь його застосування – це вивчення верхньої частини геологічного розрізу при розв'язуванні малоглибинних інженерних екологічних та гідро-геологічних задач та каротажні дослідження нафтогазових та гідрогеологічних свердловин [1–6].

Як відомо з [7], розв'язок задачі сейсмоелектрики ґрунтується ефекту другого роду знаходиться в результаті спільного розв'язування пружно-динамічної задачі для пористого флюїдонасиченого середовища (задачі Біо), електрокінетичної задачі визначення сторонніх струмів, породжених відносним рухом рідкої і твердої фази в середовищі Біо, та електродинамічної задачі визначення електромагнітного поля, породженого цими сторонніми струмами (рівнянь Максвелла). При цьому вивчаються характеристики пружних хвиль, які по-різному залежать від петрофізичних, пружних та електричних властивостей середовища і тому здатні надати різноманітну і багату геофізичну інформацію, зокрема, відомості про пористість та проникність гірських порід, про тип флюїду у породі та про його мінералізацію. Пружно-динамічна задача полягає у визначенні усіх компонент переміщень трьох пружних хвиль: однієї поперечної S хвилі та двох поздовжніх $P1$ та $P2$ хвиль.

Дана робота присвячена першому з цих етапів – створенню математичних моделей процесу поширення пружних хвиль у кусково-однорідних тривимірних середовищах Біо та розробці методики розв'язування відповідної пружно-динамічної задачі. Беручи до уваги складність структури земної кори та подальшу мету – вивчення сейсмоелектричного ефекту 2-го роду, отримані моделі повинні достатньо точно описувати геометрію тривимірних об'єктів досліджень, дозволяти швидко й легко змінювати їх фізичні параметри та вивчати зміни характеристик поля, які при цьому відбуваються. Аналітичні розв'язки пружно-динамічної задачі можливі лише для обмеженого кола одномірних моделей розрізів – однорідних або шаруватих. Тому актуальним завданням є використання різних чисельних методів, зокрема непрямого методу приграничних елементів, який добре себе зарекомендував при розв'язуванні різних задач математичної фізики у тривимірних кусково-однорідних областях складної форми [8].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо кусково-однорідний пористий півпростір, що займає у декартовій системі координат x_1, x_2, x_3 об-

ласть $\Omega = R^3 = \{(x_1, x_2, x_3) : -\infty < x_1 < \infty, -\infty < x_2 < \infty, -\infty < x_3 < 0\}$ і містить включення Ω_2 , вибране у формі паралелепіпеда. Геосередовище $\Omega_1 = \Omega \setminus (\Omega_2 \cup \Gamma_2)$ та включення перебувають в ідеальному механічному контакті, причому $\Gamma_2 \cap \Gamma = \emptyset$, Γ_2 – межа включення Ω_2 , $\Gamma = \{(x_1, x_2, x_3) : -\infty < x_1 < \infty, -\infty < x_2 < \infty, x_3 = 0\}$ – денна поверхня.

Вхідні дані. Кожна зона Ω_m ($m=1,2$) має постійні, але різні, фізичні характеристики: модуль зсуву скелету μ_{mc} , модулі всестороннього стиску твердої й рідкої фаз і сухого скелету порід K_m, K_{mf}, K_{mc} , пористість середовища ϕ_m , звивистість пор $\alpha_{m\infty}$, густину рідкої й твердої фаз ρ_{mf}, ρ_m , в'язкість рідин η_m . Флюїдопроникність середовища і включення $k_m(\omega)$ залежить від частоти ω .

Виходячи з рівнянь Біо та беручи до уваги лінійне наближення залежності між переміщеннями рідкої і твердої фаз, одержимо векторні рівняння Гельмгольца для компонент переміщень твердої фази поперечної та двох поздовжніх хвиль у кожній складовій півпростору:

$$\Delta \mathbf{u}^{(ms)}(\mathbf{x}) - k_{ms}^2 \mathbf{u}^{(ms)}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_g^{(ms)}(\mathbf{x}),$$

$$\Delta \mathbf{u}^{(mpj)}(\mathbf{x}) + k_{mpj}^2 \mathbf{u}^{(mpj)}(\mathbf{x}) = \mathbf{u}_g^{(mpj)}(\mathbf{x}), \quad (1)$$

де $k_{ms}^2 = \frac{\omega^2}{\beta_m^2}$, $k_{mpj}^2 = \frac{\omega^2}{\alpha_{mj}^2}$, β_m^2 – швидкості поперечних

хвиль, α_{mj}^2 ($j=1,2$) – швидкості поздовжніх хвиль [9].

Рівняння (1) доповнимо крайовими умовами рівності нулю нормальної та тангенціальних компонент повного тензора напружень:

$$\sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(1s)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}) = 0, \quad \sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(1pj)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}) = 0,$$

$$k=1,2,3, \mathbf{x} \in \Gamma, \quad (2)$$

та умовами ідеального контакту на межах поділу середовищ, тобто неперервності нормальних і тангенціальних компонент вектора переміщень твердої фази та повного тензора напружень [10, 11]:

$$u_k^{(1s)}(\mathbf{x}) = u_k^{(2s)}(\mathbf{x}), \quad u_k^{(1pj)}(\mathbf{x}) = u_k^{(2pj)}(\mathbf{x}),$$

$$k=1,2,3, \mathbf{x} \in \Gamma_2, \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(1s)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(2s)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}),$$

$$\sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(1pj)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}) = \sum_{l=1}^3 \sigma_{Bkl}^{(2pj)}(\mathbf{x}) n_l(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \Gamma_2. \quad (4)$$

де $n_l(\mathbf{x})$ – компоненти вектора зовнішньої одиничної нормалі до Γ та межі контакту Γ_2 .

Вихідними даними є компоненти переміщень u_1, u_2, u_3 кожної з хвиль S, P_1, P_2 у будь-якій точці геосередовища Ω_1 , включення Ω_2 та на їх границях Γ та Γ_2 відповідно.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Основи теорії пружних хвиль в пористому двофазному середовищі заклали Я. І. Френкель [12], який дав перший теоретичний опис СЕ ефекту, що був відкритий в 1939 р. А.Г. Івановим [13, 14]. Рівняння, які описують поширення пружних хвиль в пористому волого-(чи газо-) насиченому середовищі сформулював у 1956 р. М. Біо [15].

Через півстоліття після роботи Я. І. Френкеля, С. Прайд [16] більш строго описав задачу сейсмоелектрики з допомогою взаємозв'язаної узгодженої системи рівнянь, яка об'єднувала рівняння Біо, електрокінетики і Максвелла. Пізніше в роботах [17, 18] було запропоновано простіше формулювання цієї задачі, яке враховує нехтування малим оберненим впливом електромагнітного поля на пружне і зводиться до послідовного розв'язування рівнянь Біо, електрокінетики і Максвелла. На даний час програмно реалізовані та досліджені сейсмоелектричні задачі для горизонтально і радіально-шаруватих середовищ та приведені розрахунки для типових моделей [7] з використанням методів інтегральних та інтегро-диференціальних рівнянь. У роботі [19] одержано аналітичні розв'язки в рамках низькочастотної моделі для горизонтально-шаруватого середовища. У роботі [20] викладено основи теорії Біо для опису пористо-пружних насичених рідиною середовищ і проаналізовано напрямки її розвитку, приведено коротке порівняння моделей Біо і моделі пористих середовищ, побудованих на основі теорії сумішей, та розглянуто хвильові задачі, розв'язані у рамках теорії Біо.

Як показує аналіз цих публікацій, на даний час у кусково-однорідних тривимірних областях складної форми пружно-динамічна задача не є розв'язана, і тому є актуальною.

Метод інтегральних рівнянь та створені на його базі прямі та непрямі методи граничних та приграничних [8] елементів мають низку беззаперечних переваг при моделюванні процесів у кусково-однорідних областях, оскільки точно задовольняють вихідні рівняння моделі, доступно описують необмежені і напівобмежені об'єкти та дозволяють моделювати складну поверхню геологічних об'єктів, що знаходяться у земній корі, обмежуються дискретизацією тільки границі об'єкта та меж поділу середовища, дають високу точність обчислень у внутрішніх НМГЕ та прилежових (НМПГЕ) точках.

У НМГЕ та НМПГЕ інтегральні зображення вихідного диференціального рівняння записуються через згортку його фундаментального сингулярного розв'язку з інтенсивностями «фіктивних» джерел, розподіленими на межі об'єкта або в зовнішній приграничній до нього області. Самі по собі функції інтенсивності не мають певного фізичного сенсу, але, коли вони знайдені, значення шуканої функції усередині тіла можуть бути отримані за їх допомогою простим інтегруванням.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для знаходження розв'язків задачі (1)–(4) використовуємо НМПГЕ [8]. Для кожного m розв'язок $u_k^{(mq)}$ шукаємо

в просторі R_m^3 . З цією метою розглянемо області $B_m \subset R_m^3$ такі, що $\Omega_m \subset B_m$, $\partial\Omega_m \cap \partial B_m = \emptyset$. У приграничних областях $G^m = B_m \setminus \Omega_m$ введемо приграничні елементи G_v^m ($v = 1, \dots, V_m$), які не перетинаються між собою, з невідомими компонентами «фіктивних» переміщень, апроксимованих постійними $d_{kv}^{(mq)}$ ($q \in \{s, p_1, p_2\}$).

З використанням НМПГЕ запишемо інтегральне зображення компонент вектора переміщень як розв'язків задачі (1)–(4), похідних від них за координатами та компонент тензора напружень:

$$\begin{aligned}
 u_k^{(1q)}(\mathbf{x}) &= \sum_{v=1}^V d_{kv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,l}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(1q)}), \\
 u_k^{(2q)}(\mathbf{x}) &= \sum_{v=1}^V d_{kv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{h,l}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi) + I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(2q)}), \\
 u_{k,l}^{(1q)}(\mathbf{x}) &= \sum_{v=1}^V d_{kv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,l}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(1q)}), \\
 u_{k,l}^{(2q)}(\mathbf{x}) &= \sum_{v=1}^V d_{kv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{h,l}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi) + I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(2q)}), \quad (5) \\
 \sigma_{Bkl}^{(1q)}(\mathbf{x}) &= \mu_{1c} \sum_{v=1}^V (d_{kv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,l}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + \\
 &\quad + d_{lv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,k}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi)) + \\
 &\quad + \mu_{1c} (I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(1q)}) + I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,k}^{(1q)})), \quad k \neq l, \\
 \sigma_{Bkk}^{(1q)}(\mathbf{x}) &= 2\mu_{1c} \sum_{v=1}^V d_{kv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,k}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + \\
 &\quad + D_1^q \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^3 d_{lv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,l}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + \\
 &\quad + D_1^q \sum_{v=1}^V \sum_{l=1}^3 d_{lv}^{(1q)} \int_{\gamma_v^1} U_{h,l}^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^1(\xi) + \\
 &\quad + 2\mu_{1c} I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,k}^{(1q)}) + D_1^q \sum_{l=1}^3 I_{gk}^{1q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(1q)}), \\
 \sigma_{Bkl}^{(2q)}(\mathbf{x}) &= \mu_{2c} \sum_{v=1}^V (d_{kv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{h,l}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi) + \\
 &\quad + d_{lv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{h,k}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi)) + \\
 &\quad + \mu_{2c} (I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{h,l}^{(2q)}) + I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{h,k}^{(2q)})), \quad k \neq l,
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{Bkl}^{(2q)}(\mathbf{x}) = & \mu_{2c} \sum_{v=1}^V (d_{kv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{,l}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi) + \\ & + d_{lv}^{(2q)} \int_{\gamma_v^2} U_{,k}^{(2q)}(\mathbf{x}, \xi) d\gamma_v^2(\xi)) + \\ & + 2\mu_{2c} I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{,k}^{(2q)}) + D_2^q \sum_{l=1}^3 I_{gk}^{2q}(\mathbf{x}, U_{,l}^{(2q)}), \quad (6) \end{aligned}$$

де $U^{(ms)}(\mathbf{x}, \xi) = U^{(ms)}(r) = \frac{\exp(-k_{ms}r)}{4\pi r}$, $U^{(mpj)}(\mathbf{x}, \xi) = U^{(mpj)}(r) = \frac{\exp(ik_{mpj}r)}{4\pi r}$ – фундаментальні розв’язки рівнянь (1) для простору, $r^2 = \sum_{l=1}^3 (x_l - \xi_l)^2$, $r'^2 = \sum_{l=1}^2 (x_l - \xi_l)^2 + (x_3 + \xi_3)^2$, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3) \in R^3$, $I_{gk}^{mq}(\mathbf{x}, \Phi) = \int_{\Omega_m} \Phi(\mathbf{x}, \xi) u_{gk}^{(mq)}(\xi) d\Omega_m(\xi)$, $U_h^{(1q)}(\mathbf{x}, \xi) = U^{(1q)}(r) + U^{(1q)}(r')$ – СФР рівнянь (1) для півпростору, які автоматично задовольняють крайову умову (2), $U_{,l}^{(mq)}(\mathbf{x}, \xi) = \partial U^{(mq)}(\mathbf{x}, \xi) / \partial x_l$, P_m, Q_m, R_m, D_m^q – обчислювальні параметри з рівняння Біо [20].

Для знаходження невідомих констант $d_{kv}^{(mq)}$, запишемо три системи лінійних алгебричних рівнянь, вимагаючи задоволення в колокаційному сенсі умов ідеального контакту (3), (4) та беручи до уваги (5), (6). Їх розв’язки потім використано у (5) для знаходження шуканих переміщень.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Програмну реалізацію запропонованого чисельно-аналітичного підходу здійснено з використанням системи MATLAB та проведено низку досліджень впливу фізичних параметрів на розподіл переміщень.

Числові дослідження проводилися для випадку, коли у півпросторі містилося одне включення у формі паралелепіпеда з «центром мас» в точці $(0, 0, h)$, $h=4$, розмірами $2a_1, 2a_2, 2a_3$, причому $a_1 = a_2 = 4a_3$, $a_3 = 1$. Всі геометричні параметри були безрозмірними.

Джерело хвиль розміщували в Ω_1 і для спрощення обчислень вибирали точковим з координатами $x_{1g} = 0$, $x_{2g} = 0$, $x_{3g} = -10$. Досліджували поширення механічних хвиль, збурених в напрямку однієї осі (z) з частотою $\omega = 10$ Гц. Інтенсивність джерела хвиль описувалася функцією: $u_{3g}^q = 10^{-5}$, $u_{1g}^q = u_{2g}^q = 0$, $q = \{s, p1, p2\}$.

Пружні характеристики середовища і включення вибирали однаковими відповідно фізичним властивостям реального геологічного середовища [7]:

$$K_1 = K_2 = 35,70 \cdot 10^9 \text{ Па}, K_{1f} = K_{2f} = 2,25 \cdot 10^9 \text{ Па},$$

$$\begin{aligned} K_{1c} = K_{2c} = 17,91 \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad \rho_{1f} = \rho_{2f} = 1000 \text{ кг/м}^3, \\ \rho_1 = \rho_2 = 2650 \text{ кг/м}^3, \quad \eta_1 = \eta_2 = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}, \\ \mu_{1c} = \mu_{2c} = 17,79 \cdot 10^9 \text{ Па}, \quad \alpha_{1\infty} = \alpha_{2\infty} = 3, \quad M_{1B} = M_{2B} = 1. \end{aligned}$$

Середовище і включення відрізнялися лише за проникністю і пористістю: $k_{01} = 10^{-12}$, $\phi_1 = 0,3$, $k_{02} = 0,001 \cdot 10^{-12}$, $\phi_2 = 0,03$.

Межу паралелепіпеда розбивали на однакової форми граничні елементи у вигляді прямокутників, і на їх основі з деякою «товщиною» h будували приграничні елементи у вигляді паралелепіпедів, кожний з яких задавався 8-ма точками [8]. Кожна СЛАР складалась з $2V$ рівнянь.

Для перевірки достовірності цієї моделі досліджено точність задоволення першої умови контакту на верхній $(-b_1 \leq x_1 \leq b_1, -b_2 \leq x_2 \leq b_2, x_3 = x_{3g} + b_3)$ та бічних гранях паралелепіпеда. Як відомо, похибки, що виникають під час застосування НМПГЕ, зумовлені тільки процедурами апроксимації, дискретизації та числового інтегрування. Тому точність методу щодо дискретизації можна регулювати зміною товщини приграничної області та кількістю елементів. Ставилося завдання знайти оптимальне поєднання цих величин, враховуючи час обчислень, при цьому частину точок спостереження вибирали на граничних елементах у тих точках колокації, у яких задовольняли умову контакту (3) при побудові СЛАР.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рисунку 1а показано залежність зміни відносної похибки $\delta = (u_3^{(1s)} - u_3^{(2s)}) / u_3^{(1s)}$ від зміни «висоти» h приграничного елемента для S -хвиль при задоволенні першої умови контакту при $V=48$. Розбиття на елементи здійснювали так: по 2 елементи на бічних гранях і по 8 елементів на верхній та нижній гранях. Як видно з рисунків, у точках колокації похибка відсутня, найбільша похибка спостерігається при наближенні до кінців граничних елементів.

Для хвиль типу Р представлено абсолютну похибку $\Delta = u_3^{(1p1)} - u_3^{(2p1)}$ (рис. 1б), оскільки обчислювальні значення є близькими до нуля (порядку $10e-9$ для $P1$ та порядку $10e-13$ для $P2$), а використання відносно похибки спотворює результати, аналогічні графіки отримано і для $\Delta_2 = u_3^{(1p2)} - u_3^{(2p2)}$. На цих графіках видно, що зі збільшенням товщини елемента похибка зменшується, отже, точність обчислення зростає.

Наступне дослідження проводилося при фіксованій товщині приграничних елементів $h=1$, але при різній їх кількості. Графіки представлені вздовж профілю, коли x_1 змінювали від $-b_1$ до b_1 , а $x_2=1$ (рис. 2). Досліджували залежність точності задоволення першої умови контакту від кількості елементів. Як видно з графіків, при збільшенні V з 24 до 48 як відносна, так і абсолютна похибки суттєво зменшуються. При збільшенні елементів з 48 до 128 похибка практично не змінюється, але при цьому збільшується час обчислення (приблизно у 2 рази).

Аналогічні дослідження проведені для бічної сторони. Результати представлені на рисунках 3 та 4.

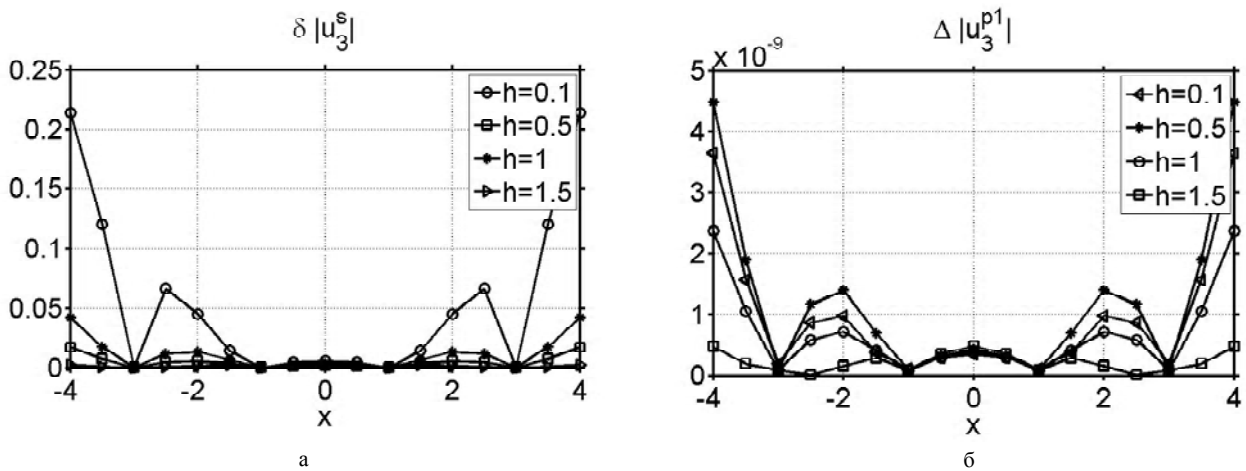


Рисунок 1 – Порівняння точності розв'язку при різних товщинах h приграничних елементів на верхній грані паралелепіпеда для $V=48$

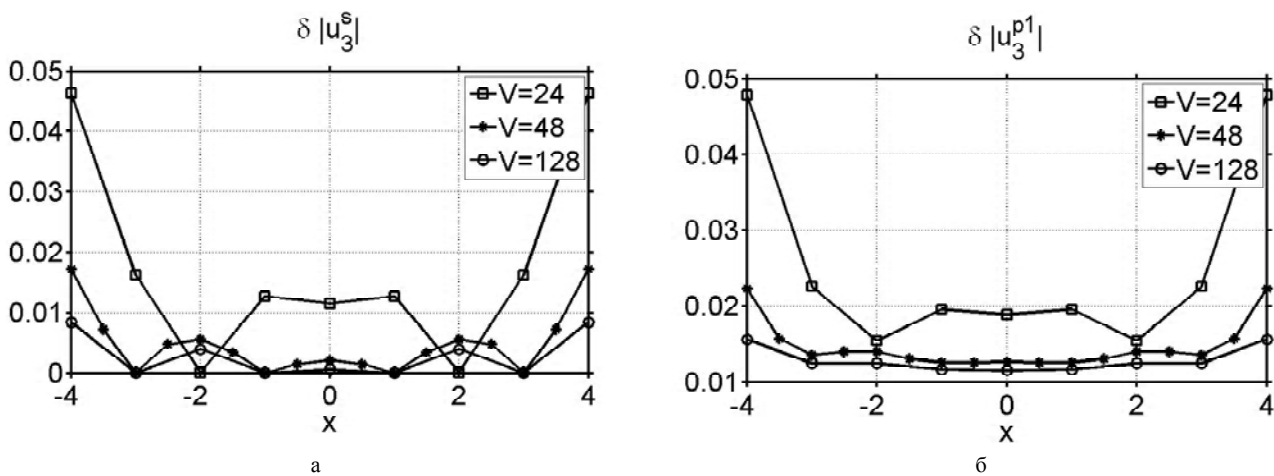


Рисунок 2 – Порівняння точності розв'язку на верхній грані паралелепіпеда при різній кількості V приграничних елементів для $H=1$

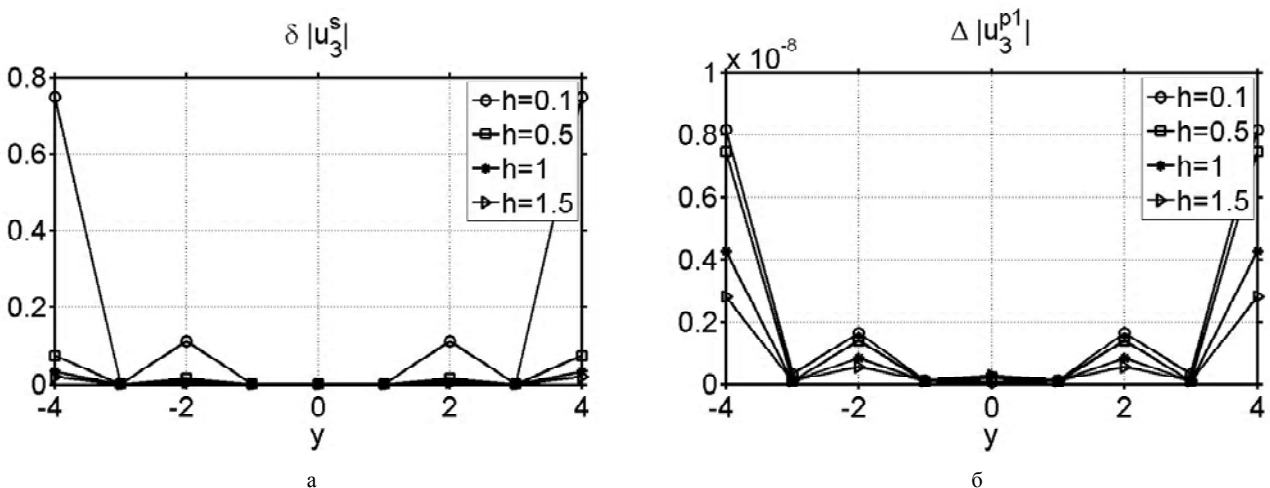


Рисунок 3 – Порівняння точності розв'язку при різній товщині h приграничних елементів на бічній грані для $V=48$

На рисунку 5 показано результати обчислення третьої компоненти u_3 функції переміщень для різних типів хвиль: s (рис. 5а), $P1$ (рис. 5б) та $P2$ (рис. 5в) на ділянці поверхні півпростору $\Gamma_W = \{(x_1, x_2, x_3) : -10 < x_1 < 10, -10 < x_2 < 10, x_3 = 0\}$. Як видно з цих рисунків графіки переміщень є симетричними відносно центру мас включен-

ня, тому результати подальших досліджень доцільно представляти по профілю $\Gamma_p = \{(x_1, x_2, x_3) : -10 < x_1 < 10, x_2 = 0, x_3 = 0\}$. На рисунку 5г показано співвідношення між величинами переміщень S , $P1$, $P2$ по вказаному профілю. Як видно з цих графіків, найбільші значення переміщень мають $P1$ хвилі, а найменші – $P2$.

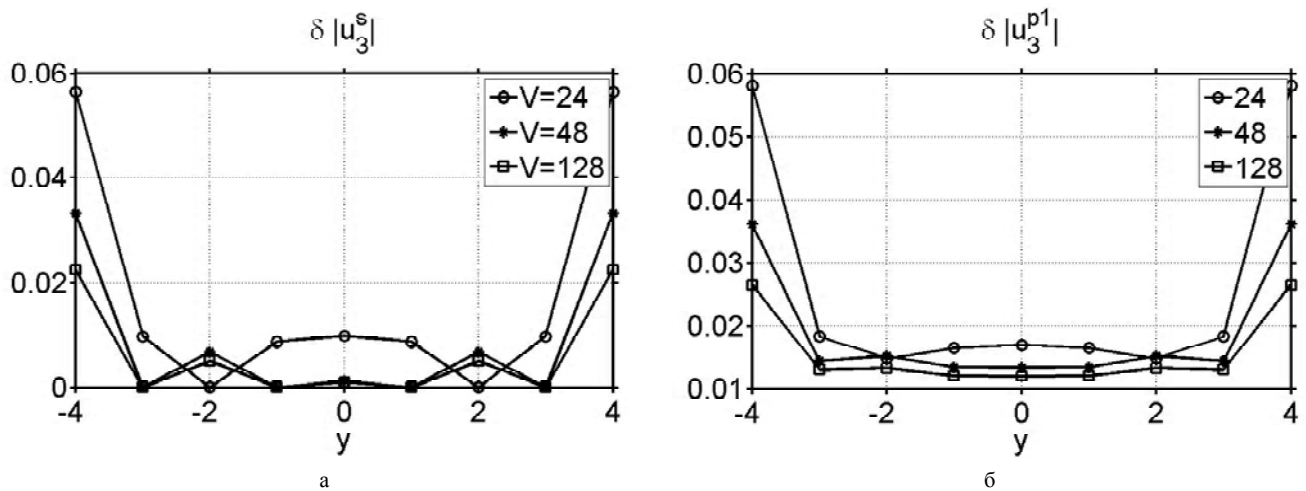


Рисунок 4 – Порівняння точності розв'язку при різній кількості приграничних елементів V на бічній грані паралелепіпеда для $h = 1$

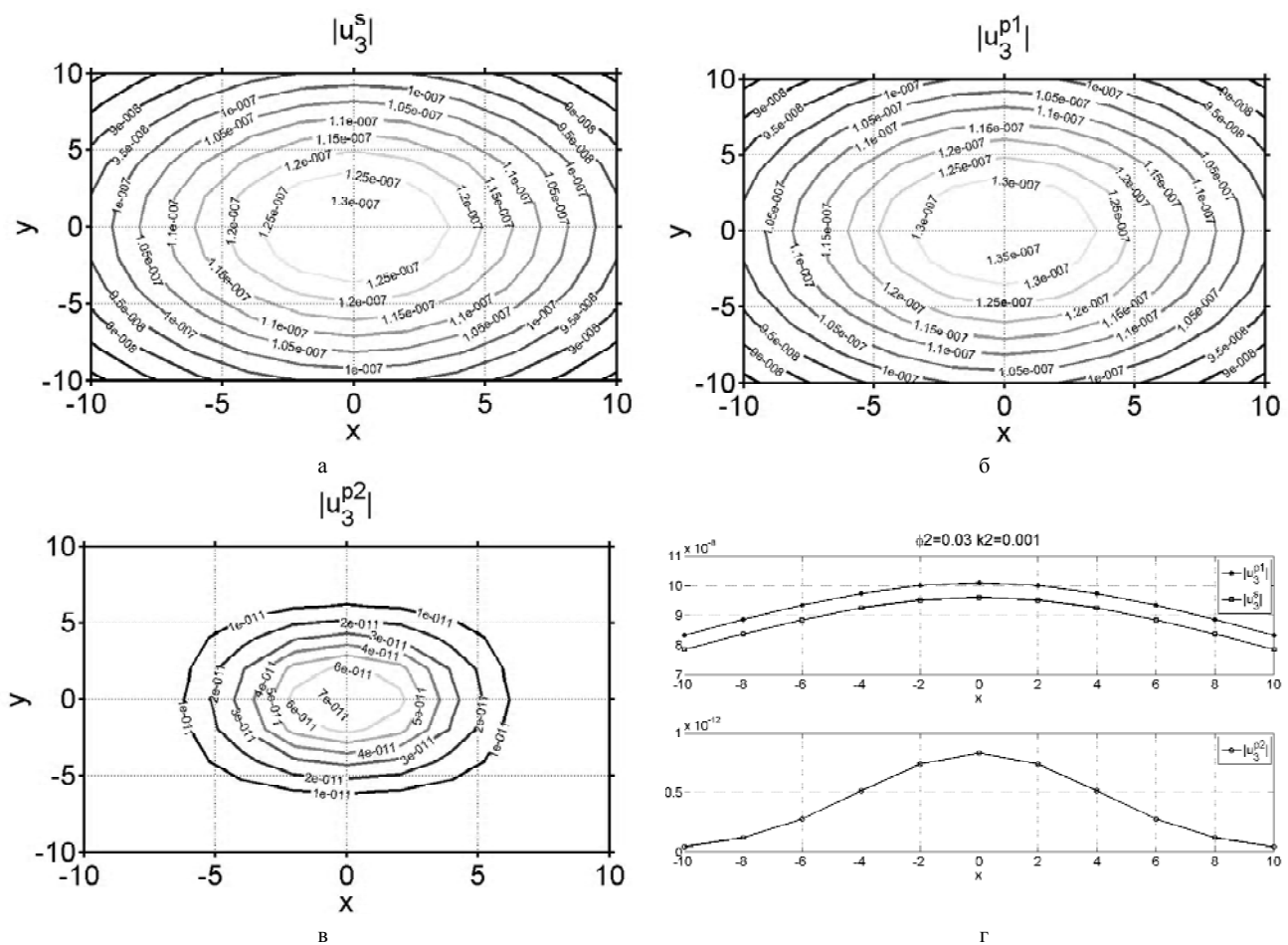


Рисунок 5 – Поля переміщень $u_3^{(1s)}$, $u_3^{(1p1)}$, $u_3^{(1p2)}$, обчислені на ділянці Γ_W поверхні півпростору

На рисунку 6 показано залежність зміни вертикальних компонент переміщень при зміні коефіцієнтів пористості і проникності k_{02} і ϕ_2 . На рис. 6а, 6б показано вплив зміни пористості при сталій флюїдопроникності на вертикальні компоненти переміщень на ділянці Γ_W межі півпростору для хвиль S та $P1$. Як бачимо, зі збільшенням пористості значення компонент переміщень зростають, оскільки збільшується вологонасиченість, а, отже, і швидкість хвиль.

Якщо ж пористість є сталою величиною, а флюїдопроникність змінюється, то спостерігаємо збіг на кривих $u_3^{(1s)}(x)$ та $u_3^{(1p1)}(x)$, а на кривих $u_3^{(1p2)}(x)$ – різницю (рис. 6в), отже, поздовжня повільна хвиля виявляється більш інформативною в цьому випадку.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Проведені дослідження засвідчили ефективність використання НМПГЕ для розв'язку пружно-динамічної

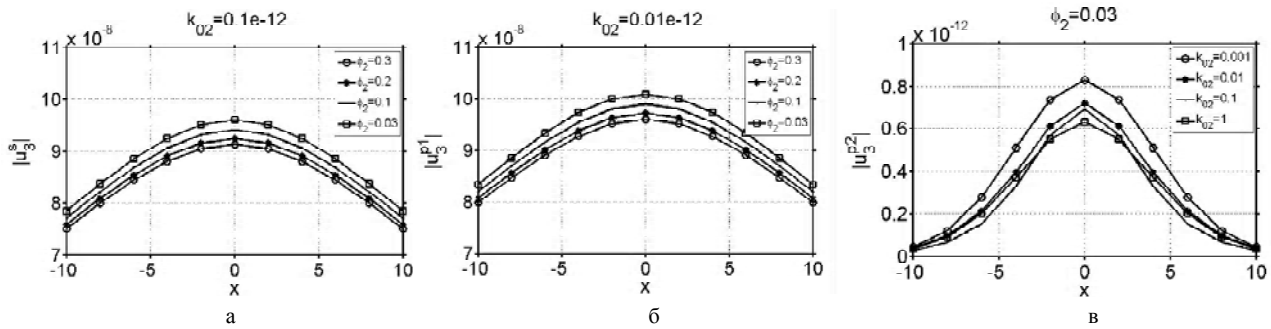


Рисунок 6 – Вплив зміни пористості при сталій флюїдопроникності на компоненти переміщень $u_3^{(1s)}(x)$, $u_3^{(1p1)}(x)$ (рис. а, б) та

зміни флюїдопроникності при сталій пористості на компоненту переміщення $u_3^{(1p2)}(x)$ (рис. в) по профілю Γ_p межі півпростору

задачі. Перевагою цього методу є можливість регулювання точності обчислення за рахунок додаткового параметру (товщини приграничної області), що суттєво відрізняє НМПГЕ від НМГЕ.

У випадку однакої кількості елементів та однакового ступеня апроксимації невідомих переміщень (зокрема, константами) вища точність досягається при використанні НМПГЕ, що дозволяє обмежитись меншою кількістю елементів дискретизації, враховуючи оптимізацію числових досліджень щодо часу, зокрема, для достатньої точності обчислень вистачає 48 приграничних елементів товщиною $h = 1$.

Для формулювання практичних рекомендацій при розпізнаванні локальних неоднорідностей оцінено окремих та взаємний вплив пористості і флюїдопроникності включення. Встановлено залежності впливу коефіцієнтів пористості та проникності включення на вертикальні компоненти переміщень на межі півпростору. Оцінено інформативні можливості, які можуть надати кожна з трьох хвиль. Планується провести дослідження в залежності від форми включення, відстані його від границі, різних способів розташування джерела, зокрема на поверхні півпростору, оскільки це дасть можливість моделювати ряд важливих задач, що виникають при моніторингу навколишнього середовища.

ВИСНОВКИ

Використовуючи НМПГЕ побудовано числово-аналітичну методику розв'язування пружно-динамічної задачі, яка є першим етапом при розв'язуванні задачі сейсмoeлектрики. Ця методика дозволяє обчислювати усі три компоненти векторів переміщень трьох типів хвиль (поперечної S та двох повздовжніх $P1$, $P2$) у будь-якій точці середовища. На основі запропонованого підходу у пакеті MATLAB створено програмний комплекс для проведення числових досліджень. Проведено обчислювальні експерименти для оцінки похибки дискретизації приграничної області та апроксимації математичної моделі. Досліджено залежність пористості і флюїдопроникності на розподіл компонент переміщень на границі півпростору. Дана методика може бути застосована при визначенні впливу вібраційних дій на динамічні процеси, що відбуваються у земній корі, оскільки вони можуть призвести до зсувних явищ і провалів, а також при моделюванні джерел штучних вибухів, природних землетрусів,

розміщуючи точкові та скінченні розміри джерела різних типів та точки спостереження в будь-якому місці півпростору та на його границі.

Запропонована методика планується використовуватися для отримання даних при розв'язуванні електрокінетичної задачі визначення сторонніх струмів, породжених відносним рухом рідкої і твердої фази в середовищі Біо та розв'язування електродинамічної задачі визначення електромагнітного поля, породженого сторонніми струмами.

ПОДЯКИ

Робота виконана у Карпатському відділенні Інституту геофізики у рамках держбюджетної науково-дослідної теми БФЦ-8 «Комплексні геофізичні дослідження для виявлення та прогнозування еконебезпечних явищ».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Garambois S. Full waveform numerical simulations of seismoelectromagnetic wave conversions in fluid-saturated stratified porous media / S. Garambois., M. Dietrich. // Journal of Geophysical Research. – 2002. – Vol. 107, № B7, 10.1029/2001JB000316. – P. ESE 5-1–ESE 5-18.
- Gao Y. Seismoelectromagnetic waves radiated by a double couple source in a saturated porous medium / Y. Gao, H. Hu // Geophysical Journal International. – 2010. – Vol. 181. – P. 873–896.
- Schmitt D. P. Full-wave synthetic acoustic log in radially semi-infinite saturated porous media / D. P. Schmitt, M. Bouchon, G. Bonnet // Geophysics. – 1988. – Vol. 53, № 6. – P. 807–823.
- Lee T. Transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground / T. Lee // Geophysics. – 1984. – Vol. 49, № 7. – P. 854–860.
- Сейсмoeлектрический эффект второго рода в горных породах (по данным лабораторных исследований) / [О. А. Агеева, Б. С. Светов, Г. Х. Шерман, С. В. Шипулин] // Геология и геофизика. – 1999. – Т. 40, № 8. – С. 1251–1257.
- Фридрихсберг Д. А. Исследование связи явления вызванной поляризации с электрокинетическими свойствами капиллярных систем / Д. А. Фридрихсберг, М. П. Сидорова // Вестник ЛГУ, сер. Физика и химия. – 1961. – Вып. 1, № 4. – С. 57–69.
- Светов Б. С. Основы геоэлектрики / Б. С. Светов. – Москва : Издательство ЛКИ, 2008. – 656 с.
- Журавчак Л. М. Метод приграничных элементов у прикладных задачах математичної фізики / Л. М. Журавчак, Є. Г. Грицько. – Львів : Карпатське відділення Інституту геофізики НАН України, 1996. – 220 с.
- Журавчак Л. М. Методика розв'язування задачі сейсмoeлектрики стосовно ефекту другого роду у кусково-однорідному півпросторі / Л. М. Журавчак // Матеріали наукової конфе-

- ренцій-семинару «Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах», Львів, 3–5 червня 2014 р. – Львів : «Сполом», 2014. – С. 42–49.
10. Журавчак Л. М. Математичне моделювання ефекту викликової поляризації у тривимірних задачах геоелектророзвідки / Л. М. Журавчак, Н. В. Забродська // Вісник НУ «Львівська політехніка». Сер. «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – 2009. – № 650. – С. 158–167.
 11. Журавчак Л. М. Розпізнавання провідних та високоомних включень у кусково-однорідному півпросторі при математичному моделюванні усталених коливань електромагнітного поля / Л. М. Журавчак, Ю. О. Федоришин // Вісник НУ «Львівська політехніка». Сер. «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – 2014. – № 800. – С. 159–167.
 12. Френкель Я. И. К теории сейсмических и сейсмoeлектрических явлений во влажной почве / Я. И. Френкель // Известия АН СССР, серия географических и геофизических наук. – 1944. – Т. 8, № 4. – С. 133–150.
 13. Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект 2 рода / А. Г. Иванов // Известия АН СССР, серия географических и геофизических наук. – 1940. – № 5. – С. 699–727.
 14. Иванов А. Г. Эффект электризации пластов земли при прохождении через них упругих волн / А. Г. Иванов // Докл. АН СССР. – 1939. – Вып. 24, № 1. – С. 41–43.
 15. Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solids / M. A. Biot // Journal Acoustic. Soc. Amer. – 1956. – Vol. 28. – P. 168–186.
 16. Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media / S. R. Pride // Phys. Rev., B. – 1994. – Vol. 50. – P. 15678–15696.
 17. Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмoeлектрического метода геофизической разведки / Б. С. Светов // Геофизика. – 2000. – № 1. – С. 28–39.
 18. Светов Б. С. Электромагнитное поле механо-электрического происхождения в пористых влагонасыщенных горных породах: I. Постановка задачи / Б. С. Светов, В. П. Губатенко // Физика Земли. – 1999. – № 10. – С. 67–73.
 19. Математическое моделирование сейсмoeлектрического эффекта второго рода, порождаемого плоскими упругими волнами в пористых влагонасыщенных средах / [И. Г. Московский, О. М. Балабан, О. С. Федорова, А. В. Кочетков] // Интернет-журнал «Науковедение». – 2015. – Том 7, № 1. – <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>.
 20. Городецкая Н. С. Волны в пористо-упругих насыщенных жидкостью средах / Н. С. Городецкая // Акустичний вісник. – 2014. – Т. 10, № 2. – С. 43–63.
- Стаття надійшла до редакції 06.03.2017.
Після доробки 22.03.2017.

Журавчак Л. М.¹, Забродская Н. В.²

¹Д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры программного обеспечения Института компьютерных наук и информационных технологий Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

²Канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела геоэлектромагнитных методов Карпатского отделения Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Львов, Україна

РЕШЕНИЕ УПРУГО-ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ В ПОРИСТОМ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОМ КУСОЧНО-ОДНОРОДНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ НЕПРЯМЫМ МЕТОДОМ ПРИГРАНИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Актуальность. При решении различных прикладных задач инженерной и нефтегазовой геологии, геофизики, геодинамики часто используются методы, базирующиеся на явлении сейсмoeлектрического эффекта 2-го рода, так как электромагнитное поле электрокинетического происхождения намного более информативнее, чем породившее его сейсмическое, и дает возможность определять важные петрофизические параметры (например, пористость и флюидопроницаемость) геологической среды. На первом этапе исследования этого эффекта возникает необходимость решения упруго-динамической задачи, объектом исследования которой являются процессы распространения упругих волн в пористых влагонасыщенных кусочно-однородных средах. Эта задача также имеет самостоятельное значение при мониторинге экологически опасных явлений деформационных процессов в почвенных массивах, особенно в горных районах, связанных с их проседанием вследствие карстопоявлений, землетрясений, фильтрации атмосферных осадков на склонах и других явлений.

Цель работы. Построение математической модели распространения упругих волн в кусочно-однородных средах; создание программных средств для ее числовой реализации и апробация ее эффективности; проведение численных исследований зависимости параметров среды от распределения компонент перемещений на границе полупространства.

Метод. Для создания математической модели задачи используется теория Био, а для построения ее численно-аналитического решения – не прямой метод приграничных элементов, базирующийся на теории методов граничных интегральных уравнений.

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует метод приграничных элементов для численно-аналитического моделирования упруго-динамической задачи. Проведены вычислительные эксперименты для оценки погрешностей дискретизации приграничной области и аппроксимации математической модели.

Выводы. Исследовано влияние изменения флюидопроницаемости и пористости включения в форме параллелепипеда на распределение компонент перемещения на границе полупространства. Приведены практические рекомендации по распознаванию включений.

Ключевые слова: не прямой метод приграничных элементов, сейсмoeлектрический эффект 2-го рода, упруго-динамическая задача, кусочно-однородная среда Био, поперечные волны, продольные волны.

Lubov Zhuravchak¹, Natalia Zabrodska²,

¹Dr.Sc., Professor of software department of Institute of Computer Science and Information Technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

²PhD, Senior researcher, Carpathian Branch of Subbotin Institute of Geophysics NAS, Lviv, Ukraine

SOLVING OF ELASTIC DYNAMICAL PROBLEM IN A POROUS FLUID-SATURATED PIECEWISE-HOMOGENEOUS HALF-SPACE BY THE INDIRECT METHOD OF NEAR-BOUNDARY ELEMENTS

Context. Solving the different applied problems of engineering and petroleum geology, geophysics and geodynamics, researchers often use methods based on phenomenon seismic-electrical effect of the second kind, since the electromagnetic field of electrical-kinetic origin is much more informative than the seismic one that generated it, and from it they can determine important petrophysical parameters (for example, porosity and fluid permeability) geological environment. At the first stage of investigation of this effect, the need of solving an elastic-dynamic problem arises, when the object of investigation is the processes of propagation of elastic waves in porous, fluid-saturated piecewise homogeneous media. This task also has an independent meaning for monitoring ecologically dangerous phenomena in the study of deformation

processes in soil massifs, especially in mountainous areas, associated with their subsidence due to caverns, earthquakes, filtration of precipitation on the slopes and other phenomena.

Objective. Construction of a mathematical model for the propagation of elastic waves in piecewise homogeneous media; creation of software for its numerical implementation and testing of its effectiveness; carrying out numerical investigations of the dependence on the parameters of the medium on the distribution of the displacement components at the boundary of the half-space.

Method. We used the Biot theory to create a mathematical model of the problem and the indirect method of near-boundary elements to construct its numerical-analytical solution, last one is based on the theory of methods of boundary integral equations.

Results. The software that implements the near-boundary elements method for numerical and analytical modeling of the elastic-dynamic problem has been developed. Computational experiments were carried out to estimate errors of discretization of the near-boundary region and of approximation of the mathematical model.

Conclusions. The effect of change of the characteristics of an inclusion (in a form of a parallelepiped), in particular its fluid permeability and porosity, on the distribution of displacement components on the half-space boundary has been investigated. The practical recommendations of the recognition of inclusions have been done.

Keywords: Biot theory, electromagnetic fields, seismic-electrical effect of the second kind, elastic dynamical problem, elastic waves propagation, indirect method of near-boundary elements.

REFERENCES

- Garambois S., Dietrich M. Full waveform numerical simulations of seismoelectromagnetic wave conversions in fluid-saturated stratified porous media, *Journal of Geophysical Research*, 2002, Vol. 107, No. B7, 10.1029/2001JB000316, pp. ESE 5-1–ESE 5-18.
- Gao Y., Hu H. Seismoelectromagnetic waves radiated by a double couple source in a saturated porous medium, *Geophysical Journal International*, 2010, Vol. 181, pp. 873–896.
- Schmitt D. P., Bouchon M., Bonnet G. Full-wave synthetic acoustic log in radially semi-infinite saturated porous media, *Geophysics*, 1988, Vol. 53, No. 6, pp. 807–823.
- Lee T. Transient electromagnetic response of a magnetic or superparamagnetic ground, *Geophysics*, 1984, Vol. 49, No. 7, pp. 854–860.
- Ageeva O. A., Svetov B. S., Sherman G. H., Shipulin C. V. Sejsmojelekticheskiy jeffekt vtorogo roda v gornyh porodah (po dannym laboratornyh issledovaniy), *Geologiya i geofizika*, 1999, Vol. 40, No. 8, pp. 1251–1257.
- Fridrihsberg D. A., Sidorova M. P. Issledovanie svyazi javleniya vyzvannoy poljarizatsii s jelektrokineticheskimi svoystvami kapilljarnykh sistem, *Vestnik LGU, ser. Fizika i himiya*, 1961, Vyp. 1, No. 4, pp. 57–69.
- Svetov B. C. Osnovy geoelektriki. Moscow, Izdatel'stvo LKI, 2008, 656 p.
- Zhuravchak L. M., Gryc'ko Je. G. Metod prygranychnykh elementiv u prykladnykh zadachah matematychnoi fizyky. L'viv, Karpats'ke viddilennja Instytutu geofizyky NAN Ukrainy, 1996, 220 p.
- Zhuravchak L. M. Metodyka rozv'jazuvannja zadachi sejsmojelektryky stosovno efektu drugogo roku u kuskovo-odnorodnomu pivprostori, *Materialy naukovoї konferencii seminaru «Sejsmologichni ta geofizychni doslidzhennja v sejsmoaktyvnykh regionah»*, L'viv, 3–5 chervnja 2014 r. L'viv, "Spolom", 2014, pp. 42–49.
- Zhuravchak L. M., Zabrods'ka N. V. Matematyčne modeljuvannja efektu vyklykanoi poljaryzatsii u tryvymirnykh zadachah geoelektrozvidky, *Visnyk NU "L'viv's'ka politehnika". Ser. "Komp'juterni nauky ta informacijni tehnologii"*, 2009, No. 650, pp. 158–167.
- Zhuravchak L. M., Fedoryshyn Ju. O. Rozpiznavannja providnyh ta vysokoomnyh vkljuchen' u kuskovo-odnorodnomu pivprostori pry matematychnomu modeljuvanni ustalenyh kolyvan' elektromagnitnogo polja, *Visnyk NU "L'viv's'ka politehnika". Ser. "Komp'juterni nauky ta informacijni tehnologii"*, 2014, No. 800, pp. 159–167.
- Frenkel' Ja. I. K teorii sejsmicheskikh i sejsmojelektricheskikh javlenij vo vlazhnoj pochve, *Izvestija AN SSSR, serija geograficheskikh i geofizicheskikh nauk*, 1944, Vol. 8, No. 4, pp. 133–150.
- Ivanov A. G. Sejsmojelektricheskij jeffekt 2 roda, *Izvestija AN SSSR, serija geograficheskikh i geofizicheskikh nauk*, 1940, No. 5, pp. 699–727.
- Ivanov A. G. Jeffekt jelektrizatsii plastov zemli pri prohozhdenii cherez nih uprugih voln, *Dokl. AN SSSR*, 1939, Vyp. 24, No. 1, pp. 41–43.
- Biot M. A. Theory of propagation of elastic waves in fluidsaturated porous solids, *Journal Acoustic. Soc. Amer*, 1956, Vol. 28, pp. 168–186.
- Pride S. R. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media, *Phys. Rev., B*, 1994, Vol. 50, pp. 15678–15696.
- Svetov B. C. K teoreticheskomu obosnovaniju sejsmojelektricheskogo metoda geofizicheskoy razvedki, *Geofizika*, 2000, No. 1, pp. 28–39.
- Svetov B. C., Gubatenko V. P. Jelektromagnitnoe pole mehanojelektricheskogo proishozhdenija v poristyh vlagonasyshhennykh gornyh porodah: I. Postanovka zadachi, *Fizika Zemli*, 1999, No. 10, pp. 67–73.
- Moskovskij I. G. Balaban O. M., Fedorova O. S., Kochetkov A. V. Matematicheskoe modelirovanie sejsmojelektricheskogo jeffekta vtorogo roda, porozhdaemogo ploskimi uprugimi volnami v poristyh vlagonasyshhennykh sredah, *Internet-zhurnal «Naukovedenie»*, 2015, Vol. 7, No. 1, <http://naukovedenie.ru/PDF/04TVN115.pdf>.
- Gorodeckaja N. S. Volny v poristo-uprugih nasysyhennykh zhidkost'ju sredah, *Akustichnij visnik*, 2014, Vol. 10, No. 2, pp. 43–63.

КОРРЕКТНОЕ СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕПОЛНОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Актуальность. Рассмотрена задача статистического моделирования сложных систем и процессов в условиях неполной исходной информации.

Целью данной работы является использование метода формализованного получения структуры многофакторной статистической модели и устойчивого оценивания ее коэффициентов для получения высокоточных статистических моделей упругих деформаций технологической системы токарного станка.

Методы. При решении прикладных задач анализ исходных данных получения статистических моделей показал, что часто они строятся в условиях неполной исходной информации и решаемая задача является некорректно поставленной. В таких условиях проблемами построения моделей является получение структуры модели и ее устойчивость. Предложена расширенная концепция ортогональности получаемой модели: план эксперимента, структура модели и структурные элементы модели ортогональны друг к другу. Ортогональная структура многофакторной статистической модели позволяет получить статистически независимые оценки коэффициентов моделируемую функцию. Такая структура может быть определена однозначно со статистически значимыми коэффициентами. Нормирование ортогональных эффектов позволяет получить максимально устойчивую структуру модели и, следовательно, ее коэффициентов. Решаемая задача будет корректно поставленной.

Результаты. Применение рассмотренного метода формализованного получения структуры многофакторной статистической модели и устойчивого оценивания ее коэффициентов использовано для получения высокоточных статистических моделей упругих деформаций обрабатываемой на токарном станке стальной заготовки. Выполнен полный факторный эксперимент, где факторами служили сила резания, длина заготовки, диаметр заготовки, а откликом (функцией) – величина упругих деформаций системы. По результатам эксперимента построены статистические регрессионные модели деформаций $\hat{y}_1$ и $\hat{y}_2$. В структуре моделей факторы представлены ортогональными контрастами. При формировании структуры модели в нее вводятся статистически значимые эффекты. Проведенные проверки полученных моделей по критериям качества показали их высокую информативность, устойчивость, адекватность, статистическую эффективность. Использование моделей на станках с числовым программным управлением позволяет сократить число проходов режущего инструмента и, следовательно, время обработки детали.

Выводы. Результаты использования расширенной концепции ортогональности и структуры модели полного факторного эксперимента при получении моделей упругих деформаций технологической системы токарного станка подтвердили перспективность применения рассматриваемого подхода, его эффективность и целесообразность при построении регрессионных статистических моделей сложных систем и процессов.

Ключевые слова: статистическое моделирование, некорректные задачи, устойчивая структура статистической модели, расширенная концепция ортогональности.

НОМЕНКЛАТУРА

$\hat{y}$ – статистическая модель;

$x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(s_i-1)}$ – ортогональные контрасты фактора X_i ;

s_i – число различных уровней фактора X_i ;

k – общее число факторов, $1 \leq i \leq k$;

(1), (2), ..., (s_i – 1) – порядок контрастов фактора X_i ;

N_{Π} – число структурных элементов полного факторного эксперимента, равное числу опытов эксперимента;

$x_{iu}^{(p)}$ – значение p -го ортогонального контраста i -го фактора для u -той строки матрицы планирования, $1 \leq u \leq N$, $1 \leq p \leq s_i - 1$;

$x_{ju}^{(q)}$ – значение q -го ортогонального контраста j -го фактора для u -той строки матрицы планирования, $1 \leq q \leq s_j - 1$, $1 \leq i < j \leq k$;

X – матрица эффектов полного факторного эксперимента;

$\sigma^2(\varepsilon)$ – теоретическое значение дисперсии воспроизводимости результатов опытов;

N – число опытов в плане эксперимента;

E – единичная матрица;

$|r_{ij}(x_i^{(p)} \times x_j^{(q)})|$ – абсолютное значение коэффициента

парной корреляции факторов X_i и X_j ;

$F_{N-1; N(n-1)}^{\text{эксп}}$ – экспериментальное значение F -критерия (Фишера);

$F_{\alpha; N-1; N(n-1)}^{\text{крит}}$ – критическое значение F -критерия (Фишера);

$\bar{y}_u$ – среднее значение результатов опытов в u -той строке результатов;

$\bar{y}$ – среднее значение всех результатов опытов;

$\hat{y}_u$ – рассчитанное по модели значение отклика в u -той строке результатов;

y_{ul} – значение результата опыта в u -той строке результатов для l -го повторного опыта;

n – число повторных опытов в каждой строке результатов;

u – текущее значение номера строки в плане эксперимента; $1 \leq u \leq N$;

l – текущее значение номера повторного опыта;

α – уровень значимости;

$SS_{ад}$ – сумма квадратов адекватности для модели;

$SS_{восп}$ – сумма квадратов воспроизводимости результатов экспериментов;

$f_{ад}$ – число степеней свободы для проверки адекватности;

$f_{восп}$ – число степеней свободы для проверки воспроизводимости результатов экспериментов;

R – коэффициент множественной корреляции;

k' – общее число значимых коэффициентов уравнения регрессии;

$SS_{k'}$ – сумма квадратов отклонений, связанная с k' коэффициентом модели;

$SS_{ост}$ – сумма квадратов отклонений остаточная;

$f_{k'}$ – число степеней свободы для $SS_{k'}$;

$f_{ост}$ – число степеней свободы для $SS_{ост}$;

λ_{max} – максимальное собственное число для информационной матрицы Фишера $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$;

λ_{min} – минимальное собственное число для информационной матрицы Фишера $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$;

e_{ul} – остаток в u -той строке для l -го повторного опыта.

ВВЕДЕНИЕ

Многофакторные математические модели широко применяются при создании и совершенствовании сложных систем и процессов. В качестве исходной информации используются результаты экспериментальных исследований, статистических испытаний, экспертное оценивание, результаты сложных вычислений. Для определения коэффициентов моделей используется регрессионный анализ и метод наименьших квадратов.

Модель получают путем аппроксимации результатов экспериментов, которые являются результатом суммарного влияния управляемых, неуправляемых и неконтролируемых факторов. Определяемые коэффициенты смешаны с некоторыми другими коэффициентами, которые коррелируют с определяемыми. Необходимо по полученным результатам эксперимента $\mathbf{Y}$ восстановить математическую модель $\mathbf{Y} = \mathbf{XB} + \boldsymbol{\varepsilon}$ в условиях присутствия случайных и систематических ошибок $\boldsymbol{\varepsilon}$. Задача классифицируется как обратная. Типичным условием при получении моделей является отсутствие необходимой информации о статистически значимом влиянии факторов, структуре определяемой модели, законе распределения результатов наблюдений и других данных.

Большинство обратных задач являются некорректно поставленными. Корректными задачами называются классы математических задач, отвечающих некоторым условиям определенности их решений. Задача называется корректной задачей (или корректно поставленной), если выполнены следующие условия (условия корректности): задача имеет решение, каждым исходным данным соответствует только одно решение – однозначность задачи, решение устойчиво. Задача, для которой не вы-

полняется хотя бы одно из условий, характеризующих корректно поставленную задачу, называется некорректно поставленной, или некорректной. Исследователь должен системно проанализировать условия получения модели и найти необходимое решение в условиях исходной неопределенности необходимой информации.

Цель работы – использование метода формализованного получения структуры многофакторной статистической модели и устойчивого оценивания ее коэффициентов для получения высокоточной статистической модели упругих деформаций обрабатываемой заготовки в условиях неполной исходной информации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В соответствии с расширенной концепцией ортогональности выбираются план эксперимента, структура модели и ортогональные элементы модели. Рассматривается упругая система токарного металлорежущего станка. При обработке на станке цилиндрической стальной заготовки длиной l , диаметром d на нее влияет радиальная сила резания P , которая деформирует заготовку. Величина упругой деформации фиксируется при различных значениях влияющих факторов. По полученным результатам эксперимента строятся математические модели деформаций $\hat{y}_1$ и $\hat{y}_2$. Построенные модели проверяются по критериям качества: адекватность, информативность, устойчивость, статистическая эффективность.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На указанные свойства сложных систем обращал внимание проф. В. А. Вознесенский. «К сожалению, в технологических, технико-экономических и других реальных сложных системах неизвестны ни вид функции Φ (уравнение состояния системы – Р.С.), ни полный набор факторов $\mathbf{X}_\Phi$, ни числовые значения констант (коэффициентов) $\mathbf{B}_\Phi$, ни законы распределения случайных величин $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi$, ни граничные условия» [1].

В публикациях по регрессионному анализу при выборе структуры многофакторной модели типичные решения сводятся к постулированию структуры в виде полинома определенного порядка без обоснования предложенной структуры. Полученная модель может быть неадекватной и неустойчивой. Отмечается «...принципиальное отличие неформализуемой задачи выбора вида искомой математической модели исследуемого явления и чисто формальной задачи нахождения по экспериментальным данным значений параметров уже выбранной аппроксимирующей функции» [2].

Д.ф.-м.н. С.А. Айвазян, д.ф.-м.н. И.С. Енюков и д.ф.-м.н. Л.Д. Мешалкин отмечают, что «на первый план выходит задача правильного определения структуры модели (т. е. выбора общего вида функции $f(X)$), решение которой обеспечивает возможность количественного измерения эффекта воздействия на $Y(X)$ каждой из объясняющих переменных $x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(p)}$ в отдельности. Однако как раз это место (правильный выбор общего вида функции $f(X)$) и является самым слабым во всей технике статистического исследования зависимостей: к сожалению, не существует стандартных приемов

и методов, которые образовывали бы строгую теоретическую базу для решения этой важнейшей задачи» [3].

В [4] отмечается, что «...этап исследования, посвященный выбору общего вида функции регрессии (параметризация модели), бесспорно является ключевым: от того, насколько удачно он будет реализован, решающим образом зависит точность восстановления неизвестной функции регрессии $f(X)$. В то же время приходится признать, что этот этап находится, пожалуй, в самом невыгодном положении: к сожалению, не существует системы стандартных рекомендаций и методов, которые образовали бы строгую теоретическую базу для его наиболее эффективной реализации».

Авторы предлагают использовать априорную информацию о содержательной сущности анализируемой зависимости; предварительный анализ геометрической структуры исходных данных; различные статистические приемы обработки исходных данных, позволяющие сделать наилучший выбор из нескольких сравниваемых вариантов.

Не приведены [4] рекомендации по выбору плана эксперимента для получения модели.

В рассмотренных публикациях известных специалистов по регрессионному анализу не рассмотрена проблема некорректно поставленных задач, устойчивости получаемых статистических моделей, проверки их на устойчивость и по другим критериям качества. Такой подход типичен и для других публикаций [5, 6]. В книге [5] изложены классическая теория и современные результаты, полученные в регрессионном анализе. Приведены основы регрессионного и дисперсионного анализа в предположении, что результаты наблюдений распределены нормально, методики выбора статистических гипотез и подбора оптимальной модели с использованием информационных критериев. В [6] изложена теория и практика планирования научных экспериментов: латинские квадраты; планы 2^k , 2^{k-p} , 3^k , $2^m \times 3^n$; планы второго порядка, планы Бокса-Бенкина. Получение структуры статистической модели, устойчивость оценивания коэффициентов не рассматривается.

В монографии [7] исследованы проблемы использования математических и эвристических методов получения многофакторных статистических моделей реальных сложных систем и процессов. Рассмотрено взаимодействие математических и эвристических методов в получении наилучших возможных моделей для стандартных и нестандартных областей факторного пространства.

Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи в [8] осуществляется с использованием экспериментально-статистического подхода и полученной статистической модели, которая характеризуется хорошими параметрами качества, так как было использовано оптимальное планирование эксперимента.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для аппроксимации исходных данных будем использовать класс полиномиальных математических моделей. Их применение обосновано теоремами Вейерштрасса, Стоуна, Джексона [9].

Элементы структуры определяемой статистической модели $\hat{y}$ выбираются из элементов структуры модели полного факторного эксперимента.

По теореме Бродского В. З. [9] в модели полного факторного эксперимента все эффекты ортогональны друг другу и число эффектов равно числу опытов. Если эффекты выразить в виде ортогональных нормированных контрастов, т. е.

$$\sum_{u=1}^N x_{iu}^{(p)} = 0, \quad \sum_{u=1}^N x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(q)} = 0,$$

$$\sum_{u=1}^N [x_{iu}^{(p)}]^2 = N, \quad \sum_{u=1}^N [x_{iu}^{(p)} \times x_{ju}^{(q)}]^2 = N,$$

что эквивалентно системе ортогональных полиномов Чебышева, то матрица дисперсий-ковариаций будет диагональной

$$(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \sigma^2(\varepsilon) = (1/N) \mathbf{E} \sigma^2(\varepsilon).$$

Модель полного факторного эксперимента соответствует наилучшим возможным критериям D -, A -, E -, G -оптимальности, ортогональности и адекватна результатам экспериментов.

В общем случае использование полного факторного эксперимента требует много опытов и при решении некоторых реальных прикладных задач невыполнимо. В качестве квазиполного факторного эксперимента необходимо использовать дробный факторный эксперимент, применять многофакторные регулярные планы и планы на основе ЛП_т равномерно распределенных последовательностей [9, 7].

Выбор структуры модели проводится с использованием алгоритма RASTA3 и программного средства «Планирование, регрессия и анализ моделей» (ПС ПРИАМ) [9].

Использование многофакторных регулярных планов позволяет получить все главные эффекты ортогональными. Корреляция взаимодействий должна быть ограничена коэффициентом парной корреляции

$|r_{ij}(x_i^{(p)} \times x_j^{(q)})| \leq 0,3$. Бóльшая коррелированность эффектов создает смешивание определяемых коэффициентов, увеличивает их среднеквадратические ошибки, и решаемая задача становится некорректно поставленной.

Под устойчивой структурой многофакторной статистической модели полиномиального вида понимается структура, характеризующаяся неизменностью множества главных эффектов и взаимодействий при изменениях значений результатов экспериментов (откликов), порождаемых случайными ошибками (погрешностями) результатов наблюдений, измерений, вычислений и неопределенностью искомой структуры модели.

При формировании структуры модели необходимо вводить в модель статистически значимые факторы. Так как информация о них часто отсутствует, то необходимо оптимизировать значения тех факторов, которые не изменяются в процессе функционирования системы и тем самым уменьшить число факторов, вводимых в структуру определяемой системы. Общая методика проведения многофакторного статистического моделирования приведена в [9, 10].

Полученную математическую модель необходимо проверить на статистическую значимость. Предполагается равномерное дублирование опытов: $n_u = n = \text{const}$.

$$F_{N-1;N(n-1)}^{\text{эксп}} = \left(\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y})^2 / (N-1) \right) / \left(\sum_{u=1}^N \sum_{l=1}^n (y_{ul} - \bar{y}_u)^2 / N(n-1) \right).$$

Если $F_{N-1;N(n-1)}^{\text{эксп}} > F_{\alpha;N-1;N(n-1)}^{\text{крит}}$, то получение математической модели целесообразно; в противном случае нецелесообразно, так как суммарное влияние группы факторов $X_1, \dots, X_k$ будет статистически незначимо на фоне случайных ошибок повторных опытов, порождаемых изменчивостью неуправляемых и неконтролируемых факторов.

Математическая модель должна быть проверена на адекватность [9]. Если

$$F_{f_{\text{ад}};f_{\text{восп}}}^{\text{эксп}} = (SS_{\text{ад}} / f_{\text{ад}}) / (SS_{\text{восп}} / f_{\text{восп}}) = s_{\text{ад}}^2 / s_{\text{восп}}^2 \leq F_{\alpha;f_{\text{ад}};f_{\text{восп}}}^{\text{крит}},$$

$$SS_{\text{ад}} = n \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad SS_{\text{восп}} = \sum_{u=1}^N \sum_{l=1}^{n_u} (y_{ul} - \bar{y}_u)^2,$$

$$f_{\text{ад}} = N - k', \quad f_{\text{восп}} = N(n-1),$$

то модель адекватна и прогноз результатов по модели не противоречит результатам опытов. В противном случае модель не адекватна; необходимо проанализировать конкретную ситуацию и наметить действия к разрешению противоречия.

Модель необходимо проверить на информативность. Вычисляют значение коэффициента множественной корреляции R

$$R = \left\{ 1 - \left[\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2 \right] / \left[\sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y})^2 \right] \right\}^{1/2}.$$

Гипотезу о значимости множественного коэффициента корреляции проверяют по F -критерию [9]:

$$F_{f_{k'};f_{\text{ост}}}^{\text{эксп}} = (SS_{k'} / f_{k'}) / (SS_{\text{ост}} / f_{\text{ост}}) = s_{k'}^2 / s_{\text{ост}}^2,$$

$$SS_{k'} = \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \bar{y})^2 - \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2,$$

$$SS_{\text{ост}} = \sum_{u=1}^N \sum_{l=1}^n (y_{ul} - \hat{y}_u)^2,$$

$$f_{k'} = k' - 1, \quad f_{\text{ост}} = Nn - k'.$$

Если $F_{f_{k'};f_{\text{ост}}}^{\text{эксп}} \leq F_{\alpha;f_{k'};f_{\text{ост}}}^{\text{крит}}$, то гипотеза о статистической незначимости R принимается: разброс значений отклика по уравнению регрессии $\hat{y}$ относительно общего среднего по всем результатам опытов $\bar{y}$ отличается статистически незначимо от разброса результатов опытов y_{ul} относительно уравнения регрессии $\hat{y}$, т. е. прогноз по уравнению регрессии не дает больше полезной информации, чем знание $\bar{y}$.

Если $F_{f_{k'};f_{\text{ост}}}^{\text{эксп}} > F_{\alpha;f_{k'};f_{\text{ост}}}^{\text{крит}}$, то гипотеза о статистической значимости R принимается; прогноз по уравнению регрессии дает больше полезной информации, чем знание $\bar{y}$.

Коэффициенты математической модели должны быть устойчивы к малым случайным изменениям в исходных данных, полученных в процессе экспериментирования. Предложено для количественного показателя устойчивости коэффициентов математической модели использовать 2 меры обусловленности: по Нейману-Голдштейну и число обусловленности матрицы $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$.

Мера обусловленности матрицы по Нейману-Голдштейну

$$P(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) = \lambda_{\max} / \lambda_{\min},$$

Другая мера обусловленности матрицы $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ обозначается cond .

$$\text{cond}(\mathbf{X}^T \mathbf{X}) = \|\mathbf{X}^T \mathbf{X}\| \times \|(\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1}\|,$$

где $\|\cdot\|$ – обозначение нормы матрицы.

Предполагается, что матрица $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ невырождена.

Модель максимально устойчива, если приведенные критерии равны 1; хорошо устойчива, если критерии не превышают 10.

Полученную математическую модель необходимо проверить по всей области моделирования. При использовании ПС ПРИАМ строится трехмерное изображение поверхности отклика, т. е. $\hat{y}_w = f_w(X_i, X_j)$. Каждый из двух факторов изменяется на 20 уровнях. Все остальные факторы принимают средние значения. Всего вычисляется 400 значений отклика.

Полученное изображение поверхности отклика анализируется и определяются минимальное и максимальное расчетные значения $\hat{y}_w$. Они сравниваются с физически возможными значениями отклика. В случае имеющегося противоречия модель должна быть проанализирована и работа по ее получению продолжена.

Более жесткой проверкой является поиск минимума и максимума по модели $\hat{y}_w$ с использованием ЛП_т равномерно распределенных последовательностей с последующим их сравнением с возможными физически не противоречивыми значениями моделируемого критерия качества.

Проводится также проверка свойств остатков

$$e_{ul} = y_{ul} - \hat{y}_u,$$

что позволяет подтвердить или опровергнуть предположения относительно распределения ошибок и систематических, т. е. не случайных, изменений от последовательности проведения опытов и от значений отклика, рассчитанных по модели в точках факторного пространства, в которых проводились опыты.

Получаемая статистическая модель должна быть семантической. Семанτικότητα (информационная) – получение информации о механизмах происходящих явлений в системах и процессах путем изучения структур моделей.

Получение семантических многофакторных моделей возможно для моделей, линейных относительно параметров, и формализованного формирования структурной связи в виде оператора структурной связи, задаваемого множеством эффектов модели полного факторного эксперимента. В указанном типе моделей коэффициенты интерпретируются как оценки частных производных моделируемой функции. Анализ полученных статистических моделей позволяет вскрыть механизмы явлений, происходящих в системе и процессе.

Семанτικότητα позволяет использовать коэффициенты полученной статистической модели в целях интерпретации в терминах предметной (моделируемой) области знаний. Для выполнения данного требования необходимо, чтобы тип моделей был линейный по параметрам, а коэффициенты модели были статистически независимы или близки к независимым (коэффициент парной корреляции между эффектами должен быть не более 0,3 по абсолютной величине) и нормированы. Тогда абсолютная величина коэффициента модели показывает силу влияния соответствующего эффекта, а знак – направление влияния. Коэффициенты главных эффектов будут приближенно описывать производные первого, второго и других порядков, а взаимодействий – частные производные соответствующих эффектов.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Экспериментальное исследование эффективности предложенной методики проведено при математическом моделировании упругих деформаций технологической системы токарного станка для консольно закрепленной в трехкулачковом патроне цилиндрической стальной заготовки в состоянии поставки. Заготовка была свободно зажата (результаты y_1 , мкм) или поджата задним центром (y_2 , мкм). Нагрузка, имитирующая действие составляющей силы резания P_y , устанавливалась с помощью образцового динамометра сжатия в пределах 200–2000 Н. Величина упругих перемещений в нагружаемом сечении фиксировалась с помощью индикатора часового типа. Замеры деформаций проводились с точностью до 1 мкм. Сила изменялась в диапазоне $P(X_1) = 200–1000$ Н, длина консольной части заготовки $l(X_2) = 20–140$ мм, диаметр заготовки $d(X_3) = 18–50$ мм.

Для обеспечения высокоточного прогнозирования деформаций технологической системы был проведен полный факторный эксперимент $3^1 \times 4^1 \times 5^1 // 60$, в котором сила изменялась на трех уровнях (200; 600; 1000 Н), длина консольной части заготовки в точке замера деформации – на четырех уровнях (20; 60; 100; 140 мм), диаметр заготовки – на пяти уровнях (18; 26; 34; 42; 50 мм). Было проведено 60 опытов; каждый опыт повторен 2 раза (табл. 1).

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Структура модели полного факторного эксперимента $3^1 \times 4^1 \times 5^1 // 60$ следующая:

$$(1 + x_1^{(1)} + x_1^{(2)})(1 + x_2^{(1)} + x_2^{(2)} + x_2^{(3)})(1 + x_3^{(1)} + x_3^{(2)} + x_3^{(3)} + x_3^{(4)}) \rightarrow N_{60},$$

где $x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, x_3^{(1)}, x_1^{(2)}, x_2^{(2)}, x_3^{(2)}, x_2^{(3)}, x_3^{(3)}, x_3^{(4)}$ – соответственно линейные, квадратичные, кубические, четвертой степени контрасты факторов $X_1, \dots, X_3$; N_{60} – чис-

ло структурных элементов для схемы полного факторного эксперимента.

Все эффекты (главные и взаимодействия) были нормированы.

Вычисление математических моделей и всех их критериев качества было проведено с использованием ПС ПРИАМ. Полученные математические модели имеют вид

$$\begin{aligned} \hat{y}_1 = & 121,43 - 129,31x_3 + 119,83x_2 - 158,30x_2x_3 + 79,95x_1 + \\ & + 59,38z_3 - 85,08x_1x_3 + 79,10x_1x_2 + 75,66x_2z_3 - 103,28x_1x_2x_3 + \\ & + 38,93x_1z_3 - 37,19z_2x_3 + 26,14z_2 + 49,26x_1x_2z_3 - 31,71x_2g_3 - \\ & - 23,13g_3 + 19,13z_2z_3 - 23,68x_1z_2x_3 + 16,65x_1z_2 - 21,71x_1x_2g_3 - \\ & - 15,79x_1g_3 + 12,00x_1z_2z_3 - 8,70z_2g_3 + 7,74x_2v_3 - 5,84x_1z_2g_3 + \\ & + 3,70v_3 + 5,98x_1x_2v_3 - 4,12g_2x_3 + 2,53g_2 + 2,90z_2v_3 + 3,54x_1v_3 + \\ & + 2,12x_1g_2 + 1,88g_2z_3 - 2,63x_1g_2x_3 + 1,91x_1z_2v_3 + 1,14x_1g_2z_3 + \\ & + 1,02z_1x_3 + 1,29z_1x_2x_3 - 1,09z_1x_2z_3 - 0,87g_2g_3 + 0,78z_1z_2x_3 - \\ & - 0,64z_1z_2z_3 - 0,43z_1z_3 - 0,40z_1 - 0,73z_1g_2v_3 + \\ & + 0,48z_1z_2g_3 + 0,62z_1g_2g_3, \text{ мкм}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \hat{y}_2 = & 30,55 + 18,95x_1 + 10,33x_2 - 10,51x_3 - 6,95x_1x_3 + 6,18x_1x_2 - \\ & - 5,83x_2x_3 + 3,43z_3 + 3,09v_3 - 2,32g_3 + 3,46x_2v_3 + 2,25x_1z_3 + \\ & + 2,22x_2z_3 - 2,60x_2g_3 + 1,28z_2 - 2,27x_1x_2x_3 - 1,20z_1 + 1,58x_1x_2z_3 - \\ & - 1,35x_1g_3 + 1,43x_1v_3 - 1,55x_1x_2g_3 - 0,72z_2z_3 - 1,30z_1v_3 - \\ & - 1,64z_1x_2v_3 + 1,07z_1x_3 + 1,17x_1x_2v_3 + 0,73x_1z_2x_3 - 0,48x_1z_2z_3, \text{ мкм}. \end{aligned}$$

Формулы для вычисления ортогональных контрастов:

$$x_1^{(1)} = x_1 = 0,0025 (X_1 - 600);$$

$$x_1^{(2)} = z_1 = 1,5 (x_1^2 - 0,666667);$$

$$x_2^{(1)} = x_2 = 0,00166667 (X_2 - 80);$$

$$x_2^{(2)} = z_2 = 2,25 (x_2^2 - 0,555556);$$

$$x_2^{(3)} = g_2 = 3,75 (x_2^3 - 0,911111x_2);$$

$$x_3^{(1)} = x_3 = 0,0625 (X_3 - 34); \quad x_3^{(2)} = z_3 = 2 (x_3^2 - 0,5);$$

$$x_3^{(3)} = g_3 = 3,33333 (x_3^3 - 0,85x_3);$$

$$x_3^{(4)} = v_3 = 7,77778 (x_3^4 - 1,10714 x_3^2 + 0,128571).$$

Адекватность математических моделей

$$\text{Для } \hat{y}_1 \quad F_{13;60}^{\text{эксп}} = 1,6 < F_{0,05;13;60}^{\text{крит}} = 2,297,$$

$$\text{Для } \hat{y}_2 \quad F_{32;60}^{\text{эксп}} = 1,88 > F_{0,05;32;60}^{\text{крит}} = 1,71.$$

Обе модели приемлемы для использования.

Доли рассеивания, объясняемые моделями $\hat{y}_1$ и $\hat{y}_2$ соответственно: 0,999996; 0,9979 – очень высокие. Коэффициенты множественной корреляции $R = 0,999998$; 0,998933 весьма близки к 1 и статистически высокозначимы: F -отношения для R равны 63232; 554 при критических значениях 1,83; 1,95. Информативность моделей очень высокая. Критерий Бокса и Веца для информативности больше 49 для первой модели и равен 14 для второй.

Число обусловленности для обеих моделей $\text{cond} = 1$: коэффициенты максимально устойчивы относительно их случайных возмущений.

Таблица 1 – Рабочая матрица плана эксперимента, результаты повторных опытов и расчетные значения откликов

п/ п	Кодированные значения уровней варьирования факторов			Факторы			Функции					
				Натуральное обозначение			Натуральное обозначение					
				P	l	d	y_1		y_2			
				Кодир. обозначение			Кодированное обозначение					
1	F_1	F_2	F_3	X_1	X_2	X_3	y_1		y_2			
2	0	0	0	200	20	18	Результаты повторных опытов	Расчет. значение отклика	Результаты повторных опытов	Расчет. значение отклика		
3	1	1	1	600	60	26						
4	2	2	2	1000	100	34						
5	–	3	3	–	140	42						
6	–	–	4	–	–	50	y_{11}	y_{12}	$\hat{y}_1$	y_{21}	y_{22}	$\hat{y}_2$
7	О п ы т	1	200	20	18	12	13	12,6	8	8	8,5	
8		2	200	20	26	11	10	11,0	8	7	8,5	
9		3	200	20	34	8	8	8,5	7	7	7,4	
10		4	200	20	42	8	9	8,6	7	8	8,1	
11		5	200	20	50	8	9	8,9	8	9	8,2	
12		6	200	60	18	38	39	38,8	13	13	11,1	
13		7	200	60	26	22	22	22,1	9	10	7,3	
14		8	200	60	34	12	12	11,3	8	9	7,7	
15		9	200	60	42	11	12	12,0	8	8	7,4	
16		10	200	60	50	9	9	8,9	8	7	8,2	
17		11	200	100	18	118	118	117,3	17	17	17,1	
18		12	200	100	26	50	50	50,3	9	10	9,7	
21		15	200	100	50	15	16	15,3	9	10	8,8	
22		16	200	140	18	268	266	267,0	25	26	26,8	
23		17	200	140	26	100	98	98,9	16	14	15,6	
31		25	600	20	50	22	23	21,9	18	19	17,5	
32		26	600	60	18	120	121	120,1	40	39	41,2	
33		27	600	60	26	68	68	67,6	27	28	26,9	
36		30	600	60	50	29	29	28,7	19	19	20,5	
37		31	600	100	18	348	350	350,2	58	54	54,9	
38		32	600	100	26	148	147	147,1	30	31	31,0	
41		35	600	100	50	43	44	44,3	24	25	24,7	
42		36	600	140	18	789	790	789,5	70	72	69,7	
43		37	600	140	26	281	280	280,6	36	41	38,3	
44		38	600	140	34	127	125	126,3	46	54	47,9	
45		39	600	140	42	80	80	80,3	31	32	30,8	
46		40	600	140	50	66	67	66,5	29	30	30,0	
54		48	1000	60	34	66	66	65,4	40	38	39,1	
57		51	1000	100	18	580	584	581,6	89	83	85,0	
58		52	1000	100	26	238	237	237,2	49	49	50,7	
60		54	1000	100	42	87	87	87,3	40	39	40,5	
61		55	1000	100	50	73	73	72,4	39	40	39,3	
62		56	1000	140	18	1296	1292	1293,9	101	105	104,4	
63		57	1000	140	26	463	461	462,1	60	65	61,8	
64		58	1000	140	36	218	214	215,8	62	69	66,1	
65		59	1000	140	42	137	140	138,3	52	54	53,1	
66		60	1000	140	50	112	112	112,0	48	50	48,1	
Примечание. Приведены отдельные фрагменты рабочей матрицы												

Примечание. Приведены отдельные фрагменты рабочей матрицы

Эффективность извлечения полезной информации – 100%. Коэффициенты моделей отвечают критериям D -, A -, E -, G -оптимальности. Они также ортогональны, информационно семантически.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование по схеме полного факторного эксперимента позволило получить прецизионные математические модели, удовлетворяющие всему комплексу необходимых требований.

Общий вывод: математические модели соответствуют всем необходимым критериям качества и могут быть использованы для прогноза упругих деформаций технологической системы токарного станка.

Недостаточность исходной информации при статистическом моделировании сложных систем создает усло-

вия некорректно решаемой задачи. Необходим системный подход к формированию условий, при которых решаемая задача будет корректно поставленной. Таким условием является использование расширенной концепции ортогональности и структуры модели полного факторного эксперимента. Используемый подход позволяет получить многофакторные статистические модели с наилучшими возможными критериями качества. Модели $\hat{y}_1$ и $\hat{y}_2$ адекватны, информативны, устойчивы, эффективны. Они характеризуются как семантические, что позволяет использовать их в предметной области для интерпретации влияния воздействующих факторов.

Используемый метод построения моделей позволяет получить статистически независимые коэффициенты с минимально возможными их среднеквадратическими ошибками.

Использование аналогичных многофакторных математических моделей совместно с обработкой на станках с числовым программным управлением позволяет для нежестких деталей программно предсказать траекторию движения инструмента и добиться более точной обработки без увеличения числа проходов инструмента.

Примеры успешно решенных реальных задач приведены в [9].

С разработанными методами моделирования и полученными результатами можно ознакомиться в [11, 12].

ВЫВОДЫ

1. При отсутствии необходимой информации для получения статистических моделей необходимо использовать расширенную концепцию ортогональности: план эксперимента, структура моделей и эффекты моделей должны быть ортогональными или близкими к ортогональным. Структуру определяемой модели следует выбирать из элементов структуры модели полного факторного эксперимента.

2. Использование ортогональной структуры модели, когда структурные элементы модели ортогональны друг другу, позволяет получить несмещенные коэффициенты модели, минимальные среднеквадратические ошибки коэффициентов, максимально устойчивую структуру модели. Критерии качества такой модели являются наилучшими из возможных.

3. Если выполнить необходимые условия получения статистических моделей не представляется возможным, необходимо применять квазиусловия путем использования эвристических решений. Использование методологии теории планирования эксперимента позволяет получить наилучшие условия решения задачи моделирования и решать ее как корректно поставленную.

4. Получение характеризующихся наилучшими возможными критериями качества статистических моделей упругих деформаций консольно закрепленной детали при обточке ее на токарном станке подтвердило правильность выбранного подхода и метода получения высокоточных моделей. Использование моделей на станках с числовым программным управлением позволяет сократить время обработки заготовки за счет сокращения числа проходов режущего инструмента.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения» Национального технического университета Ук-

раины «Киевский политехнический институт» им. И. Сикорского. Автор благодарен ст. преподавателю Лапачу С. Н. за полезные замечания при обсуждении статьи и доц. Беланенко В. Г. за участие в проведении эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современные методы оптимизации композиционных материалов / [Вознесенский В. А., Выровой В. Н., Керш В. Я. и др.]; под ред. В. А. Вознесенского. – К. : Будівельник, 1983. – 144 с.
2. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.
3. Айвазян С. А. Прикладная статистика: Исследования зависимостей : справ. изд. / С. А. Айвазян, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1985. – 487 с.
4. Прикладная статистика. Основы эконометрики: Учебник для вузов: В 2 т. 2-е изд. испр. – Т. 1 : Айвазян С. А., Мхитарян В. С. Теория вероятностей и прикладная статистика. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 656 с.
5. Малов С. В. Регрессионный анализ. Теоретические основы и практические рекомендации / С. В. Малов. – Санкт-Петербург : Изд-во СПбГУ, 2013. – 280 с.
6. Hinkelmann K. Design and Analysis of Experiments, Introduction to Experimental Design / Klaus Hinkelmann, Oscar Kempthorne. – 2 edition. – Vol. 1. – Wiley-Interscience, 2007. – 631 p. – (Wiley Series in Probability and Statistics).
7. Радченко С. Г. Формализованные и эвристические решения в регрессионном анализе : монография / Радченко С. Г. – К. : «Корнійчук», 2015. – 236 с.
8. Оптимизация светодиодной системы освещения витаминной космической оранжереи / [Коновалова И. О., Беркович Ю. А., Ерохин А. Н. и др.] // Авиакосмическая и экологическая медицина. – 2016. – Т. 50, № 3. – С. 17–22.
9. Радченко С. Г. Методология регрессионного анализа : монография / С. Г. Радченко. – К. : «Корнійчук», 2011. – 376 с.
10. Радченко С. Г. Анализ методов моделирования сложных систем / С. Г. Радченко // Математичні машини і системи. – 2015. – № 4. – С. 123–127.
11. Лаборатория экспериментально-статистических методов исследований (ЛЭСМИ). – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.n-t.org/sp/lesmi>
12. Сайт кафедры «Технология машиностроения» Механико-машиностроительного института Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tm-mm.kpi.ua/index.php/ru/1/publications/>

Статья поступила в редакцию 07.02.2017.

После доработки 04.04.2017.

Радченко С. Г.

Д-р техн. наук, профессор кафедры технології машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського, Київ, Україна

КОРРЕКТНЕ СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ В УМОВАХ НЕПОВНОЇ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Актуальність. Розглянуто завдання статистичного моделювання складних систем і процесів в умовах неповної первинної інформації.

Метою роботи є використання методу формалізованого отримання структури багатфакторної статистичної моделі і стійкого оцінювання її коефіцієнтів для одержання високоточних статистичних моделей пружних деформацій технологічної системи токарного верстата.

Методи. При вирішенні прикладних задач аналіз первинних даних отримання статистичних моделей показав, що часто вони будуються в умовах неповної первинної інформації і розв'язувана задача є некоректно поставленою. В таких умовах проблемами побудови моделей є отримання структури моделі і її стійкість. Запропоновано розширену концепцію ортогональності одержуваної моделі: план експерименту, структура моделі та структурні елементи моделі ортогональні. Ортогональна структура багатфакторної статистичної моделі дозволяє отримати статистично незалежні оцінки коефіцієнтів модельованої функції. Така структура може бути визначена однозначно зі статистично значущими коефіцієнтами. Нормування ортогональних ефектів дозволяє отримати максимально стійку структуру моделі і, отже, її коефіцієнтів. Розв'язувана задача буде коректно поставленою.

Результати. Застосування розглянутого методу формалізованого отримання структури багатфакторної статистичної моделі і стійкого оцінювання її коефіцієнтів використано для одержання високоточних статистичних моделей пружних деформацій оброблюва-

ної на токарному верстаті сталеві заготовки. Виконано повний факторний експеримент, де факторами служили сила різання, довжина заготовки, діаметр заготовки, а відгуком (функцією) – величина пружних деформацій системи. За результатами експерименту побудовано статистичні регресійні моделі деформацій $\hat{y}_1$ і $\hat{y}_2$. У структурі моделей фактори представлені ортогональними контрастами. При формуванні структури моделі в неї вводяться статистично значущі ефекти. Проведені перевірки одержаних моделей за критеріями якості показали їх високу інформативність, стійкість, адекватність, статистичну ефективність. Використання моделей на верстатах з числовим програмним управлінням дозволяє скоротити кількість проходів ріжучого інструмента і, отже, час обробки деталі.

Висновки. Результати використання розширеної концепції ортогональності і структури моделі повного факторного експерименту при отриманні моделей пружних деформацій технологічної системи токарного верстата підтвердили перспективність застосування розглянутого підходу, його ефективність і доцільність при побудові регресійних статистичних моделей складних систем і процесів.

Ключові слова: статистичне моделювання, некоректні задачі, стійка структура статистичної моделі, розширена концепція ортогональності.

Radchenko S. G.

Dr. Sc., Professor Department of Mechanical Engineering, I. Sikorsky National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

CORRECT STATISTICAL MODELING IN CONDITIONS OF INCOMPLETE INITIAL INFORMATION

Context. Urgent problem of statistical modeling of the complex systems and processes in conditions of incomplete initial information has been considered.

Objective. The work objective is the use of the method of formalized obtaining of the structure of multifactor statistical model and stable estimation of its coefficient for obtaining highly precise statistical models of elastic deformations of technological system of a lathe.

Methods. When solving applied problems, the analysis of initial data on obtaining statistical models has shown that they are often constructed in conditions of incomplete initial information and the problem which is solved is incorrectly formulated one. In such conditions the model structure obtaining and its stability prove to be the problems in models construction. The author proposes an extended conception of orthogonality of the obtained model: the experiment design, model structure and structure elements of the model are orthogonal. The orthogonal structure of the multifactor statistical model allows obtaining statistically independent estimates of coefficients of the modeled function. Such a structure may be defined unambiguously with statistically significant coefficients. Normalization of orthogonal effects permits obtaining a maximally stable model structure, and, consequently, its coefficients. The problem will be well-posed.

Results. Application of the considered method of formalized obtaining of the structure of multifactor statistical model and stable estimation of its coefficients is used for obtaining accurate statistical models of elastic deformations of a steel work-piece processed by a lathe. A complete factor experiment has been fulfilled; the factors were as follows: cutting force, work-piece length and diameter, and a response – the value of elastic deformations of the system. Statistical regression moments $\hat{y}_1$ and $\hat{y}_2$ were constructed as the experiment result. In the structure of models the factors are presented by orthogonal contrasts. Statistically significant effects are introduced in the model structure under its formation. The checks of the obtained models by quality criteria have shown their high informativeness, stability, adequacy, statistical efficiency. Using the models on lathes with numerical programmed control allows decreasing the number runs of the cutting tool and, consequently, the time of work-piece processing.

Conclusion. The results of the use of the extended conception of orthogonality and structure of the model of a complete factor experiment, when obtaining the models of elastic deformations of technological system of a lathe, have confirmed the great prospects of application of the considered approach, its effectiveness and expediency in constructing regression statistical models of complex systems and processes.

Keywords: statistical modeling, ill-posed problems, stable structure of statistical model, extended conception of orthogonality.

REFERENCES

1. Voznesenskij V. A., Vy'rovoy V. N., Kersh V. Ya. i dr. pod red. V. A. Voznesenskogo *Sovremenny'e metody' optimizacii kompozicionny'x materialov*. Kyiv, Budivelnik, 1983, 144 p.
2. Noviczkiy P. V., Zograf I. A. *Izdanie 2, pererabotannoe i dopolnennoe Ocenka pogreshnostej rezultatov izmerenij*. Leningrad, Energoatomizdat, 1991, 304 p.
3. Ajvazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D., pod red. S. A. Ajvazyan. *Prikladnaya statistika: Issledovanie zavisimostej: Spravochnoe izdanie*. Moscow, Finansy i statistika, 1985, 487 p.
4. Ajvazyan S. A., Mxitaryan V. S. *Pikladnaya statistika. Osnovy ekonometriki: Uchebnik dlya vuzov, v 2 tomax, izdanie 2, ispravlennoe*. Vol. 1, *Teoriya veroyatnostej i prikladnaya statistika*. Moscow, YUNITI-DANA, 2001, 656 p.
5. Malov S. V. *Regressionny'j analiz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskie rekomendacii*. St.Petersbourg, Izdatelstvo SPbGU, 2013, 280 p.
6. Hinkelmann K. Kempthorne O. *Design and Analysis of Experiments, Introduction to Experimental Design*, 2 edition, Vol. 1, Wiley-Interscience, 2007, 631 p. (Wiley Series in Probability and Statistics).
7. Radchenko S. G. *Formalizovanny'e i e'vristicheskie resheniya v regressionnom analize: monografiya*. Kyiv, «Kornijchuk», 2015, 236 p.
8. Konovalova I. O., Berkovich Yu. A., Eroxin A. N. i dr. *Optimizaciya svetodiodnoj sistemy' osveshheniya vitaminnoj kosmicheskoy oranzherei, Aviakosmicheskaya i e'kologicheskaya medicina*, 2016, Vol. 50, No. 3, pp. 17–22.
9. Radchenko S. G. *Metodologiya regressionnogo analiza : monografiya*. Kyiv, «Kornijchuk», 2011, 376 p.
10. Radchenko S. G. *Analiz metodov modelirovaniya slozhnih sistem, Matematichni mashini i sistemi*, 2015, No. 4, pp. 123–127.
11. Laboratory of experimental statistical method of investigation (LESMI) [Electronic resource]. Access mode: <http://www.n-t.org/sp/lesmi>
12. Site of the Department Mechanical Engineering, Mechanical Engineering Institute, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute» [Electronic resource]. Access mode: <http://tm-mmi.kpi.ua/index.php/ru/1/publications/>

Шигимага В. А.¹, Мегель Ю. Е.², Коваленко С. В.³, Коваленко С. Н.⁴

¹Д-р техн. наук, ст. научн. сотр., доцент кафедры технических систем и технологий животноводства им. Б. П. Шабельника Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, Харьков, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой кибернетики Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, Харьков, Украина

³Канд. техн. наук, доцент кафедры системного анализа и информационно-аналитических технологий Национального технического университета «ХПИ», Харьков, Украина

⁴Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры кибернетики Харьковского национального технического университета сельского хозяйства им. Петра Василенко, Харьков, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПОРАЦИИ МЕМБРАНЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ В ИМПУЛЬСНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ С ИЗМЕНЯЕМОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ

Актуальность. В работе с помощью методов нелинейной аппроксимации решена задача построения моделей электропорации мембран биологических клеток по экспериментальным зависимостям их удельной электропроводности от напряженности импульсного электрического поля.

Цель работы – построение моделей, адекватно описывающих экспериментально полученные нелинейные эффекты проводимости клетки, включая обратимую электропорацию, необратимый электропробой или локальный обратимый электропробой мембран при слиянии двух контактирующих клеток.

Методы. В качестве функций, моделирующих экспериментальные данные, выбраны полиномы 8–10 степеней, а критериями оценки параметров электропорации определены координаты локальных экстремумов их кривизны и точек перегиба, которые характеризуют конкретное состояние мембраны клетки при данной напряженности поля. Задача аппроксимации решалась методом наименьших квадратов. Вычисление оценки коэффициентов полиномов производилось методом Гаусса – реализованы прямой и обратный ход. Имеется возможность отыскивать экстремумы полученных полиномов высоких степеней, задавая погрешность вычислений. Для подбора степени полинома использована среднеквадратическая ошибка аппроксимации. Вычислив первые и вторые производные проводимости, рассчитывается текущая кривизна полинома. Полученные предложенными методами значения кривизны позволяют определить точки перегиба кривой для определения электропробоя мембраны клетки.

Результаты. Разработано прикладное программное обеспечение, с помощью которого построены полиномиальные модели проводимости биологической клетки в изменяемом по напряженности импульсном электрическом поле и проведен их количественный математический анализ. Все указанные расчеты подтверждаются графиками, часть из которых можно просмотреть в увеличенном масштабе.

Выводы. Вычислены параметры электропорации мембраны биологической клетки, полученные путем анализа функции кривизны полиномиальных моделей. Разработанные аналитические методы и программное обеспечение для определения параметров электропорации позволяют рекомендовать их для использования на практике при вычислении числовых значений напряженности поля и проводимости, при которых обеспечиваются конкретные режимы электропорации мембраны биологической клетки.

Ключевые слова: импульсное электрическое поле, напряженность, электропорация, мембрана, биологическая клетка, моделирование, алгоритм, аппроксимация, полином.

НОМЕНКЛАТУРА

$G_{\text{кл}}$ – проводимость клетки;
 $G_{\text{уд}}$ – удельная проводимость;
 $G_{\text{эл}}$ – проводимость клетки и среды между микроэлектродом;
 G' – первая производная полинома;
 G'' – вторая производная полинома;
 E – напряженность поля;
 F_k – геометрический параметр микроэлектрода;
 K – текущая кривизна полинома;
 K' – первая производная кривизны;
 L – расстояние между микроэлектродами;
 R – номинал резистора;
 S – среднеквадратическая ошибка аппроксимирующего полинома;
 $S_{(p)}$ – среднеквадратическая ошибка аппроксимирующего полинома степени p ;

U_R – падение напряжения на последовательном резисторе;

$U_{\text{вх}}$ – напряжение генератора импульсов на входе микроэлектродной ячейки;

a – оцениваемые коэффициенты полинома;

d – диаметр одного из микроэлектродов;

p – степень аппроксимирующего полинома;

n – количество значений в наборах E и G .

ВВЕДЕНИЕ

Импульсное электрическое поле (ИЭП) широко применяется в новейших биотехнологиях для электроманипуляции с биологическими клетками, которая лежит в основе современных методов клеточной и геномной инженерии [1–3]. Основным из методов электроманипуляции является электропорация – адекватное действие на транспортную функцию мембраны клетки путем временного повышения ее проницаемости за счет образования электропор в ИЭП, которое формируется специальной

аппаратурой в жидкой среде с клетками [2–4]. Применение метода электропорации требует обоснования определенных электрических режимов обработки в ИЭП живых биологических клеток так, чтобы они остались функциональными для дальнейшего использования, в частности, в репродукции животных. Значения параметров этих режимов определяются, в первую очередь, электрическими характеристиками мембраны, клетки и жидкой среды. Эти характеристики можно получить в ходе измерений проводимости биологической клетки методом и аппаратурой импульсной кондуктометрии в изменяемом по напряженности ИЭП (ИНИЭП) [5]. Изменяемая напряженность поля обеспечивает различную степень электропорации мембраны и поэтому дает возможность обосновать и рассчитать все необходимые режимы воздействия на клетку по ее изменяющейся проводимости. Это позволяет в рамках единого аппаратно-методического процесса импульсной кондуктометрии не только реализовать известные, но и в перспективе разрабатывать новые приложения электропорации в биотехнологии репродукции животных и биомедицине.

Объект исследования в данной статье – управляемая мембранная проницаемость ооцитов и двухклеточных эмбрионов мыши при электропорации клетки в импульсном электрическом поле с изменяемой напряженностью.

Предмет исследования составляют математические модели аппроксимации кривых полиномами высоких порядков, методы поиска координат локальных экстремумов, их кривизны и точек перегиба, которые характеризуют конкретное состояние мембраны клетки при данной напряженности поля.

Цель исследования – с помощью методов нелинейной аппроксимации и математического анализа исследуется электропроводность биологических клеток, измеренная методом и аппаратурой импульсной кондуктометрии [5].

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С целью теоретического обоснования параметров воздействия на клетки ИНИЭП и режимов электропорации мембраны клетки, а также для предсказания ее поведения при воздействии поля необходимо построить соответствующие модели, адекватно описывающие экспериментально полученные нелинейные эффекты проводимости клетки. В качестве входных параметров выступают значения, измеренные с помощью импульсного кондуктометра – U_R , $U_{вх}$, L , R , F_k , которые являются исходными данными для вычисления зависимости проводимости клетки G от напряженности поля E . Количество измеренных состояний системы всегда ограничено, поэтому в задаче необходимо использовать аппроксимацию кривых проводимости клетки с помощью полиномов высоких порядков. Для решения задачи требуется разработать программное приложение, которое выполняет все математические расчеты и визуализирует полученные результаты.

Выходными данными системы выступают оценки параметров электропорации, являющиеся расчетными точками на экспериментальных кривых проводимости – экстремумы, точки перегиба и т. п., которые характеризуют конкретное состояние мембраны клетки при задан-

ной напряженности поля – обратимая электропорация, необратимый электропробой или локальный обратимый электропробой мембран при слиянии двух контактирующих клеток [2].

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Математических моделей явления электропорации было построено множество [1–3, 5–10] и все они лишь только в той или иной степени приблизились к описанию эффектов воздействия ИЭП на мембрану реальной биологической клетки. В то же время в известных теоретических моделях проводимость клетки, как естественный индикатор процесса электропорации мембраны, мало используется в качестве параметра [8, 9], а при условии непрерывного действия на мембрану и клетку ИНИЭП почти не рассматривается совсем, за исключением небольшого числа работ [11, 12]. К этому следует добавить, что теоретических моделей электропорации мембраны репродуктивных биологических клеток в ИНИЭП существуют, по-видимому, пока только единицы [10, 13]. Для моделирования электропорации мембран в ИЭП обычно предпочитают использовать простые биологические клетки, например, безъядерные эритроциты, которым посвящена огромная масса исследований, а также совсем простые по устройству и предсказуемые по физическим свойствам искусственные билипидные мембраны (БЛМ) или абстрактные сферические клетки [1–4, 6–9, 11–14]. Намного более сложные по устройству и составу репродуктивные клетки животных (ооциты) и, особенно, многоклеточные эмбрионы очень трудны, как биообъекты, для моделирования эффектов электропорации и электропроводности с применением ИНИЭП. Учитывая то, что эти клетки являются главными биообъектами бурно развивающихся в мире репродуктивной биотехнологии и биомедицины, проблемы построения теоретических моделей, разработки на их основе методов и аппаратуры для определения и прогнозирования электрических характеристик живых клеток на разных стадиях их развития (ооциты, эмбрионы) являются актуальными.

В литературе по электропорации известны лишь единичные работы, в которых также изучался и моделировался электропробой в ИНИЭП, но искусственной БЛМ при линейном росте амплитуды импульсного напряжения на ней [11, 12]. Однако в этом исследовании проводимость, как объективный показатель процесса развития электропорации с ростом напряженности поля, не определялась, а констатировался лишь факт электропробоя БЛМ при превышении установленной критической амплитуды импульса. Кроме того, измерения проводимости и моделирование ее в процессе электропорации мембраны живой биологической клетки в ИНИЭП, а также электропробой, как конечный результат ее взаимодействия с возрастающим по напряженности полем, ранее наших работ, по-видимому, не проводились [5, 10].

Для поиска характерных параметров, определяющих состояние мембраны и ее целостность, можно построить несколько математических моделей, основанных на аппроксимации экспериментальных зависимостей различными функциями. Эти параметры обусловлены технологической необходимостью воздействия на клетки

ИЭП для реализации режимов электрослияния, стимуляции, электропробоя и др. Одна из моделей может быть построена на основе кусочно-линейной аппроксимации, при которой экспериментальная кривая проводимости условно делится на две ветви – квазилинейного роста с небольшой скоростью до пробоя и резкого экспоненциального роста после необратимого электропробоя мембраны. Значения параметров необратимого электропробоя мембраны клетки могут быть получены графоаналитически, как координаты точки пересечения двух аппроксимирующих прямых [10]. Ниже рассмотрен более сложный, но и более информативный, метод математического моделирования экспериментальных данных, который позволяет определить не только параметры электропробоя, но и обеспечивает определение всех промежуточных допробойных параметров обратимой электропорации мембраны клетки. Знание этих параметров дает перспективу интеллектуального управления транспортной функцией мембраны с целью поэтапной и мягкой «загрузки» клетки молекулами различных веществ и размеров, что, собственно, и составляет один из предметов клеточной и генной инженерии [1–3].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Моделирование и математический анализ параметров электропорации и электропробоя мембраны выполнены с использованием массивов первичных данных измерений, полученных в ходе экспериментов на модельном объекте, репродуктивных клетках мыши (ооцитах, эмбрионах) с помощью комплекса импульсной кондуктометрической аппаратуры для определения удельной электропроводности биологических клеток [10].

Измерения проводимости биологических клеток (ооцитов и эмбрионов мыши) выполнены посредством импульсного кондуктометра [5]. Схема измерения первичных электрических параметров показана на рис. 1.

Проводимость биологической клетки, находящейся между микроэлектродами импульсного кондуктометра определяется по следующим формулам [5]:

$$G_{эл} = \frac{U_R}{R(U_{вх} - U_R)}. \quad (1)$$

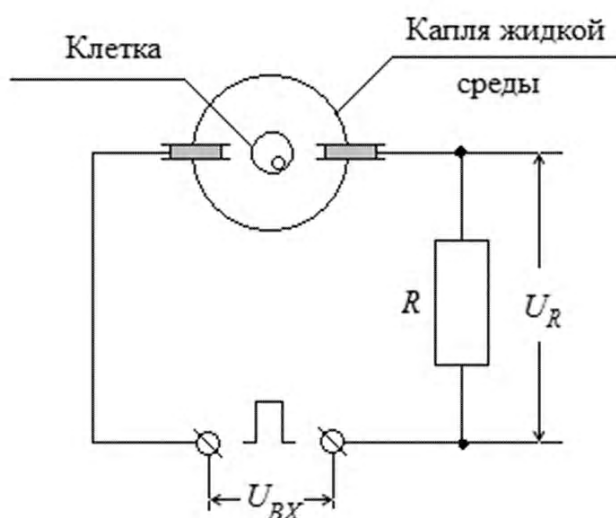


Рисунок 1 – Первичные измеряемые электрические параметры

Для вычисления удельной проводимости $G_{уд}$ полученное значение (1) необходимо умножить на геометрический параметр микроэлектродов Fk (2). Для получения собственной удельной проводимости клетки $G_{уд}$, находящейся в жидкой среде, из общей проводимости вычитают удельную проводимость среды, предварительно измеренную в капле без клетки (3).

$$Fk = \frac{12 \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4L^2}{d^2}} \right)}{\pi \left[3 \frac{d^2}{L} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4L^2}{d^2}} \right) + 4L \right]}. \quad (2)$$

$$G_{кл} = G_{уд} - G_{ср}. \quad (3)$$

Далее наносят значения проводимости клетки на график $G_{кл} = f(E)$ в зависимости от напряженности поля E , которую вычисляют по формуле:

$$E = \frac{U_{вх} - U_R}{L}. \quad (4)$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Построение графиков по экспериментальным точкам выполнено с помощью табличного процессора Microsoft Excel. Необходимость разработки собственного программного обеспечения связано с отысканием коэффициентов полиномов высоких степеней, тогда как стандартные пакеты, обычно, ограничиваются шестой степенью.

В основу полиномиальной модели положен усовершенствованный способ определения параметров электропробоя мембраны клетки [10]. Суть усовершенствования состоит в нелинейной аппроксимации экспериментальной зависимости проводимости клетки от напряженности поля путем моделирования кривой проводимости полиномом высокой степени. Для решения задачи был использован метод наименьших квадратов, предполагающий решение системы линейных алгебраических уравнений (5) относительно наборов значений E и G .

$$\begin{cases} a_0 n + a_1 \sum_{i=1}^n E_i + a_2 \sum_{i=1}^n E_i^2 + \dots + a_p \sum_{i=1}^n E_i^p = \sum_{i=1}^n G_i, \\ a_0 \sum_{i=1}^n E_i + a_1 \sum_{i=1}^n E_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n E_i^3 + \dots + a_p \sum_{i=1}^n E_i^{p+1} = \sum_{i=1}^n G_i E_i, \\ \dots \\ a_0 \sum_{i=1}^n E_i^p + a_1 \sum_{i=1}^n E_i^{p+1} + a_2 \sum_{i=1}^n E_i^{p+2} + \dots + a_p \sum_{i=1}^n E_i^{2p} = \sum_{i=1}^n G_i E_i^p. \end{cases} \quad (5)$$

Решение системы (5) осуществили с помощью метода Гаусса, реализовав прямой и обратный ход этого метода [15]. Реализация данного метода позволила вычислять коэффициенты полинома до $n-1$ степени включительно. К преимуществам метода можно отнести его быстрое действие и использование не значительных ре-

сурсов компьютера. Для исходных данных, заданных в табл. 1 рассчитаем коэффициенты полинома аппроксимации девятой степени.

Полученный полином имеет вид (6) и представлен на рис. 2.

$$G = 21,92 - 38,08E + 116,95E^2 - 190,51E^3 + 181,76E^4 - 93,08E^5 + 18,98E^6 + 2,34E^7 - 1,58E^8 + 0,18E^9. \quad (6)$$

Далее, по известной формуле дифференциальной геометрии определена кривизна полученного полинома, как функция напряженности поля:

$$K = \frac{G''}{\left[1 + (G')^2\right]^{3/2}} = f(E). \quad (7)$$

Таблица 1 – Исходные данные

<i>n</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>n</i>	<i>E</i>	<i>G</i>	<i>n</i>	<i>E</i>	<i>G</i>
1	0,23	11,38	6	1,42	19,43	11	2,60	27,25
2	0,47	17,38	7	1,65	21,18	12	2,84	32,40
3	0,71	16,70	8	1,89	20,96	13	3,07	32,03
4	0,94	19,43	9	2,13	21,25	14	3,31	31,72
5	1,18	20,24	10	2,36	21,06	15	3,50	35,32

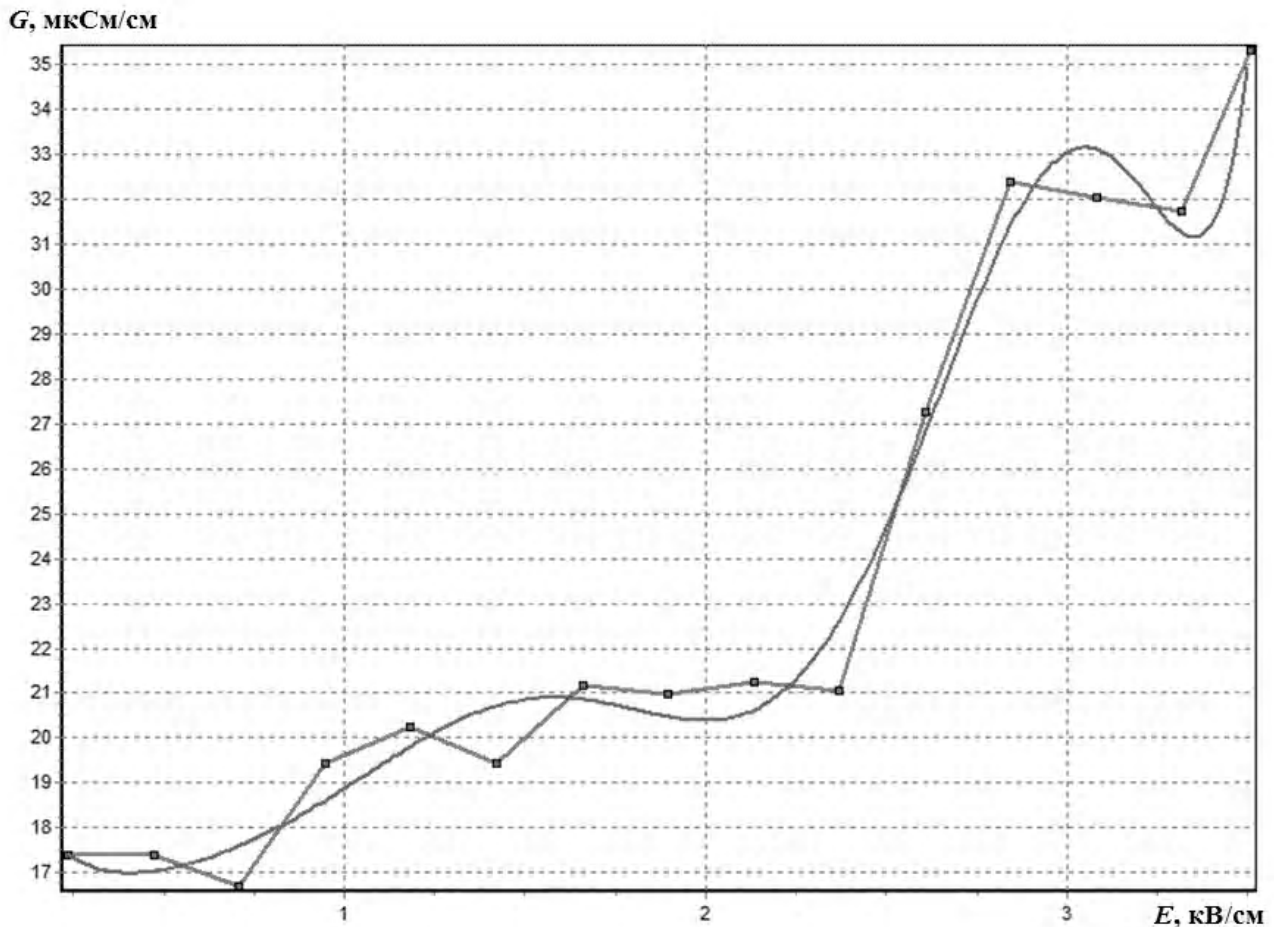


Рисунок 2 – Графики исходных данных и аппроксимирующего полинома девятой степени

Затем проведен математический анализ функции кривизны полинома $K = f(E)$ на наличие максимума, т. е. выполнено необходимое условие экстремума, которое требует равенство нулю первой производной этой функции:

$$K' = f'(E) = 0. \quad (8)$$

Координаты точки, соответствующей необратимому электропробу мембраны, получены с помощью вычисленного максимального значения кривизны кривой. Полученное значение K для представленного полинома равно 20,3374 – что соответствует значениям $E = 2,00$ кВ/см и $G(E) = 20,39$ мкСм/см.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости удельной проводимости ооцитов и 2-клеточного эмбриона мыши от ИНИЭП, полученные с помощью метода и аппаратуры импульсной кондуктометрии. Морфологически (визуально, с помощью световой микроскопии) все клетки перед измерениями проводимости отнесены к хорошему качеству.

Однако после измерений оказалось, что клетка 3 показала пониженные значения проводимости и небольшой ее наклон к оси напряженности. Электропробой мембраны в ней не наблюдался совсем. Напротив, клет-

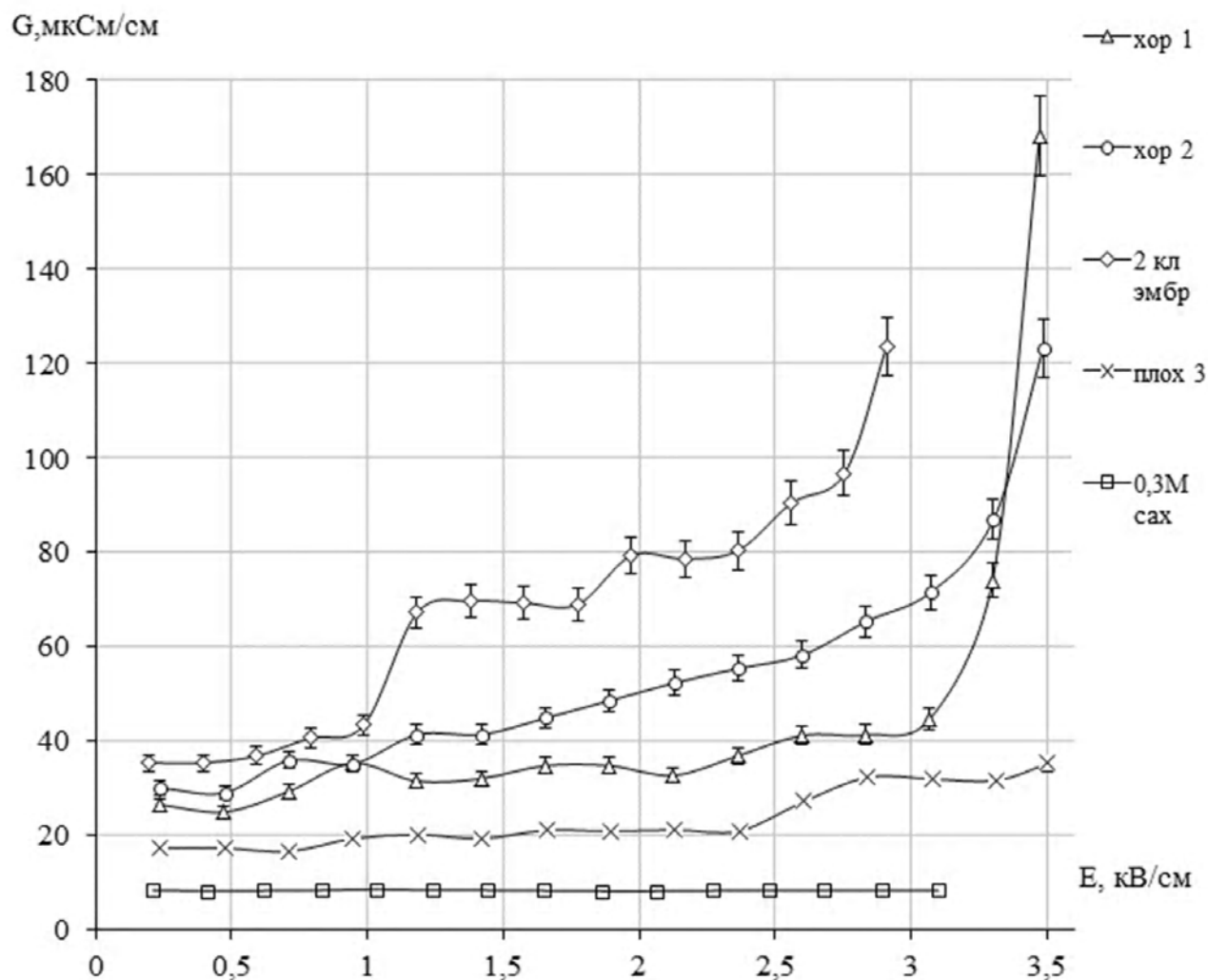


Рисунок 3 – Експериментальні залежності удельної провідності ооцитів миши різного качества (1,2 – хороші, 3 – поганий), 2-клеточного ембріона (4) і 0,3М сахарози від ІНІЕП

ки 1 і 2 показали наявність електропробу при напруженості 3–3,3 кВ/см, а також зворотню електропорацію при більш низьких напруженостях. Раніше нами було встановлено, що провідність може бути використана, як діагностичний параметр для оцінки якості репродуктивних клітин [16]. Тому, згідно з даними вимірювань провідності, клітини 1 і 2 віднесені до хорошого якості, а клітина 3 – до поганого. Крім того, клітинку 2 можна додатково класифікувати, як більш молоді, оскільки у неї початкова провідність і нахил до осі напруженості вище, що означає більш високий рівень іонного гомеостазу цитоплазми. Двох-клітинний ембріон, згідно з даними провідності, був хорошого якості, про що свідчить зворотня електропроба мембран контактуючих бластомерів при напруженості близько 1,1 кВ/см. На графіку для порівняння наведено також залежність провідності розчину 0,3 М сахарози, в якому виконувалися вимірювання.

Розглянемо принцип побудови математичної моделі, яка дозволяє провести кількісний аналіз електропорації мембрани по експерименталь-

ним залежностям провідності клітин в ІНІЕП для визначення параметрів апаратури електроманіпуляції. Для моделювання і подальшого аналізу всіх екстремумів кривизни і точок перегибу цих залежностей (від проміжних, що означають різну ступінь зворотньої електропорації, до головної, що означає незворотню електропробу мембрани) цілком природно застосувати нелінійну апроксимацію всієї кривої провідності поліномом високої ступені [10]. На рис. 4 показано інтерфейс розробленого програмного забезпечення, яке дозволяє проводити дослідження експериментальних даних провідності клітин.

До таких досліджень віднесені:

- визначення коефіцієнтів апроксимуючого полінома високої ступені (на рис. 4 наведено поліном дев'ятого ступеня);
- визначення середньквадратичної помилки між фактичними даними і значеннями апроксимуючого полінома;
- розрахунок кривизни кривої і пошук її найбільшого значення;

– вычисление экстремумов и точек перегиба, которые означают конкретный режим электропорации мембраны клетки для полученного аппроксимирующего полинома;

– построение аппроксимирующей прямой и поиск точки пересечения с графиком исходных данных на ограниченном участке.

Применяя полученную полиномиальную модель, координаты точек обратимой электропорации и необратимого электропробоя мембраны клеток можно найти, анализируя функцию кривизны аппроксимирующего полинома на всей кривой проводимости. Условие экстремумов функции кривизны (8), которое после дифференцирования уравнения (7) и упрощений приобретает вид:

$$\frac{d^3G}{dE^3} \left[1 + \left(\frac{dG}{dE} \right)^2 \right] - 3 \left(\frac{d^2G}{dE^2} \right)^2 \frac{dG}{dE} = 0. \quad (9)$$

Решая соответствующее степенное уравнение, которое получаем после подстановки аппроксимирующего полинома в дифференциальное уравнение (9), находим координаты (напряженности) всех точек кривизны, причем, максимальная кривизна соответствует необратимому пробое, а все промежуточные – это различные степени электропорации мембраны.

На практике целесообразно использовать приближенные методы расчета для поиска экстремумов функции $G(E)$. В указанных точках первая производная меняет знак, а, следовательно, можно отыскать корень заданной функции с помощью численных методов [15, 17]. Воспользуемся простым методом дихотомии, который на заранее локализованных интервалах отыскивает экстремум с заданной точностью. Определение того, что минимум или максимум мы отыскивали, зависит от знака значения второй производной.

Для объективного анализа полученных данных была проведена аппроксимация экспериментальных кривых проводимости (рис. 3) различными полиномами и их

математическая обработка с целью получения числовых значений напряженности и проводимости клеток на характерных участках. В табл. 2 представлены результаты расчета параметров электропорации и необратимого электропробоя мембраны ооцитов мыши по экстремумам кривизны аппроксимирующих полиномов степеней 8–10. Расчет точек перегиба, в которых значение кривизны (7) равно 0, проведен с помощью численных методов отыскания корней функции. Применение метода дихотомии позволило получить, в частности для 2-клеточного эмбриона, следующие значения, представленные в табл. 3. В качестве аппроксимирующих также были взяты полиномы 8–10 степеней.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В разработанном программном приложении имеется возможность выбирать степень аппроксимирующего полинома p до $n-1$ включительно. Однако, с возрастанием степени полинома, увеличивается количество ложных экстремумов. Это связано с приближением полинома к узловым точкам исходных данных. Для ограничения разности вводится средняя квадратическая ошибка:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \hat{E}_i)^2}{n-p}}. \quad (10)$$

Из формулы (10) следует, что, начиная с некоторого значения величины p , значение ошибки аппроксимации будет увеличиваться. Для всех проведенных расчетов таким граничным значением степени полинома оказалось $p = 10$ – после данного значения величина S начала увеличиваться (для некоторых объектов очень резко). Например, для 2-клеточного эмбриона $S_{(p=8)} = 5,247$; $S_{(p=9)} = 5,027$; $S_{(p=10)} = 4,502$ и $S_{(p=11)} = 23,250$. Поэтому в расчетах было принято решение ограничиться степенями полинома 8–10.

Таблица 2 – Результаты применения аппроксимирующих полиномов

Параметр		Напряженность, Е кВ/см			Проводимость, G, мкСм/см			Усредненные значения	
		Степень полинома, р			Степень полинома, р				
клетка	процесс	8	9	10	8	9	10	Е кВ/см	G, мкСм/см
ооцит 1	обратимая электро-порация пробой	0,38	0,41	0,60	16,88	16,99	15,69	0,46	16,52
		—	—	1,34	—	—	19,62	1,34	19,62
		2,01	1,99	2,19	20,36	20,39	20,52	2,06	20,42
		3,34	3,35	3,22	31,23	31,17	30,84	3,30	31,08
ооцит 2	обратимая электро-порация пробой	0,35	0,35	0,42	22,32	22,27	24,46	0,37	23,03
		1,22	1,21	1,34	32,84	32,82	32,38	1,26	32,68
		—	—	2,09	—	—	34,46	2,09	34,46
		—	—	2,97	—	—	42,69	2,97	42,69
2 клет. эмбрион	слияние	—	0,26	0,27	—	34,03	21,35	0,26	27,69
		0,57	0,60	0,74	34,72	36,41	35,33	0,64	35,29
		—	1,73	1,58	—	71,35	68,95	1,65	70,15

Таблица 3 – Значения напряженности поля, соответствующие точкам перегиба

Степень полинома	Точки перегиба, для K=0							
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	E_7	E_8
$p=8$	0,41	–	0,99	–	1,71	2,26	2,49	–
$p=9$	0,33	0,55	1,05	–	1,64	2,11	2,45	–
$p=10$	0,33	0,60	0,99	1,48	1,86	2,19	2,54	2,72

Из табл. 2 следует, что электропробой мембран ооцитов 1 и 2 произошел при напряженности поля $E=3,30$ кВ/см и $E=2,97$ кВ/см соответственно, а меньшие значения напряженности для этих клеток означают различные стадии обратимой электропорации.

Из табл. 3 следует, что для 2-клеточного эмбриона электропробой мембраны произошел при напряженности поля $E \geq 2,5$ кВ/см, а меньшие значения напряженности для этой клетки означают соответственно слияние двух бластомеров при $E=1,05$ кВ/см и различные стадии обратимой электропорации ($E=0,55$; 1,64 и 2,11 кВ/см).

Перспектива нелинейного подхода к моделированию и анализу проводимости биологических клеток в ИНИЭП состоит в следующем. Открывается возможность разработки аппаратуры автоматической дифференциальной кондуктометрии, при которой проводимость клетки прямо в процессе измерения аппроксимируется полиномами и вычисляются точки их кривизны и/или перегиба, т.е. значения напряженности всех точек электропорации мембраны от обратимых до необратимого электропробоя. Первые (обратимые) могут применяться для различных электроманипуляций с живой клеткой. Второй (необратимый) – для точечного лизиса клеток с утраченным механизмом природного апоптоза, например, онкологических.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны аналитические методы и программное обеспечение для определения параметров электропорации мембраны биологической клетки, основанные на аппроксимации полиномиальными моделями экспериментальной зависимости проводимости клетки от напряженности ИНИЭП.

2. Вычислены параметры электропробоя и электропорации, полученные путем анализа функции кривизны полиномиальных моделей. Найденные параметры электропорации можно использовать в качестве режимов воздействия ИНИЭП на биологические клетки. Эти режимы необходимы и достаточны для аппаратной реализации методов электроманипуляции, основанных на явлении электропорации клеточной мембраны.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Колесниковой А.А., к. б. н., ст. н. с. Института животноводства НААН (г. Харьков), за помощь при манипуляциях с биологическими клетками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Electroporation / Ed. D. Miklavcic. – Springer International Publishing Switzerland, 2017. – 2316 p.

2. Pakhomov A. G. Advanced Electroporation Techniques in Biology and Medicine / A. G. Pakhomov, D. Miklavcic, M. S. Markov. – NY. : CRC Press, 2010. – 528 p.
3. Weaver J. C. Electroporation / J. C. Weaver, Yu. Chizmadzhev // Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields. – NY. : CRC Press, 2007. – P. 293–321.
4. An Engineered Membrane to Measure Electroporation: Effect of Tethers and Bioelectronic Interface / [W. Hoiles, V. Krishnamurthy, C. G. Cranfield, B. Cornell] // Biophysical Journal. – 2014. – Vol. 107(6). – P. 1339–1351.
5. Shigimaga V. A. Pulsed conductometer for biological cells and liquid media / V. A. Shigimaga // Measurement Techniques. – N.Y. : Springer, 2013. – Vol. 55, No. 11. – P. 1294–1300.
6. Electroporation of archaeal lipid membranes using MD simulations / [A. Polak, M. Tarek, M. Tomsic et al] // Bioelectrochem. – 2014. – No. 100. – P. 18–26.
7. Miklavcic D. Network for Development of Electroporation-Based Technologies and Treatments / D. Miklavcic // Journal of Membrane Biology. – 2012. – Vol. 245. – P. 91–598.
8. Morshed B. I. Deriving an electric circuit equivalent model of cell membrane pores in electroporation / B. I. Morshed, M. Shams, T. Mussivand // Biophysical Reviews and Letters – 2013. – Vol. 8, No. 1. – P. 21–32.
9. Electric fields within cells as a function of membrane resistivity – a model study / [B. J. Mossop, R. C. Barr, D. A. Zaharoff, F. Yuan] // IEEE Transactions on NanoBioscience. – 2004. – Vol. 3, No. 3. – P. 225–231.
10. Шигимага В. О. Біотехнічний комплекс імпульсної кондуктометрії і електроманіпуляції з клітинами тварин : автореф. дис. на здобуття д-ра техн. наук : спец. 05.11.17 «Біологічні та медичні прилади і системи» / В. О. Шигимага. – Харків, 2014. – 36 с.
11. Kramar P. Determination of the lipid bilayer breakdown voltage by means of linear rising signal / P. Kramar, D. Miklavcic, A. M. Lebar // Bioelectrochemistry. – 2007. – Vol. 70, No. 1. – P. 23–27.
12. Electroporation of Planar Lipid Bilayers and Membranes / [M. Pavlin, T. Kotnik, D. Miklavcic, P. Kramar et al] // Advances in Planar Lipid Bilayers and Liposomes. – 2008. – Vol. 6. – P. 165–226.
13. Equivalent Pulse Parameters for Electroporation / [G. Pucihar, J. Krmelj, M. Rebersek et al] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2011. – Vol. 58, No. 11. – P. 3279–3288.
14. Analytical Computation of Electric Field for Onset of Electroporation / [A. K. Dubey, R. Kumar, M. Banerjee, B. Basu] // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. – 2012. – Vol. 9, No. 1. – P. 137–143.
15. Operations Research / [Y. E. Megel, A. P. Rudenko, S. M. Kovalenko et al]. – Kharkiv : «Miskdruk», 2015. – 388 p.
16. Электрическая проводимость как диагностический параметр оценки качества ооцитов и эмбрионов млекопитающих в биотехнологических операциях / [Е. И. Смолянинова, В. А. Шигимага, О. А. Стриха и др.] // Биофизика живой клетки. – 2014. – Т. 10. – С. 193–195.
17. Operations Research, Calculus of Variations and Optimal Control. Part II / [M. Tarulli, G. Venkov, Y. Megel et al]. – Sofia : Technical University. – Sofia, 2016. – 188 p.

Статья поступила в редакцию 29.03.2017.

После доработки 17.04.2017.

Шигимага В. О.¹, Мегель Ю. Є.², Коваленко С. В.³, Коваленко С. М.⁴

¹Д-р техн. наук, ст. науковий співр., доцент кафедри технічних систем і технологій тваринництва ім. Б. П. Шабельника Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, Харків, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри кібернетики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, Харків, Україна

³Канд. техн. наук, доцент кафедри системного аналізу та інформаційно-аналітичних технологій Національного технічного університету «ХПІ», Харків, Україна

⁴Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики Харківського національного технічного університету сільського господарства ім. П. Василенка, Харків, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОПОРАЦІЇ МЕМБРАНИ БІОЛОГІЧНОЇ КЛІТИНИ В ІМПУЛЬСНОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ПОЛІ З НАПРУЖЕНІСТЮ, ЩО ЗМІНЮЄТЬСЯ

Актуальність. В роботі за допомогою методів нелінійної апроксимації розв'язана задача побудови моделей електропорації мембран біологічних клітин за експериментальними залежностями їх питомої електропровідності від напруженості імпульсного електричного поля.

Мета роботи – побудова моделей, що адекватно описують експериментально отримані нелінійні ефекти провідності клітини, включаючи зворотню електропорацію, незворотній електропробій або локальний зворотній електропробій мембран при злитті двох контактуючих клітин.

Метод. В якості функцій, що моделюють експериментальні, обрані поліноми 8–10 степеня, а критеріями оцінки параметрів електропорації визначені координати локальних екстремумів їх кривизни і точок перегину, які характеризують конкретний стан мембрани клітини при даній напруженості поля. Задача апроксимації розв'язувалась методом найменших квадратів. Обчислення оцінки коефіцієнтів поліномів здійснене методом Гауса – реалізовані прямий і зворотний хід. Є можливість відшукувати екстремуми отриманих поліномів високих степенів, задаючи похибку обчислень. Для підбору степеня полінома використана середньоквадратична помилка апроксимації. Обчисливши перші і другі похідні провідності, розраховується поточна кривизна полінома. Значення кривизни полінома, що отримані запропонованими методами, дозволяють визначити точки перегину кривої для визначення електропробою мембрани клітини.

Результати. Розроблено прикладне програмне забезпечення, за допомогою якого побудовані поліноміальні моделі провідності біологічної клітини в імпульсному електричному полі з напруженістю, що змінюється, та проведено їх кількісний математичний аналіз. Всі указані розрахунки підтверджуються графіками, частину з яких можна переглянути у збільшеному масштабі.

Висновки. Обчислено параметри електропорації мембрани біологічної клітини, що отримані шляхом аналізу функції кривизни поліноміальних моделей. Розроблені аналітичні методи і програмне забезпечення для визначення параметрів електропорації дозволяють рекомендувати їх для використання на практиці при обчисленні числових значень напруженості поля і провідності, при яких забезпечуються конкретні режими електропорації мембрани біологічної клітини.

Ключові слова: імпульсне електричне поле, напруженість, електропорація, мембрана, біологічна клітина, моделювання, алгоритм, апроксимація, поліном.

Shigimaga V. A.¹, Megel Yu. Ye.², Kovalenko S. V.³, Kovalenko S. M.⁴

¹Dr. Sc., Senior Researcher, Associate Professor of the B. Shabelnyk Department of Technical Systems and Livestock Technologies of Kharkiv P. Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

²Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Cybernetics of Kharkiv P. Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

³Ph.D., Associate Professor of the Department of System Analysis and Information-Analytical Technologies of National Technical University "KPI", Kharkiv, Ukraine

⁴Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Cybernetics of Kharkiv P. Vasylenko National Technical University of Agriculture, Kharkiv, Ukraine

MODELLING AND ANALYSIS OF ELECTROPORATION PARAMETERS OF THE MEMBRANE OF A BIOLOGICAL CELL IN A VARIED INTENSITY PULSED ELECTRIC FIELD

Context. The problem of constructing electroporation models for membranes of biological cells by the methods of nonlinear approximation using the experimental dependences of their specific electric conductivity on intensity pulsed electric field was solved in the paper.

Objective is a construction of models, which adequately describe the experimentally obtained nonlinear effects of the conductivity of the cell, including reversible electroporation, irreversible electrical breakdown or local reversible electrical breakdown of membranes at the fusion of two contacting cells.

Method. Polynomials of 8–10 degrees are chosen as the functions that modelling the experimental ones and the criteria for estimating the parameters of electroporation are the coordinates of the local extrema of their curvature and inflexion points that characterize the specified state of the cell membrane at current field intensity. The approximation problem was solved by the least squares method. The calculation of the estimate of the polynomials coefficients was carried out by the Gaussian elimination – the forward and reverse moves were realized. It is possible to search for extrema of the obtained polynomials of high degrees by specifying a calculation error. The root-mean-square error of the approximation is used for finding the degree of the polynomial. The current curvature of the polynomial is counted by calculating the first and second order derivatives of conductivity. The values of the curvature, which obtained via these methods, make possible to determine the inflexion points of the curve for purpose to determine breakdown of a cell membrane.

Results. Applied software was developed, polynomial models of the conductivity of a biological cell in a varied intensity pulsed electric field were constructed and their quantitative mathematical analysis was carried out by using this software. All these calculations are proved by graphs, some of which can be viewed on an enlarged scale.

Conclusions. The parameters of electroporation of a biological cell membrane obtained by analysing the curvature function of polynomial models are calculated. The developed analytical methods and software for determining the parameters of electroporation allow us to recommend them for use in practice in calculating the numerical values of the field intensity and conductivity at which specific electroporation regimes of the biological cell membrane are provided.

Keywords: pulse electric field, intensity, electroporation, membrane, biological cell, modelling, algorithm, approximation, polynomial.

REFERENCES

1. Miklavcic Ed. D. Handbook of Electroporation. Springer International Publishing Switzerland, 2017, 2316 p.
2. Pakhomov A. G., Miklavčič D., Markov M. S. Advanced Electroporation Techniques in Biology and Medicine. CRC Press, New York, 2010, 528 p.
3. Weaver J. C., Chizmadzhev Yu. Electroporation, *Biological and Medical Aspects of Electromagnetic Fields*. CRC Press, New York, 2007, pp. 293–321.
4. Hoiles W., Krishnamurthy V., Cranfield C. G., Cornell B. An Engineered Membrane to Measure Electroporation: Effect of Tethers and Bioelectronic Interface, *Biophysical Journal*, 2014, No. 107(6), pp. 1339–1351.
5. Shigimaga V. A. Pulsed conductometer for biological cells and liquid media, *Measurement Techniques*, Springer New York, LCC, New York, 2013, Vol. 55, No. 11, pp. 1294–1300.
6. Polak A, Tarek M, Tomsic M, Valant J, Ulrih N. P., Jamnik A, Kramar P, Miklavcic D. Electroporation of archaeal lipid membranes using MD simulations, *Bioelectrochem*, 2014, No. 100, pp. 18–26.
7. Miklavcic D. Network for Development of Electroporation-Based Technologies and Treatments, *Journal of Membrane Biology*, 2012, Vol. 245, pp. 591–598.
8. Morshed B. I., Shams M., Mussivand T. Deriving an electric circuit equivalent model of cell membrane pores in electroporation, *Biophysical Reviews and Letters*, 2013, Vol. 8, No. 1, pp. 21–32.
9. Mossop B. J, Barr R. C, Zaharoff D. A, Yuan F. Electric fields within cells as a function of membrane resistivity – a model study, *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2004, Vol. 3, No. 3, pp. 225–231.
10. Shygyrma V. O. Biotekhnichniy kompleks impulsnoi konduktometrii i elektromanipuliacii z klitynami tvaryn : avtoref. dys. na zdobuttia d-ra tekhn. nauk : spets. 05.11.17 “Biologichni ta medychni prylady i systemy”. Kharkiv, 2014, 36 p.
11. Kramar P., Miklavčič D., Lebar A. M. Determination of the lipid bilayer breakdown voltage by means of linear rising signal, *Bioelectrochemistry*, 2007, V. 70, No. 1, pp. 23–27.
12. Pavlin M., Kotnik T., Miklavčič D., Kramar P., Lebar A. Electroporation of Planar Lipid Bilayers and Membranes, *Advances in Planar Lipid Bilayers and Liposomes*, 2008, No. 6, pp. 165–226.
13. Pucihar G., Krmelj J., Rebežsek M., Napotnik T. B., Miklavčič D. Equivalent Pulse Parameters for Electroporation, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2011, V. 58, No. 11, pp. 3279–3288.
14. Dubey A. K., Kumar R., Banerjee M., Basu B. Analytical Computation of Electric Field for Onset of Electroporation, *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 137–143.
15. Megel Y. E., Rudenko A. P., Kovalenko S. M., Danilko I. V., Mikhnova O. D. Operations Research. Miskdruk, Kharkiv, 2015, 388 p.
16. Smol'yaninova E. I., Shigimaga V. A., Strixa O. A., Popivnenko L. I., Gordienko E. A. E'lektricheskaya provodimost' kak diagnosticheskij parametr ocenki kachestva oocitov i e'mbrionov mlekoopitayushhix v biotexnologicheskix operaciyax, *Biofizika zhivov kletki*, 2014, Vol. 10, pp. 193–195.
17. Tarulli M., Venkov G. Megel Y., Kovalenko S., Rudenko A. Operations Research, Calculus of Variations and Optimal Control. Part II. Sofia, Technical University, 2016, 188 p.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.021

Бойко Н. І.

Канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних систем та мереж, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ПЕРСПЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕЛИКИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

Актуальність. Розглянуто питання коректної інтерпретації інформаційних потоків у розподілених інформаційних системах. Об'єктом дослідження є методи дослідження просування «великих даних» по кластерах системи.

Мета роботи є дослідження перспективних напрямків та технологій для аналізу структур даних у розподілених інформаційних системах.

Метод. Розглянуто технології обробки великих даних. Проведено аналіз кожної з них. Наведено приклад застосування парадигми MapReduce, завантаження великих обсягів даних на сервер, опрацювання та аналіз неструктурованої інформації та розподілення її у кластеризовану базу даних. В статті узагальнено поняття “великі дані”. Наводяться приклади методів по роботі з масивами неструктурованих даних. Виділені наукові спрямування для аналізу великих даних. Сформульовані принципи роботи неструктурованих даних у розподілених інформаційних системах. Приводиться робота платформ Hadoop MapReduce та Apache Spark. Аналізуються їхні властивості та приводяться відмінності. Наводиться порівняльний аналіз продуктивності обох платформ у відношенні – час виконання до кількості ітерацій. Розглядаються способи створення RDD: розпаралелення переданої колекції в програмі та посилання на зовнішню файлову систему в Hadoop. Також наводиться приклад розпаралеленої системи RDD. Пропонується робота класу одинак для основних операцій з базою даних: підключення до бази даних, створення таблиці, знищення таблиці, отримання рядка по id, повернення усіх елементів бази даних, оновлення, видалення та створення рядка.

Результати. Проведений аналіз моделей Spark та Hadoop MapReduce для поєднаної побудови розподіленої інформаційної системи. Побудований SparkConf об'єкт, який містить інформацію про аплікацію і є кінцевим варіантом експерименту.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованих методів, які здатні обробляти горизонтальні масиви даних, що розпаралелені через неякісний спосіб представлення інформації. Такі перспективні напрямки роботи аналізують структуру даних з метою прогнозу результатів та створюють алгоритми передових кореляцій, що сприяють новому розумінню діяльності розподілених інформаційних систем. Подальші дослідження можуть полягати в широкому застосуванні інформаційних систем, які би забезпечували повний комплекс технологічного процесу адаптації інформаційних потоків у кластери.

Ключові слова: система, технологія, великі дані, інформація, методика, база даних, веб-аплікація, моделювання, обробка, аналіз.

НОМЕНКЛАТУРА

IT – інформаційні технології;
SN-архітектура – Shared Nothing Architecture;
NoSQL – Not only Structured query language;
БД – база даних;
СКБД – Система керування базами даних;
GPS – Global Positioning System;
API – Application Program Interface;
RDD – Resilient Distributed Datasets;
UI – User Interface.

ВСТУП

Останніми роками перспективною областю наукових досліджень є область IT. Донедавна великі системи скла-

далися із десятків серверів та терабайтів інформації. Сьогодні вони використовують хмаркову кластерну модель, яка складається із тисячі мульти-ядерних процесорів та петабайтів інформації.

Такий розвиток подій сприяв створенню нового наукового напрямку – «великі дані», які вже знайшли своє відображення в академічних вузівських програмах. З позиції наукових досліджень до «великих даних» відносять інформацію: структуровану чи неструктуровану дані, медіа та випадкові процеси, які на практиці важко обробити традиційними методами. На зміну традиційним монолітним системам приходять нові асинхронні та паралельні рішення, які спрощують роботу з «великими даними». Дані системи складаються з декількох незалеж-

них блоків, які ефективно обробляють інформацію в умовах її неперервного накопичення та відповідного її розподілення по численних вузлах кластера. В таких системах, обсяги інформації зростають за експоненціальним законом і значну їх частину складають неструктуровані дані. Тому питання коректної інтерпретації інформаційних потоків у системах такого типу являються на сьогодні актуальними та водночас складними.

Отже, процес дослідження просування «великих даних» по кластерних системах являється об'єктом даного дослідження.

Предметом дослідження є методи та засоби побудови, редагування та адаптації інформаційних потоків у розподілених інформаційних системах.

Метою роботи є дослідження перспективних напрямків та технологій для аналізу структур даних у розподілених інформаційних системах.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ:

- 1) розглянути методи та принципи роботи з «великими даними»;
- 2) проаналізувати існуючі технології обробки «великих даних»;
- 3) здійснити порівняльний аналіз продуктивності методів Hadoop та Spark платформ для обробки неструктурованих обсягів даних на мові Scala.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Сьогодення диктує нові вимоги до інформаційних систем, які важко досягнути вчорашніми технологіями. Сучасні системи повинні реагувати на проблеми вчасно наскільки це можливо. Дослідження відомих іноземних вчених [1–5] показали важливість даної проблеми, яка повинна бути вирішуватись швидко та ефективно. У роботах [4, 6] акцентується увага на стійкості системи до збоїв та можливості її залишатися реагувати навіть після збою.

Дослідниками [8, 10, 14] являється актуальним питання масштабування кластера, адже кластерні системи вважаються доволі складним. Тому в будь-яких системах є перспективним питання її продуктивності, тому автори [13, 15] виокремлюються два варіанти масштабування: горизонтальне та вертикальне. Вони дослідили, що при застосуванні горизонтальної кластеризації одні компоненти повинні бути ізольованими від інших, і при цьому система повинна реагувати при різних навантаженнях на кластери. Науковці досліджували її здатність збільшувати або зменшувати обсяг ресурсів, який виділяється для її обслуговування. Дослідники вважали, що система повинна покладатися на асинхронну передачу повідомлень, для встановлення розмежування між компонентами. Тим самим вона гарантує слабозв'язаність, ізоляцію та прозорість розташування вузлів кластера, забезпечує засоби для делегування помилок та повідомлень. Іншими авторами [10–12] виявлено, що система повинна управляти навантаженнями, еластичністю, управляти потоками, формувати та моніторити черги повідомлень в системі і застосовувати зворотний тиск при необхідності. Вона повинна мати номери для блокування зв'язку, що дозволить одержувачам споживати тільки активні ресурси, що призведе до менших витрат системи.

Науковцями [10–12] встановлено, що при використанні даного типу систем виникає деяка проблема взаємодії всіх вузлів кластерної системи. До прикладу різним додаткам потрібен доступ до даних з різних вузлів. Це ускладнює роботу кластерної системи, але існує можливість вертикального масштабування даних, що забезпечує доступ до даних всіх вузлів системи. Дослідниками [8] виокремлено, що запропонований вище процес вертикального масштабування інформації дозволяє відділяти кластер від систем, які з'єднують між собою безліч машин.

На основі проведеного аналізу встановлено, що для створення розподіленої інформаційної системи не існує єдиних методів та технологій, які б поєднували всі етапи побудови кластерних систем. Тому робота з детальним описом технологій вертикального масштабування інформації для вирішення такого роду проблем є актуальною.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Існує багато визначень стосовно того, що таке «великі дані». Серед них такі: «великі дані» – це петабайти інформації, які неможливо обробити в MS Excel; також, це дані, які неможливо обробити на одному комп'ютері; «великі дані» – це будь-яка структурована чи неструктурована інформація великих обсягів [1–3].

Узагальнюючи подані визначення, можна виокремити, що «великі дані» – це не самі дані, а методи їх опрацювання, які дозволяють розподілено обробити інформацію. Ці методи можна застосувати до масивів будь-якої розмірності. У роботі наводяться декілька прикладів джерел утворення великих даних та методи, які призначені для роботи з ними: дані про поведінку користувачів в Інтернеті; GPS – сигнали; дані, зібрані з лічильників; дані, зняті із камер спостереження; оцифровані книги із бібліотек; інформація про транзакції усіх клієнтів банку тощо.

З перелічених прикладів можна виділити те, що кількість інформаційних джерел стрімко зростає, відповідно технології їх обробки та методи аналізу великих даних набирають великої популярності.

Тому, серед основних наукових спрямувань для аналізу великих даних слід виділити:

- Data Mining: кластерний аналіз.
 - Краудсорсинг: передача певних виробничих функцій невизначеному колу осіб.
 - Машинне навчання: використання моделей на базі машинного навчання для отримання комплексних прогнозів на основі базових моделей.
 - Імітаційне моделювання: метод, що дозволяє будувати моделі процесів, які описують дійсні інформаційні процеси.
 - Візуалізація даних: інтерактивне вивчення візуального представлення абстрактних даних для посилення людського пізнання.
 - Штучні нейронні мережі: моделі, побудовані за принципом функціонування біологічних нейронних мереж.
- Проаналізувавши діяльність дослідників [1–10] в галузі великих даних, можна сформулювати певні принципи роботи із ними. Серед таких можна виділити:
- Горизонтальне масштабування, коли зростання обсягу даних призводить до розширення системи та збільшення кількості технічних засобів у кластері.

– Відмовостійкість. При горизонтальному масштабуванні машин в кластері може бути багато. Для прикладу, Hadoop-кластер компанії Yahoo має більше ніж 42000 машин у кластері. Така кількість машин не може безперебійно працювати. Даний принцип оперується методами обробки великих даних, які враховують можливість збоїв та попереджують їх.

– Локальність даних. У розподілених системах дані фізично знаходяться на одному сервері, а обробляються на іншому, тим самим збільшуючи витрати ресурсів системи на передачу даних – до витрат на їх обробку.

Технологічний аспект обробки великих даних повинен слідувати згаданим вище принципам.

Найчастіше в якості базового принципу обробки великих даних вказують SN-архітектуру, яка забезпечує паралельну обробку, масштабовану без деградації на сотні й тисячі вузлів кластера. До основних її технологій обробки «великих даних» відносять:

- NoSQL;
- MapReduce;
- Apache Hadoop;
- Apache Spark.

Збільшення обсягів інформації призводить до певних проблем, з якими класичні реляційні архітектури не справляються. Тому виникла потреба спроектувати архітектуру NoSQL, яка здатна адаптуватися до зростання даних та ефективної їх обробки.

До особливостей NoSQL підходу слід віднести:

- високу пропускну здатність;
- необмежене горизонтальне масштабування;
- консистентність у жертву продуктивності.

До класифікаційних ознак NoSQL БД слід віднести:

1. Сховища типу ключ-значення. Модель даних – асоціативний масив або словник, який дозволяє працювати з даними по ключу. Основне завдання таких сховищ – максимальна продуктивність системи, яка не зберігає інформацію про структуру значення. До прикладів таких баз даних можна віднести: Redis, Scalaris, Riak, Tokyo Tyrant.

2. Документні сховища. Модель даних об'єднує множину пар ключ-значення в абстракцію, яку називають

«документ». Документи мають вкладену структуру, що об'єднуються в колекції. Робота з документами проводиться по ключу, також існують рішення, які дозволяють виконувати запити по значенням атрибутів. До прикладів даних БД відносять: SimpleDb, CouchDb, MongoDB.

3. Столпцеві сховища. Модель даних – збереження значень, які не інтерпретовані в байтових масивах та адресуються кортежами. Основою такої моделі даних є стовпчик чи необмежене число стовпців для певної таблиці. Столпці по ключам об'єднуються у сімейства та набувають властивості певних наборів. До таких БД слід віднести: BigTable, HBase, Cassandra.

4. Графові сховища. Модель даних складається із вершин, ребер і їх властивостей. Робота з даними виконується шляхом обходу графа по ребрах із заданими властивостями. Подібні сховища застосовуються для роботи з даними типу графів (наприклад, соціальна мережа). Прикладом може бути БД Neo4j.

Також існують класичні методи для розробки засобів оброблення неструктурованих даних. Однією із таких – парадигма **MapReduce**.

Дана модель розподіленої оброблення даних, запропонована компанією Google для обробки надвеликих обсягів даних на комп'ютерних кластерах (рис. 1). Кластер – це декілька незалежних обчислювальних машин, які використовуються спільно та працюють як одна система [5].

Метод MapReduce передбачає організацію даних у вигляді списків, обробка яких відбувається у 3 етапи (рис. 2):

1. Стадія Map, на якій дані обробляються за допомогою функції map(), яку визначає користувач. Робота на цій стадії полягає у переробці та фільтрації даних. Робота операції схожа на метод map() у функціональних мовах програмування – функція застосовується до кожного елементу списку. Функція map приймає список на вході і повертає множину пар ключ-значення (key-value).

2. Стадія Shuffle, на якій функція map «розбирається по корзинам» – кожна корзина відповідає одному ключу стадії map. В подальшому ці корзини на вході послужать функції reduce().

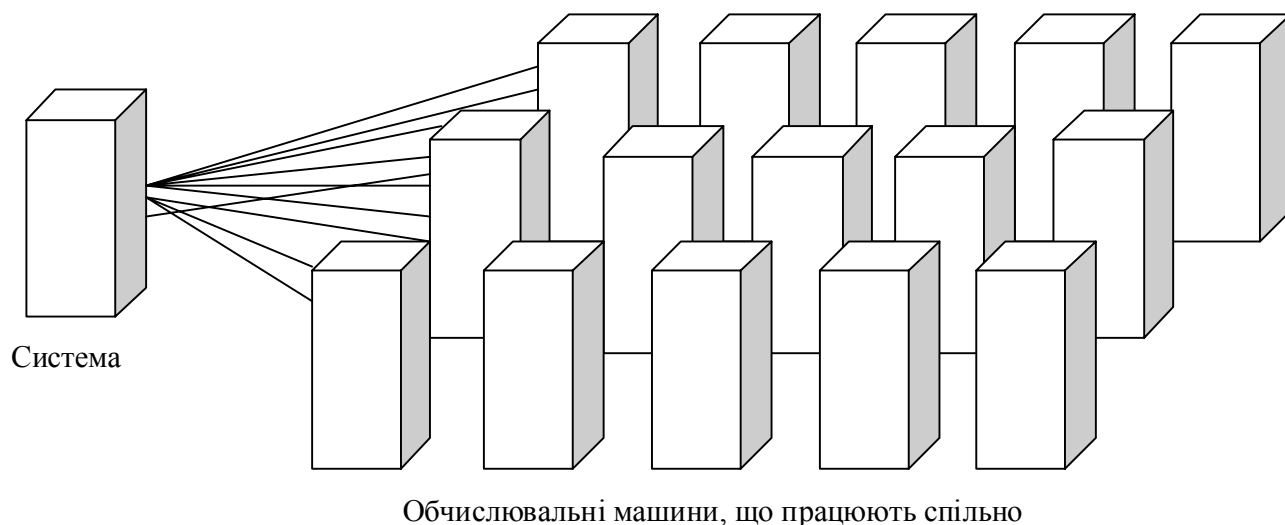


Рисунок 1 – Кластерна модель

3. Стадія Reduce. Функція reduce визначає фінальний результат для окремої «корзини». Множина усіх значень, які повертає функція reduce() є фінальним результатом MapReduce – задачі.

Усі запуски функцій map(), reduce() і shuffle(), що наведені на рис. 2, працюють незалежно та можуть обробляти інформацію паралельно на різних машинах кластера. Така робота методу MapReduce дозволяє виконувати принцип горизонтального масштабування.

На сьогодні, лідером у застосуванні парадигми MapReduce та створенні програмної платформи для організації розподіленої обробки великих обсягів даних є технології Apache Hadoop MapReduce та Apache Spark.

Apache Hadoop MapReduce – це вільна платформа, для організації обробки великих обсягів даних (вимірюється у петабайтах) з використанням парадигми MapReduce (рис. 3). Даний метод дозволяє здійснювати поділ відособлених фрагментів, кожен з яких може бути запущений на окремому вузлі кластера. До складу Hadoop входить реалізація розподіленої файлової системи Hadoop HDFS, яка автоматично забезпечує резервування даних та є оптимізованою для роботи з MapReduce. Для спрощення доступу до даних в сховищі Hadoop розроблена SQL-подібна мова Hive, яка є свого роду SQL для MapReduce, і запити якої можуть бути розпаралелені й оброблені кількома Hadoop-платформами.

Apache Spark – це високопродуктивний технічний засіб для обробки даних, які зберігаються в кластері Hadoop (рис. 4). Порівняно з попереднім Hadoop MapReduce, Spark забезпечує в 100 разів більшу продуктивність при обробці даних у пам'яті та у 10 разів

більшу – при розміщенні даних на дисках. Даний механізм виконується на вузлах кластера Hadoop за допомогою Hadoop YARN, та у відокремленому режимі. У ньому підтримується обробка даних у сховищах HDFS, Cassandra, Hive та у будь-якому форматі введення Hadoop. У жовтні 2014 року Apache Spark встановив світовий рекорд при сортуванні 100 терабайт даних.

Основна відмінність моделі Spark від Hadoop MapReduce (рис. 3–4) у тому, що Spark зберігає інформацію на пам'яті комп'ютера, тим самим забезпечує вищу продуктивність платформи. В той час як Hadoop зберігає її на диску, забезпечуючи вищий рівень безпеки.

Окрім традиційних можливостей моделі Apache Hadoop MapReduce, тобто обробки неструктурованих обсягів даних, Apache Spark платформа включає в себе Spark Streaming для роботи з асинхронними стрімами, Mlib – бібліотеку для машинного аналізу та GraphX (рис. 5).

Модуль MLib (рис. 5) включає в себе алгоритми машинного навчання (класифікація, регресія, кластеризація, колаборативна фільтрація і т.д.). Перевагою використання технології Spark, модуля MLib для машинного навчання є те, що в Spark дані можна кешувати в оперативній пам'яті. Це дозволяє істотно прискорити обчислення для ітеративних алгоритмів, якими є більшість алгоритмів машинного навчання.

GraphX – інструмент для аналізу та обробки графів (рис. 5). Концепція графа реалізована у вигляді так званого Property Graph – це мультиграф з мітками на вершинах і ребрах. Мультиграф – це орієнтований граф, в якому дозволені кратні ребра та петлі. Тут визначені такі поняття, як вхідна степінь (число вхідних ребер) та вихідна степінь (число вихідних ребер).

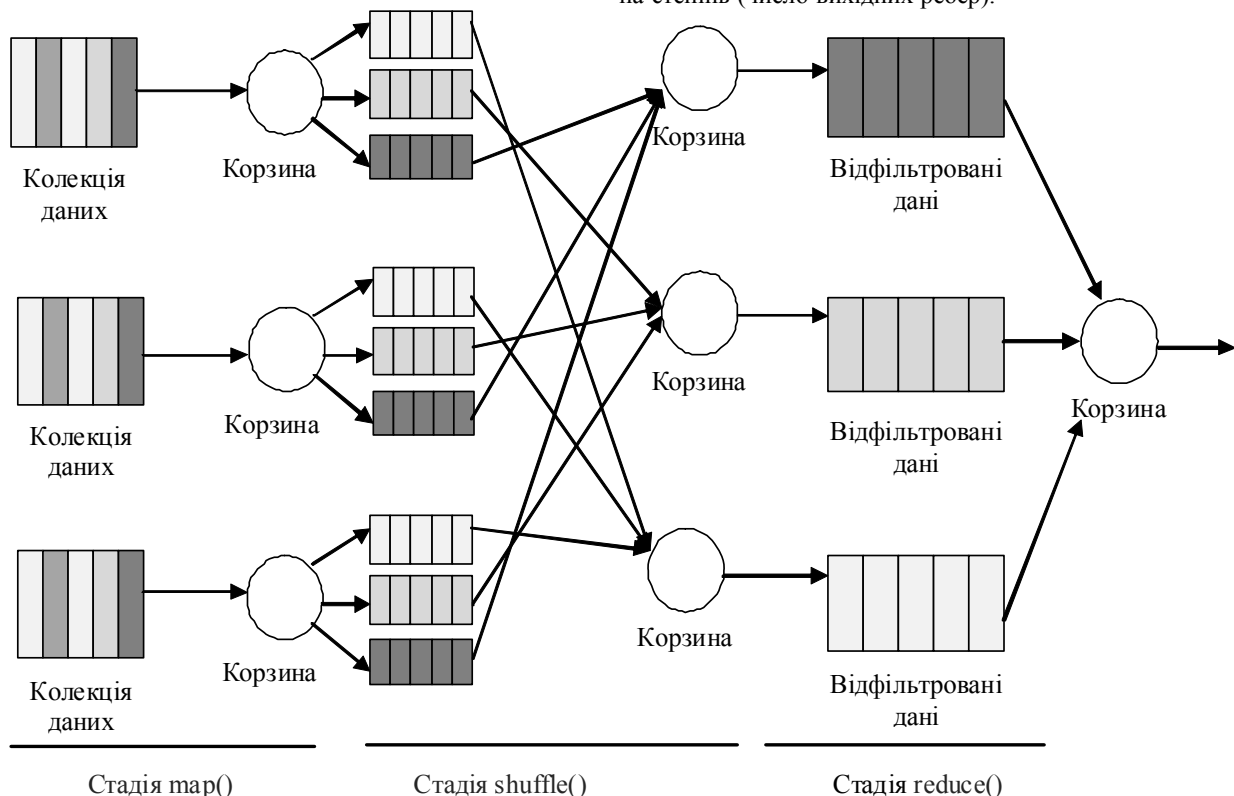


Рисунок 2 – Ілюстрація роботи MapReduce

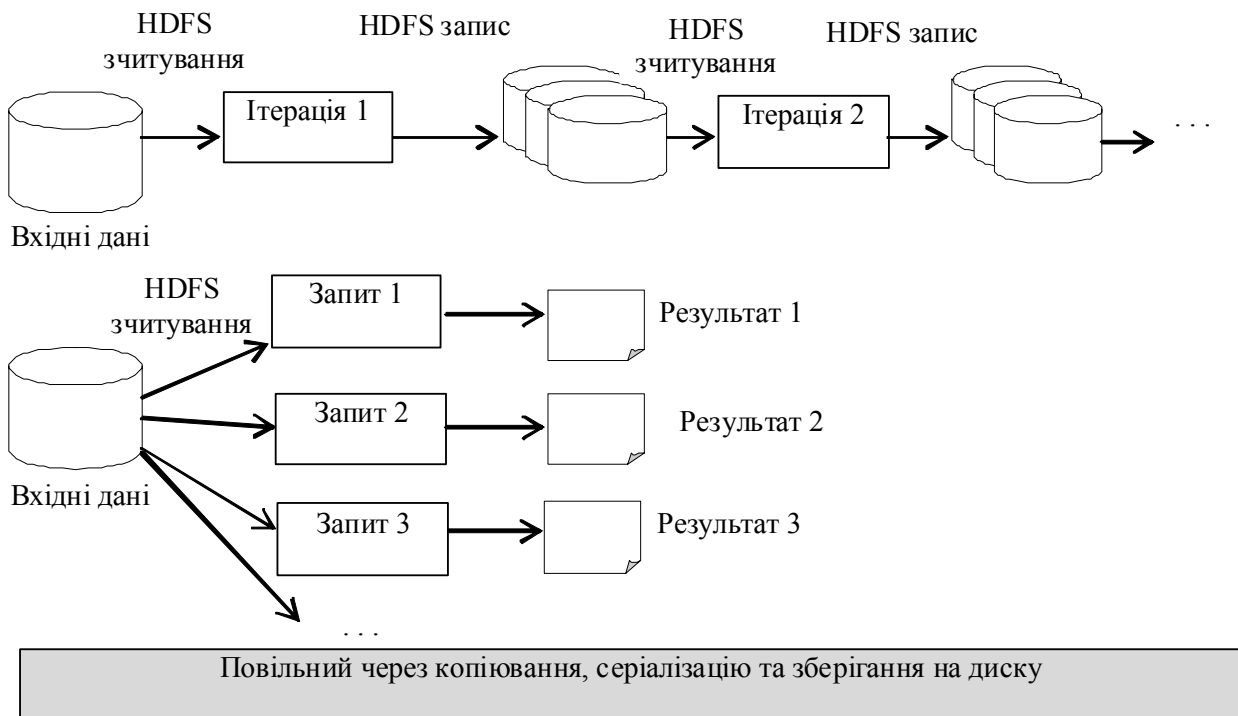


Рисунок 3 – Схема обробки даних у MapReduce

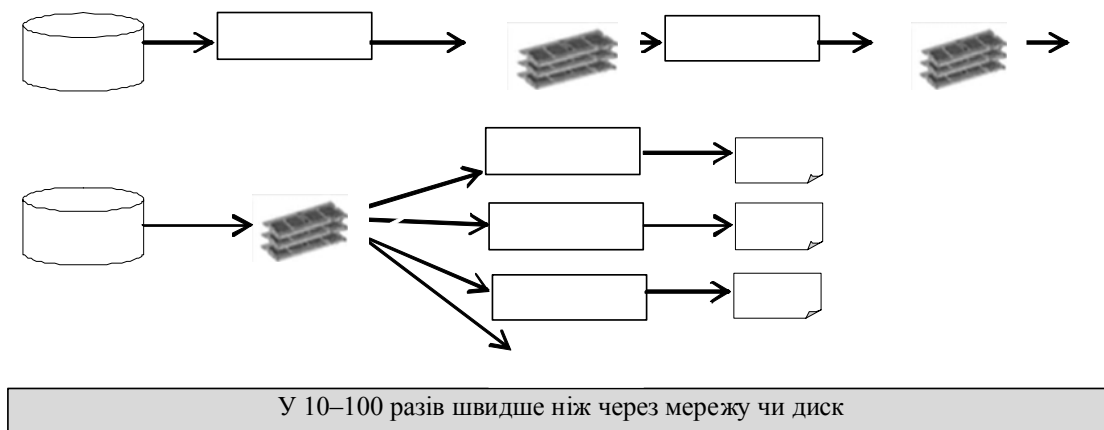


Рисунок 4 – Схема обробки даних у Spark

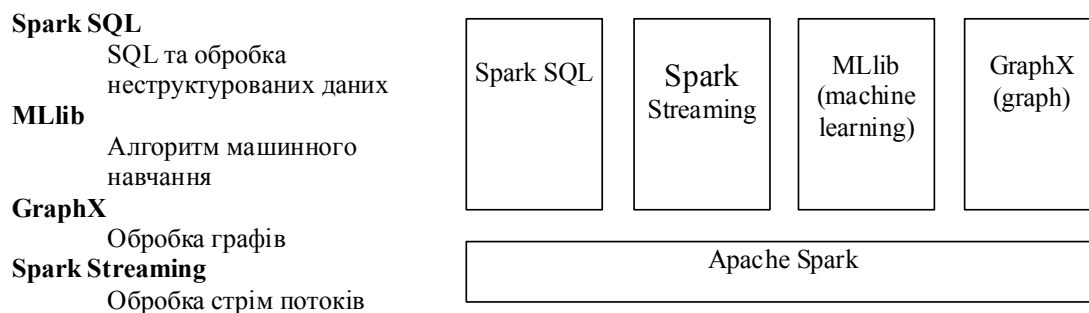


Рисунок 5 – Модулі Spark

Spark Streaming – це один із найцікавіших компонентів Spark. Із Spark Streaming можна створювати канали даних, які обробляються у реальному часі (рис. 5). Крім того, він забезпечує стійкість до збоїв, яка необхідна при роботі з real-time даними.

Нижче наводиться порівняльний аналіз продуктивності обох платформ у відношенні – час виконання до кількості ітерацій (рис. 6).

Spark надає API на Scala, Java, Python, R мовах програмування.

4 ЕКСПЕРЕМЕНТИ

Проведені дослідження методів Spark та Hadoop MapReduce дозволяють зробити наступні висновки, що Spark є продуктивнішою технологією (рис. 6). Адже про-

грама спочатку створює SparkContext об'єкт, який вказує Spark метод доступу до кластера. На основі запропонованих вище методів, для створення SparkContext слід здійснити експеримент – побудувати SparkConf об'єкт, який містить інформацію про аплікацію.

Для детального аналізу слід привести приклад створення SparkContext на Scala (рис. 7):

```
import org.apache.spark.SparkContext
import org.apache.spark.SparkConf
val conf = new SparkConf().
    setAppName(appName).setMaster(master)
new SparkContext(conf)
```

Основою Spark є концепція пружного розподіленого набору – RDD. Це відмовостійка колекція елементів, яка

ЧАС ВИКОНАННЯ

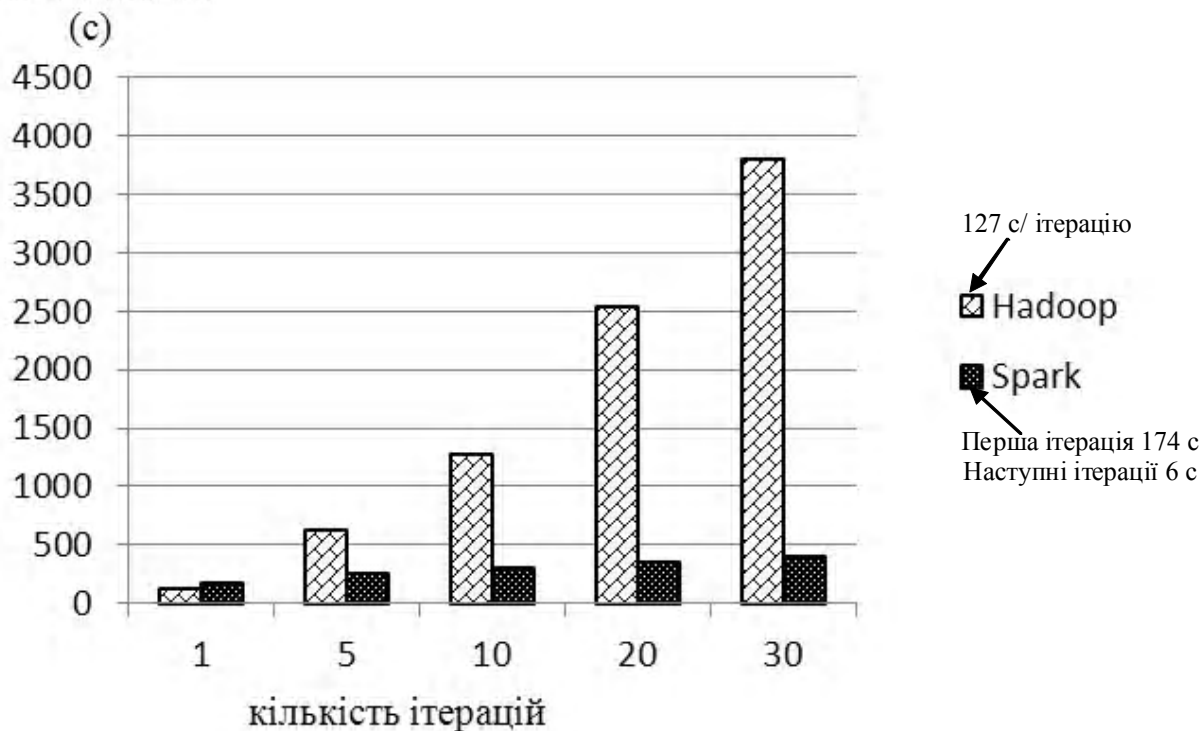


Рисунок 6 – Порівняльний аналіз продуктивності Hadoop та Spark платформ

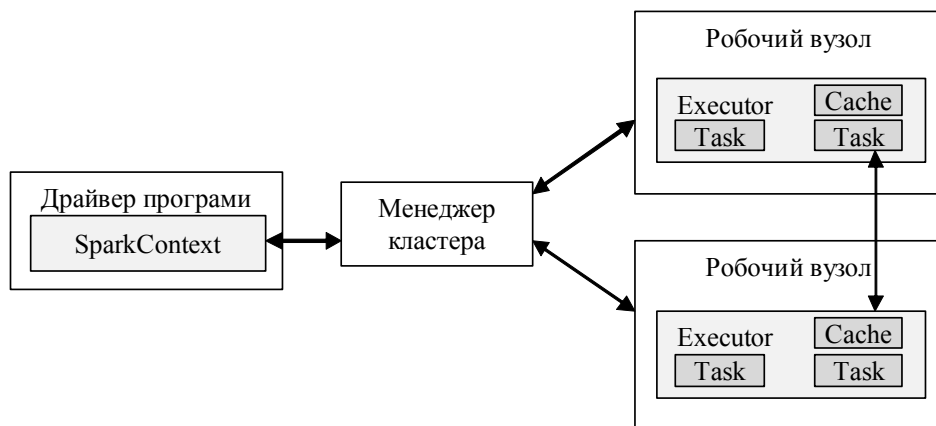


Рисунок 7 – Приклад створення Spark Context

опрацюється паралельно. Є два способи створення RDD: розпаралелення переданої колекції в програмі та посилання на зовнішню файлову систему, таку як HDFS або будь-яке інше джерело даних в Hadoop.

Для прикладу, в даному розділі аналізується розпаралелена система RDD. Вона повинна приймати csv або excel документ із надвеликою кількістю інформаційних рядків про транзакції. Для цього слід завантажити документ на сервер, передати у Spark RDD, опрацювати та проаналізувати інформацію та розподілити у кластеризовану базу даних.

Для проведення експерименту потрібно розділити структуру сервісу на дві частини: перша – це веб-сторінка, на якій буде UI з формою для відправлення документу на сервер та інтерфейсом із аналізом даних після отримання оброблених даних із сервера; друга – це API нашої системи, яка буде представляти бібліотеку методів для прийому, обробки, аналізу і відправки даних клієнту (нашу веб-сторінку).

Тут слід зосередити увагу на API системи при застосуванні Apache Spark. Приклад такої системи наведений на мові Scala. Для початку, слід задати налаштування конфігурації кластера та створити SparkContext.

```
import org.apache.spark.{SparkContext, SparkConf}
object SparkUtil {
  lazy val sparkConf = new SparkConf().setMaster("local[*]").setAppName("spark-app")
  lazy val sc = new SparkContext(sparkConf)
```

В коді master URL – це налаштування конфігурації кластера; setMaster("local[*]") – означає запуск Spark локально з визначеним числом інформаційних потоків відповідно до кількості ядер на певній машині; setMaster(spark://HOST:PORT) – конфігурація для з'єднання із зовнішнім кластером.

Також в коді master URL слід застосувати метод, для отримання файлу від клієнта, здійснити перевірку: чи тип файлу відповідає очікуванням (csv або xls). Якщо так, тоді файл буде завантажено на сервер та передано його назву в метод parseAttachment(inputFile: String). Інакше – метод поверне попередження (warning).

```
//метод отримання файлу від клієнта
def file = Action(parse.multipartFormData) { request =>
  request.body.file("file").map { file =>
    val filename: String = file.filename
    val contentType : Option[String] = file.contentType
    contentType match {
      case Some("text/csv") =>
        SparkUtil.parseAttachment(filename)
      case Some("application/vnd.openxmlformats-officedocument.spreadsheetml.sheet") =>
        => SparkUtil.parseAttachment(filename)
      case _ => SparkUtil.warning = true;
    }
  }
}
```

На наступному кроці експерименту, кожен елемент файлу передається в конструктор CSVReader, його слід

розпарсити та повернути сирий контент у Spark RDD. Цей процес описує метод розпаралелення надісланого файлу та дозволяє розпаралелити опрацювання даних. Далі повертається колекція (list), яка передається в конструктор toTransactions(data), таким чином повертається колекція з транзакцій. Після цього процесу, кожен елемент колекції передається у DAO.create(), тобто зберігається у базі даних.

//метод розпаралелення отриманого файлу

```
def parseAttachment(inputFile: String): Unit = {
  val input = sc.wholeTextFiles(inputFile) // наш RDD
  val result = input.flatMap {
    case (_, txt) =>
      val reader = new CSVReader (new StringReader (txt) )
      reader.readAll ()
  } //розпарсити csv файл

  //розпаралелити розпарсений RDD і повернути колекцію(list)
  val data = result.collect().map(_._mkString(",")).toList.tail
  val importedData = toTransactions(data)
  val importedCount = importedData.size
  //зберегти в базу даних кожен елемент колекції
  importedData.foreach(U => DAO.create(U) )
}
```

Наступним етапом проведення експерименту є застосування класу одинака в коді master URL для здійснення основних операцій з базою даних: підключення до бази даних, створення таблиці, знищення таблиці, отримання рядка по id, повернення усіх елементів бази даних, оновлення, видалення та створення рядка.

// клас одинак (scala object) для основних операцій з базою даних

```
object DAO extends DbSupport {
  class TransactionTable(tag: Tag) extends Table[Transaction](tag, "TRANSACTIONS") {
    def id: Rep[Long] = column[Long]("id", O.AutoInc, O.PrimaryKey, O.SqlType("BIGINT"))
    def account: Rep[String] = column[String]("account", O.SqlType("TEXT"))
    def description: Rep[String] = column[String]("description", O.SqlType("TEXT"))
    def currency_code: Rep[String] = column[String]("currency_code", O.SqlType("VARCHAR(255)"))
    def amount: Rep[BigDecimal] = column[BigDecimal]("amount", O.SqlType("DECIMAL"))
    def * = (id, account, description, currency_code, amount) <> (Transaction.tupled, Transaction.unapply)
  }
  val transactions = TableQuery[TransactionTable]
  def queryById = Compiled(
    (id: Rep[Long]) =>
    transactions.filter(_._id === id))
```

```
def createTable =
    transactions.schema.create
def dropTable =
    transactions.schema.drop
def setup = DBIO.seq(
    createTable)
val runDb = db.run(setup)
def all = {
    db.run(transactions.result)
}
def update(id:Long, transaction : Transaction)
= {

db.run(queryById(id).update(transaction))
}
def delete(id:Long) = {
    db.run(queryById(id).delete)
}
def create(transaction:Transaction):
Future[Int] = {
    db.run(
        transactions += transaction)}}

```

Наступним етапом експерименту являється створення класу транзакцій, який має 4 поля: id, акаунт(account), опис(desc), код(code) і кількість(amount).

//клас транзакцій

```
case class Transaction(id: Long, account: String, desc:
String, code: String, amount: BigDecimal)
```

Для подальшої роботи, потрібно створити трейт для налаштування бази даних, підключення, створення сесії та її запуску.

//скала трейт для запуску бази даних

```
trait DbSupport {
    val db = Database.forConfig("db")
    implicit val session: Session =
db.createSession()
    def startDb() = {
        DAO.runDb }
}

```

Після налаштування БД, наступним етапом є створення актора для асинхронної передачі повідомлень, для того, щоб встановити межу між компонентами. Вона гарантує слабозв'язаність, ізоляцію, прозорість розташування та забезпечує засоби для делегування помилок чи повідомлень.

```
import akka.actor.Actor
import models.{Transaction, DAO}
object DbActor {
    case object FetchAll
    case class Update(id: Long, transaction :
Transaction)
    case class Delete(id : Long)
    case class Create(transaction:Transaction)
    case object CreateTable
    case object DropTable
}
class DbActor extends Actor {
    import DbActor._
    def receive: Receive = {
        case FetchAll =>
            sender ! DAO.all
        case Update(id: Long, transaction : Transaction) =>
            sender ! DAO.update(id, transaction)
        case Create(transaction : Transaction) =>

```

```
sender ! DAO.create(transaction)
        case Delete(id : Long) =>
            sender ! DAO.delete(id)
        case CreateTable =>
            sender ! DAO.createTable
        case DropTable =>
            sender ! DAO.dropTable}}

```

Останнім етапом в коді master URL є об'єднання усіх елементів для створення основного класу запуску аплікації. У роботі використана скала бібліотека – spray, для запуску сервера і розгортання аплікації. Слід створити конфігурацію, об'єднати її з базою даних, створити сервіс, систему акторів та запустити http сервер.

//основний клас запуску аплікації

```
object Boot extends App with DbSupport{
    implicit val system =
ActorSystem(Config.actorSystemName)
    implicit val timeout = Timeout(5.seconds)
    startDb()
    Config.log.info("Database is up and
running")

    val application =
system.actorOf(Props[ApplicationActor],
"website-service")
    val port = Properties.envOrElse("PORT",
Config.port.toString).toInt
    IO(Http) ? Http.Bind(
        listener = application,
        interface = Config.interface,
        port = port
    )}

```

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Кінцевим варіантом експерименту є побудова SparkConf об'єкту, який містить інформацію про аплікацію. Він поданий на рис. 8, де наводиться інтерфейс роботи аплікації – зліва та справа – вміст бази даних, після завантаження csv документу з даними на сервер.

Apache Spark – це фреймворк, за допомогою якого можна створити додатки для розподілених інформаційних систем. Для роботи Spark надає програмне API для неперервної роботи з інформаційними процесами. Модуль розкидає код по вузлах кластера, при цьому розбиває їх на задачі, створює план виконання та слідкує за його застосуванням.

Результатом роботи метода Spark є можливість запускати код через різні розподілені інформаційні системи. В режимі Stand-alone mode, метод управляє усіма ресурсами кластера. Yarn дозволяє додаткам запускатись на Hadoop кластері. Mesos та Local mode працюють в локальному режимі та являються альтернативними системами для управління інформаційними процесами кластера.

Метод Spark порівняно з Hadoop MapReduce є гнучкішим. У нього новий архітектурний підхід, який дозволяє серілізувати та зберігати в оперативній пам'яті проміжні дані. Також в процесі його роботи, обмін інформаційними процесами між вузлами проходить напямую, що пришвидшує ініціалізацію та запуск задач метода Spark. Він оперує RDD абстракціями, які більш універсальні, а ніж MapReduce. Також Spark дозволяє розробляти додатки: для задач пакетної обробки даних (batch processing); для роботи з потоками даних(stream processing).

All data transactions in the system

Remove/Edit data transactions (click to show/hide form)

#	Account	Description	Currency Code	Amount
1	398149	FL	USD	373488.3
2	322827	FL	USD	1499781.6
3	791209	FL	USD	173286.9
4	465875	FL	USD	1297057.5
5	404309	FL	USD	0.0
6	780814	FL	USD	0.0
7	241496	FL	USD	0.0
8	167630	FL	USD	0.0
9	876385	FL	USD	0.0
10	827844	FL	USD	0.0
11	592170	FL	USD	0.0
12	938910	FL	USD	0.0
13	546178	FL	USD	0.0
14	175829	FL	USD	0.0
15	645213	FL	USD	0.0
16	708726	FL	USD	0.0
17	575194	FL	USD	0.0
18	603769	FL	USD	0.0
19	584224	FL	USD	0.0
20	859202	FL	USD	9450.0
21	451921	FL	USD	16030.0
22	333445	FL	USD	47250.9
23	507269	FL	USD	1175310.0
24	196064	FL	USD	1392346.8
25	196088	FL	USD	1917403.2
26	847570	FL	USD	0.0
27	360765	FL	USD	0.0
28	594660	FL	USD	0.0
29	367030	FL	USD	0.0
30	792963	FL	USD	0.0
31	949720	FL	USD	0.0
32	166972	FL	USD	0.0
33	746704	FL	USD	0.0
34	657015	FL	USD	0.0
35	103551	FL	USD	858683.4
36	111949	FL	USD	0.0

SQL Query Window:

SELECT * FROM TRANSACTIONS;

id account description currency_code amount

1 398149 FL USD 373488.3

2 322827 FL USD 1499781.6

3 791209 FL USD 173286.9

4 465875 FL USD 1297057.5

5 404309 FL USD 0.0

6 780814 FL USD 0.0

7 241496 FL USD 0.0

8 167630 FL USD 0.0

9 876385 FL USD 0.0

10 827844 FL USD 0.0

11 592170 FL USD 0.0

12 938910 FL USD 0.0

13 546178 FL USD 0.0

14 175829 FL USD 0.0

15 645213 FL USD 0.0

16 708726 FL USD 0.0

17 575194 FL USD 0.0

18 603769 FL USD 0.0

19 584224 FL USD 0.0

20 859202 FL USD 9450.0

21 451921 FL USD 16030.0

22 333445 FL USD 47250.9

23 507269 FL USD 1175310.0

24 196064 FL USD 1392346.8

25 196088 FL USD 1917403.2

26 847570 FL USD 0.0

27 360765 FL USD 0.0

28 594660 FL USD 0.0

29 367030 FL USD 0.0

30 792963 FL USD 0.0

31 949720 FL USD 0.0

32 166972 FL USD 0.0

33 746704 FL USD 0.0

34 657015 FL USD 0.0

35 103551 FL USD 858683.4

36 111949 FL USD 0.0

Рисунок 8 – Результат роботи аплікації

На основі проведеного аналізу поданих моделей Spark та Hadoop MapReduce встановлено, що для створення розподіленої інформаційної системи не існує єдиних методів та технологій, які б поєднували всі етапи побудови кластерних систем. Тому робота з детальним описом технологій вертикального масштабування інформації для вирішення такого роду проблем є актуальною.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Сьогодні в усьому світі ведеться активна робота над розробленням новітніх інформаційних технологій, які допомагають у надшвидкий час обробляти великі обсяги неструктурованих даних [8–11]. Адаптувати проблему є широке використання класичних інформаційних систем, які здатні обробляти горизонтальні масиви даних. Проблема розпаралелення інформаційних потоків спричинена неякісним способом представлення інформації на сайтах, аудіо та відео-матеріалах малою адаптованістю сучасних інформаційних систем.

Дана проблематика немає широкого застосування, адже повільними темпами розробляються інформаційні системи, які би забезпечували повний комплекс технологічного процесу адаптації інформаційних потоків у кластери. Існують поодинокі системи, які виконують лише окремі функції. Це спричинено складністю адаптації та об'єднання різних програмних та апаратних засобів у одну систему. У результаті немає повноцінних розроблених програмно-алгоритмічних засобів, які би забезпечували вирішення сформульованих задач.

ВИСНОВКИ

Завдяки прогресу і багатьом змінам в ІТ, машинний аналіз та обробка великих обсягів даних сприяють відкриттю нових горизонтів у області наукових досліджень. Розвиток явища, що називається «великими даними» створює можливість трансляції подій у реальному часі, призводить до розробки дедуктивного програмного забезпечення. Такі перспективні напрямки роботи аналізують структуру даних з метою прогнозу результатів та створюють алгоритми передових кореляцій, що сприяють новому розумінню діяльності розподілених інформаційних систем.

ПОДЯКИ

Дослідження, що становлять матеріал статті, безпосередньо пов'язані з науково-дослідним напрямом кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка». Результати, викладені у роботі, виконано відповідно до державної науково-дослідної роботи за темою Міністерства освіти і науки України ДБ «ЖЕСТ» у 2011–2012 рр. (номер державної реєстрації 0111U001222).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. What is Big Data [Electronic resource] – Access mode: <http://datascience.berkeley.edu/what-is-big-data/>

Бойко Н. И.

Канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем и сетей, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ БОЛЬШИХ ДАННЫХ В РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Актуальность. Рассмотрены вопросы корректной интерпретации информационных потоков в распределенных информационных системах. Объектом исследования являются методы исследования продвижение «больших данных» по кластерам системы.

Цель работы является исследование перспективных направлений и технологий для анализа структур данных в распределенных информационных системах.

Метод. Рассмотрены технологии обработки больших данных. Проведен анализ каждой из них. Приведен пример применения парадигмы MapReduce, загрузка больших объемов данных на сервер, обработка и анализ неструктурированной информации и распре-

2. Shaw J. Why “Big Data” Is a Big Deal [Electronic resource] / J. Shaw. – Режим доступа: <http://harvardmag.com/pdf/2014/03-pdfs/0314-HarvardMag.pdf>
3. Schutt P. What is Big Data? [Electronic resource] / P. Schutt. – Режим доступа: <https://blogs.oracle.com/bigdata/big-data-and-analytic-top-10-trends-for-2014>
4. Boyko N. Basic concepts of dynamic recurrent neural networks development / N. Boyko, P. Pobereyko // ECONTECHMOD : an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes. – Lublin : Polish Academy of Sciences, 2016. – Vol. 5, № 2. – P. 63–68.
5. Leskovec J. Mining of massive datasets / J. Leskovec, A. Rajaraman, J. D. Ullman. – Massachusetts : Cambridge University Press, 2014. – 470 p.
6. Mayer-Schoenberger V. A revolution that will transform how we live, work, and think / V. Mayer-Schoenberger, K. Cukier. – Boston New York, 2013. – 230 p.
7. Boyko N. A look through methods of intellectual data analysis and their applying in informational systems / N. Boyko // Комп'ютерні науки та інформаційні технології CSIT 2016 : Materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi CSIT 2016 : proceedings. – L'viv : Vydavnytstvo L'vivskoyi politekhniki, 2016. – P. 183–185.
8. Benderskaia E. N. Ostsilliatornyie neuronnye seti s khaoticheskoi dinamikoі v zadachakh klasterного analiza / E. N. Benderskaia, S. V. Zhukova // Neurokomp'yutery: razrabotka, primeneniye; Radiotekhnika : proceedings. – Moscow : Radyotekhnika, 2011. – № 7. – P. 74–86.
9. Benderskaia E. N. Modelirovaniye neuronnoi aktivnosti mozga i bionspirovaniye vychisleniia / E. N. Benderskaia, K. V. Nikitin // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telecommunicacii. Upravleniye : proceedings. – St.-Petersburg : Izd-vo Politehn. un-ta. – 2011. – № 6-2(138). – P. 34–40.
10. Benderskaia E. N. Vozmozhnosti primeneniia nekotorykh kharakteristik sinkhronizatsii dlia vyivleniia samoorganizuiushchikhsia klasterov v ostsilliatornoі neuronnoi seti s khaoticheskoi dinamikoі / E. N. Benderskaia // Neurokomp'yutery: razrabotka, primeneniye; nauchno-tekhnicheskii zhurnal : proceedings. – Moscow : Nauchnyi tsentr neirokomp'yuterv, 2012. – № 11. – P. 69–73.
11. Feng J. Fixed-point attractor analysis for a class of neurodynamics / J. Feng, D. Brown // Neural Computation : proceedings. – Massachusetts : MIT Press Cambridge, 1998. – Vol. 10. – P. 189–213.
12. Kaneko K. Life: an introduction to complex systems biology / K. Kaneko. – Berlin : Springer-Verlag, 2006. – 369 p.
13. Maass W. Real-time computing without stable states: a new framework for neural computations based on perturbations / W. Maass, T. Natschger, H. Markram // Neural Computation : proceedings. – Switzerland: Institute for Theoretical Computer Science, 2002. – Vol. 11. – P. 2531–2560.
14. Schrauwen B. An overview of reservoir computing theory, applications and implementations / B. Schrauwen, D. Verstraeten, J. V. Campenhout // Proc. of the 15th European Symp. on Artificial Neural Networks : proceedings. – Belgium : Bruges, 2007. – P. 471–482.
15. Coombes S. Waves, bumps, and patterns in neural field theories / S. Coombes // Biological Cybernetics : proceedings. – Nottingham : University of Nottingham, 2005. – Vol. 93, № 2. – P. 91–108.

Стаття надійшла до редакції 02.03.2017.

Після доробки 17.04.2017.

деление ее в кластеризованного базу данных. В статье обобщены понятие «большие данные». Приводятся примеры методов по работе с массивами неструктурированных данных. Выделенные научные направления для анализа больших данных. Сформулированы принципы работы неструктурированных данных в распределенной информационной системы. Приводится работа платформ Hadoop MapReduce и Apache Spark. Анализируются свойства и приводятся различия. Приводится сравнительный анализ производительности обеих платформ в отношении – время выполнения количеству итераций. Рассматриваются способы создания RDD: распараллеливания переданной коллекции в программе и ссылки на внешнюю файловую систему в Hadoop. Также приводится пример распараллеленных системы RDD. Предлагается работа класса одиночка для основных операций с базой данных: подключение к базе данных, создание таблицы, уничтожение таблицы, получение строки по id, возвращение всех элементов базы данных, обновления, удаления и создания строки.

Результаты. Проведенный анализ моделей Spark и Hadoop MapReduce для поэтапной построения распределенной информационной системы. Построен SparkConf объект, который содержит информацию о аппликацию и является конечным вариантом эксперимента.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов, которые способны обрабатывать горизонтальные массивы данных, распараллеленных из-за некачественного способ представления информации. Такие перспективные направления работы анализируют структуру данных для прогноза результатов и создают алгоритмы передовых корреляций, способствующих новому пониманию деятельности распределенных информационных систем. Дальнейшие исследования могут заключаться в широком применении информационных систем, которые бы обеспечивали полный комплекс технологического процесса адаптации информационных потоков в кластеры.

Ключевые слова: система, технология, большие данные, информация, методика, база данных, веб-аппликация, моделирование, обработка, анализ.

Boyko N.

PhD., Associate Professor, Associate Professor of Department of Information Systems and Networks, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

ADVANCED TECHNOLOGIES OF BIG DATA RESEARCH IN DISTRIBUTED INFORMATION SYSTEMS

Context. Considered question correct interpretation information flow in distributed information systems. The object of study methods are promotion “big data” on cluster system.

Objective. Is the study promising areas and technology for the analysis of structures data in distributed information systems.

Method. The big data tendency prospects as well as timeliness of the problem are studied in this paper. The principles of work with them are addressed. Big data processing technologies are provided. The analysis of each one is performed. An example of “MapReduce” paradigm application, uploading of big volumes of data, processing and analyzing of unstructured information and its distribution into the clustered database is provided. The article summarizes the concept of “big data”. Examples of methods for working with arrays of unstructured data. Dedicated scientific guidance for analyzing big data. The principles of unstructured data in distributed information systems. Driven work platform “Hadoop MapReduce” and “Apache Spark”. Analyzed their properties and given the differences. An analysis of comparative performance against both platforms – the performance of the number of iterations. Consider ways to create RDD: parallelization transmitted collection program and a link to an external file system in “Hadoop”. There is an example rozparalelenoyi system RDD. Proposed work lone class for basic database operations: database connection, create a table, a table, get in line id, returning all elements of the database, update, delete and create the line.

Results. The analysis Models Spark and Hadoop MapReduce for phased construction distributed information system. built up SparkConf object, containing information about applique and is the final version of the experiment.

Conclusions. Conducted experiment confirmed efficiency the proposed method, are capable process horizontal data arrays, that parallelization by defective presentation of information. These promising areas of analyze structure data for the purpose of forecast results and create algorithms advanced correlation, contributing new understanding activity distributed information systems further research can consist in wide use information systems, that would provide a full range technological process adaptation information flows in clusters.

Keywords: system, technology, big data, information, technique, database, Web application, modeling, processing, analytics.

REFERENCES

1. What is Big Data [Electronic resource]. Access mode: <http://datascience.berkeley.edu/what-is-big-data/>
2. Shaw J. Why “Big Data” Is a Big Deal [Electronic resource]. Rezhym dostupu: <http://harvardmag.com/pdf/2014/03-pdfs/0314-HarvardMag.pdf>
3. Schutt P. What is Big Data? [Electronic resource]. Rezhym dostupu: <https://blogs.oracle.com/bigdata/big-data-and-analytic-top-10-trends-for-2014>
4. Boyko N., Pobereyko P. Basic concepts of dynamic recurrent neural networks development, *ECONTECHMOD : an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*. Lublin, Polish Academy of Sciences, 2016, Vol. 5, No. 2, pp. 63–68.
5. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J. D. Mining of massive datasets. Massachusetts, Cambridge University Press, 2014, 470 p.
6. Mayer-Schoenberger V., Cukier K. A revolution that will transform how we live, work, and think. Boston New York, 2013, 230 p.
7. Boyko N. A look trough methods of intellectual data analysis and their applying in informational systems, *Komp’yuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi CSIT 2016 : Materialy XI Mizhnarodnoyi naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi CSIT 2016 : proceedings*. L’viv, Vydavnytstvo L’vivs’koyi politekhniki, 2016, pp. 183–185.
8. Benderskaia E. N., Zhukova S. V. Ostsilliatornyie neironnye seti s khaoticheskoi dinamikoï v zadachakh klasterenogo analiza, *Neirokomp’yutery: razrabotka, primenienie; Radiotekhnika : proceedings*. Moscow, Radyotekhnika, 2011, No. 7, pp. 74–86.
9. Benderskaia E. N., Nikitin K. V. Modelirovanie neironnoi aktivnosti mozga i bionspirirovannye vychisleniia, *Nauchno-tekhicheskie vedomosti SPbGPU. Informatika. Telecommunicacii. Upravlenie : proceedings*. St.-Petersburg, Izd-vo Politehn. un-ta, 2011, No. 6–2(138), pp. 34–40.
10. Benderskaia E. N. Vozmozhnosti primeneniia nekotorykh kharakteristik sinkhronizatsii dlia vyivleniia samoorganizuiushchikhsia klasterov v ostsilliatornoi neironnoi seti s khaoticheskoi dinamikoï, *Neirokomp’yutery: razrabotka, primenienie: nauchno-tekhicheskii zhurnal : proceedings*. Moscow, Nauchnyi tsentr neirokomp’yutrov, 2012, No. 11, pp. 69–73.
11. Feng J., Brown D. Fixed-point attractor analysis for a class of neurodynamics, *Neural Computation : proceedings*. Massachusetts, MIT Press Cambridge, 1998, Vol. 10, pp. 189–213.
12. Kaneko K. Life: an introduction to complex systems biology. Berlin, Springer-Verlag, 2006, 369 p.
13. Maass W., Natschger T., Markram H. Real-time computing without stable states: a new framework for neural computations based on perturbations, *Neural Computation : proceedings*. Switzerland, Institute for Theoretical Computer Science, 2002, Vol. 11, pp. 2531–2560.
14. Schrauwen B., Verstraeten D., Campenhout J. V. An overview of reservoir computing theory, applications and implementations, *Proc. of the 15th European Symp. on Artificial Neural Networks : proceedings*. Belgium, Bruges, 2007, pp. 471–482.
15. Coombes S. Waves, bumps, and patterns in neural field theories, *Biological Cybernetics : proceedings*. Nottingham, University of Nottingham, 2005, Vol. 93, No. 2, pp. 91–108.

ІНТЕРВАЛЬНИЙ НЕЧІТКИЙ КЛАСТЕРНИЙ АНАЛІЗ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ АРТЕЗІАНСЬКОЇ СВЕРДЛОВИНИ

Актуальність. Моніторинг природних систем різного характеру є необхідною умовою раціонального природокористування. Технології інтелектуального аналізу даних, зокрема кластерний аналіз, надають широкі можливості для візуалізації наборів даних, що дозволяє використовувати ці технології людьми, які не мають спеціальної математичної підготовки. Задача моніторингу системи, стан якої змінюється в часі, висуває вимогу розширеної інтерпретації результатів кластеризації з урахуванням історичних даних. Технічні можливості для виявлення характеру змін, що відбуваються в об'єкті, представленому набором даних, мають особливе значення в задачі моніторингу водних ресурсів, оскільки вони перебувають у тісному взаємозв'язку з зовнішнім середовищем, та величина їхніх запасів залежить від багатьох факторів, зовнішніх відносно водоносної системи. Після введення в експлуатацію артезіанська свердловина потребує постійного спостереження задля правильного керування експлуатацією підземних вод, захисту їх від забруднення та вичерпання, а також попередження негативних наслідків впливу водовідбору на навколишнє середовище. Крім того, для складних природних систем характерна висока надлишковість простору параметрів, а також наявність як відомих, так і не виявлених досі кореляційних зв'язків між параметрами. Ці фактори зумовлюють необхідність використання методів кластерного аналізу, здатних працювати в умовах невизначеності та надлишковості параметрів.

Мета роботи – розширення можливостей для аналізу зміни стану системи в часі шляхом урахування невизначеностей, присутніх у даних спостережень.

Метод. Запропоновано застосування методу інтервального нечіткого кластерного аналізу для дослідження зміни характеристик набору даних у часі та виявлення загальних тенденцій. Формалізація поставленої технологічної задачі в термінах інтелектуального аналізу даних передбачає можливість одночасної роботи з множиною вхідних векторів. Сформульовано покроковий алгоритм побудови інтервальної оцінки стану природної системи на основі історичних даних спостережень та поточних значень.

Результати. Запропоновану модель адаптовано до розв'язання технологічної задачі моніторингу артезіанської свердловини та експериментально показано можливості раннього виявлення прихованих закономірностей.

Висновки. Інтервальний нечіткий кластерний аналіз дозволяє враховувати та моделювати невизначеності довільної природи, що виникають у даних досліджень артезіанської свердловини на різних стадіях моніторингу. Показано, що одночасне подання на вхід системи даних кількох свердловин може дати змогу оцінити не лише їхнє розташування щодо стандартних компактних класів за (потенційною) якістю води, але й взаємне розташування, і в кінцевому підсумку вказати на деяку не виявлену до цього закономірність.

Ключові слова: кластерний аналіз, інтервальні ступені належності, інтервальні нечіткі множини, критерії якості кластеризації, візуалізація даних.

НОМЕНКЛАТУРА

$SC(c, m)$ – індекс розбиття (Partition Index);

$K(c, m)$ – критерій Квона;

$XB(c, m)$ – критерій Хіе-Бені;

μ_{ij} – ступінь належності точки j до кластера i ;

v_j – центр j -го кластера;

m – рівень нечіткості;

C – кількість кластерів;

N – кількість точок;

$\bar{v}$ – середнє значення центрів кластерів;

(X, Y) – набір даних спостережень;

W^s – артезіанська свердловина;

$p_1 \dots p_m$ – простір ознак (параметрів свердловини);

$X^i = \{x_1^i, \dots, x_m^i\}$ – результати дослідження свердловини W^i за параметрами $p_1 \dots p_m$;

$Y = \{y_1, \dots, y_n\}$ – класи, утворені об'єктами x^i відповідно до оцінюваного параметра.

ВСТУП

Методи та моделі нечіткого кластерного аналізу мають широке поле для застосування в сучасних інтелектуальних системах. У контексті технологій Data Mining одним із основних призначень кластеризації є наочне по-

дання (візуалізація) результатів обчислень, що дозволяє використовувати ці технології людьми, які не мають спеціальної математичної підготовки [1]. Кластерний аналіз широко використовується для виділення прихованих закономірностей та внутрішніх взаємозв'язків у великих масивах багатовимірних даних, таких як обробка зображень, розпізнавання образів, дослідження та прогнозування соціально-економічних процесів тощо. Одним із важливих його застосувань є також попередня обробка наборів даних, зокрема виділення інформативних ознак при роботі з надлишковими даними.

У системах, стан яких змінюється в часі, виникають більш широкі можливості для інтерпретації результатів кластеризації. В умовах змінних значень параметрів об'єктів видається перспективним дослідження зміни характеру розбиття видозміненого набору даних у порівнянні з вихідним. Прикладом застосування такого підходу можуть бути системи моніторингу об'єктів та процесів різного походження, як природних, так і технічних. В рамках дослідження цей підхід буде застосовано в задачі моніторингу артезіанської свердловини. Після введення в експлуатацію вона потребує постійного спостереження задля правильного керування експлуатацією підземних вод, захисту їх від забруднення та вичерпання, а також попередження негативних наслідків впливу во-

довідбору на навколишнє середовище [2]. Завдання точного та періодичного моніторингу свердловини в багатьох випадках покладається на організацію, що здійснювала роботу зі свердловиною від початку гідро-геологічної розвідки, пов'язаної з даним проектом. З одного боку це означає, що в розпорядженні дослідника є всі дані попередніх спостережень; з іншого, якщо у віданні організації знаходиться все родовище або ж його частина, що охоплює значну кількість свердловин, детальний аналіз кожного з контрольованих параметрів на предмет потенційно небезпечних відхилень вимагає суттєвих затрат часу. Якщо взяти до уваги надлишковість простору параметрів, що завжди характерна для складних природних систем, та відомі кореляційні зв'язки між ними, задача ускладнюється ще більше. Крім того, в системі можуть також існувати досі не виявлені зв'язки між параметрами, які не можуть бути враховані експертом-людиною.

Кластерний аналіз як інструмент подання, або візуалізації, даних дозволяє виявити приховані закономірності та внутрішні взаємозв'язки, присутні в досліджуваному наборі даних [3–7]. Серед існуючих на сьогоднішній день методів кластеризації є й такі, що показують добрі результати на даних високої розмірності [3, 4, 7–9]. Об'єктом даного дослідження є методи інтервальної нечіткої кластеризації на основі альтернативних критеріїв якості [6]. Предметом дослідження є можливості застосування цього методу для розв'язання задачі моніторингу природних систем. Мета роботи – розширення можливостей для аналізу зміни стану системи в часі шляхом урахування невизначеностей, присутніх у даних спостережень. Задля досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- формалізувати задачу моніторингу природної системи в термінах Data Mining;
- сформулювати алгоритм побудови інтервальної оцінки стану артезіанської свердловини на основі попередніх та поточних даних спостережень;
- показати можливість роботи методу на даних спостережень природних систем.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачу моніторингу однієї або більше артезіанських свердловин в термінах кластерного аналізу можна сформулювати таким чином. Нехай задано набір даних спостережень:

$$X = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^m \\ x_2^1 & x_2^2 & & x_2^m \\ \dots & & & \\ x_n^1 & x_n^2 & & x_n^m \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix}.$$

Оцінюваний параметр, в розрізі якого проводиться дослідження, умовно назовемо «перспективність свердловини». В даному випадку це узагальнена кількісна оцінка стану свердловини, що відображає перспективність її подальшої експлуатації, а також ступінь невизначеності, пов'язаної з цією оцінкою. Для набору (X, Y) , який у подальшому будемо називати навчальним набором, відомо висновок експерта про належність свердловини W^n до одного з класів за перспективністю. Відомо також, що об'єкти $x^1, \dots, x^n$ утворюють компактні кластери в про-

сторі вхідних ознак. На множину X також накладається умова репрезентативності її відносно генеральної сукупності векторів ознак, тобто множина X повинна містити представників усіх c класів. Необхідно розбити множину X на c кластерів та визначити ступені належності до кожного з c кластерів довільної свердловини W^z , що описується вхідним вектором $X^z = \{x_1^z, \dots, x_m^z\}$, $X^z \notin X$.

Як буде показано далі, така постановка допускає можливість одночасного розв'язання задачі не лише для одного вхідного вектора, а й для матриці, побудованої з даних досліджень множини свердловин.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В роботі [10] здійснено спроби розв'язання задач регіонального районування та соціально-економічного прогнозування. Роботи [11, 12, 13] демонструють, як кластерний аналіз може виконувати сегментацію множини абонентів провайдера телекомунікаційних послуг. Проте математичні методи, що лежать в основі цих досліджень, суттєво обмежені припущенням, що вхідні дані є абсолютно точними, правдивими та незашумленими. Метод, запропонований в роботах [14, 15], попри високі оптимізаційні властивості, ставить аналогічну вимогу. Відомо, що на практиці такі умови трапляються вкрай рідко, тому дана задача вимагає методів кластерного аналізу, стійких до викидів та шуму. Метод PCM (Possibilistic C-Means) [16] задовольняє цій вимозі – він надзвичайно стійкий до шумів у вхідних показниках, але базується на нечітких множинах типу 1. Це не дає змогу дати повністю адекватну оцінку досліджуваній множині даних, оскільки крім точок, що вносять шум, у характеристиках кожної точки закладена певна невизначеність, яка не може не перенестись на результат кластеризації. При цьому характеризувати ступінь належності точки до кластера одним числом недостатньо. Зважаючи на це, подання ступенів належності у вигляді інтервальних значень та застосування математичного апарату нечітких множин типу 2 в задачі кластеризації має практичний сенс.

Методи нечіткої кластеризації дають також позитивні результати в задачі загального оцінювання якості води [17, 18]. Робота з підземними водами ускладнюється їхньою недоступністю для безпосередніх спостережень. Інформація про стан системи достеменно відома в окремих точках родовища; дані ж про інші ділянки отримують, екстраполюючи фактичні точкові дані на ділянки, про які фактичної інформації немає [19]. Тому сучасні методи та технології оцінювання якості підземних вод [20–22] в цілому суттєво не відрізняються від методів, що застосовуються для досліджень поверхневих вод. З усіх факторів, що впливають на якість та особливості видобутку підземних вод особливу увагу приділено антропогенному забрудненню [23, 24] та дослідженню вразливості водоносних горизонтів до шкідливих речовин, присутніх у повітрі, ґрунтах та поверхневих водах [25, 26]. Математичні моделі та методи, які при цьому застосовуються, не передбачають моделювання невизначеностей, що виникають при спостереженні гідрогеологічних систем. Всі вони побудовані на припущенні, що отримані дані спостережень точні, повністю визначені, однозначні та достовірні. У випадку такого складного об'єкта спос-

тережень як підземні води задовольнити ці вимоги до вибірки даних практично неможливо, що не може не вплинути на адекватність побудованих моделей. Врахування та моделювання невизначеностей, закладених у вихідному наборі даних, у ряді випадків дає змогу помітити тенденції та зміни в характері процесів, що протікають у природній системі, на стадії їх формування [27].

Розв'язання задачі моніторингу підземних вод на основі методу інтегрального нечіткого кластерного аналізу дасть змогу підвищити ефективність спостережень та скерувати увагу спеціалістів на можливі негативні фактори й тенденції на ранніх фазах їх розвитку. Широкі можливості для одночасної роботи з множиною свердловин дозволять підвищити частоту таких контролюючих заходів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для розв'язання задачі поточного моніторингу артезіанської свердловини застосуємо модель на основі модифікованого методу кластеризації РСМ з інтервальним виходом, запропоновану в роботі [6]. Він має за основу метод можливої кластеризації [16] та передбачає отримання інтервальних значень ступенів належності об'єктів до кластерів за рахунок регулювання рівня нечіткості. Інтервал зміни рівня нечіткості визначається за допомогою критеріїв якості кластеризації Квона, Хіе-Бені та індексу розбиття [5]:

$$SC(c, m) = \sum_{i=1}^c \frac{\sum_{k=1}^N (\mu_{i,k})^m \|x_k - v_i\|^2}{\sum_{k=1}^N \mu_{i,k} \sum_{j=1}^c \|v_j - v_i\|^2}, \quad (1)$$

$$K(c, m) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N (\mu_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2 + \frac{1}{c} \sum_{i=1}^c \|v_i - \bar{v}\|^2}{\min_{i \neq j} \|v_i - v_j\|^2}, \quad (2)$$

$$XB(c, m) = \frac{\sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^N (\mu_{ij})^m \|x_j - v_i\|^2}{N \min_{i,j} \|v_i - x_j\|^2}. \quad (3)$$

Процес прийняття рішення відбувається в такій послідовності.

1. Визначити параметри розбиття навчального набору (X, Y) на кластери відповідно до методу [6]. В даному його застосуванні суттєвими є лише значення рівня нечіткості та координати центрів кластерів. Обчислювати остаточні значення ступенів належності зразків навчаль-

ного набору до отриманих кластерів немає необхідності.

2. На останньому кроці методу [6] обчислити значення ступенів належності до кластерів для зразка, що являє собою вектор W^z параметрів контрольованої свердловини. Обчислення відбувається за формулою (4) методу РСМ:

$$\mu_{ij} = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_{ij}^2}{\eta_j} \right)^{\frac{1}{m-1}}}. \quad (4)$$

3. В загальному випадку векторів може бути більш ніж один; в такому випадку йдеться про «підміну» навчального набору даних тестовим. Оскільки для оцінювання позиції кожного з контрольованих зразків достатньо лише обчислити ступені належності за формулою (4), на обсяг тестового набору даних, що може оброблятися, не накладається обмежень; в загальному випадку він може перевищувати обсяг навчального набору.

4. Обчислити значення критерію (критеріїв) якості кластеризації на об'єднанні навчального та тестового наборів даних. Пропонується використати критерії (1–3), значення яких досліджуються на кроках 1–2 протягом виконання інтервальної кластеризації навчального набору даних. Це дасть змогу оцінити, чи спотворюють дані тестового набору «ідеальне» розбиття, отримане для навчального набору, та визначити кількісну міру цих спотворень.

5. Остаточне рішення приймається за ступенями належності точки, що характеризується вектором X^z , до кожного з c утворених кластерів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Об'єктом кластеризації будемо вважати набір значень параметрів артезіанської свердловини $X^i = \{x_1^i, \dots, x_m^i\}$, включаючи такі, що описують особливості геологічної будови, тектонічні, кліматичні та гідрогеологічні умови, а також результати дослідних робіт безпосередньо в свердловині: дані геофізичних досліджень, пробних і дослідних відкачок, параметри, що характеризують якість підземних вод. Кластерний аналіз відбувається в просторі ознак свердловини $x_1, \dots, x_{84}$, приклади яких наведено в табл. 1.

Навчальний набір даних побудовано на основі архівних даних досліджень свердловин родовищ підземних вод, розташованих на території Правобережної Геологічної Експедиції. Вхідному вектору, що містить усі параметри свердловини x_1-x_{84} , ставиться у відповідність висновок експерта-гідрогеолога про її придатність до видобутку питної води терміном на найближчі 5 років. Навчальний набір даних складається з 20 зразків, приклади зразків наведено в табл. 2.

Таблиця 1 – Параметри гідрогеологічного дослідження

Позначення змінної	Назва параметру	Область значень
x_1	Віддаленість від населених пунктів, км	0–50
x_2	Віддаленість від шосейних доріг загальнодержавного значення, км	0–50
...	...	...
x_{83}	Гідрогеологічні умови за ступенем складності	1–3
x_{84}	Гідрогеологічні умови за ступенем вивченості	0–10

В ході експерименту досліджено можливості запропонованого вище методу, визначивши параметри розбиття на основі навчального набору даних з табл. 2 та застосувавши їх до тестового набору, частково показаного в табл. 3.

Тестовий набір даних складається з 30 зразків, що не входять до навчального, та імітує множину вхідних даних задачі моніторингу реальних артезіанських свердловин.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Розіб'ємо навчальний набір даних на кластери за методом [6]. Число кластерів вважаємо наперед заданим, $c=3$.

Поведінку критеріїв якості розбиття відносно рівня нечіткості показано на рис. 1.

За правилом, запропонованим в [6], інтервальне значення рівня нечіткості

$$\tilde{m} = \tilde{m}_K \cup \tilde{m}_{XB} \cup \tilde{m}_{SC} = [1,7; 3,5] \cup [1,7; 3,5] \cup [1,6; 4,1].$$

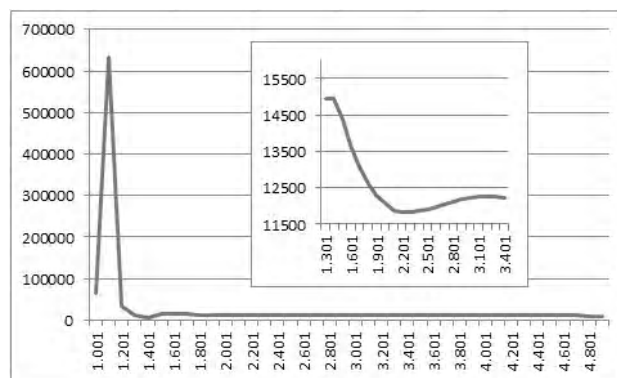
Побудувавши розбиття для правої та лівої границь інтервалу $\tilde{m}$, отримано центри кластерів та ступені належності зразків навчального набору даних, наведені в таблицях 4–5.

Аналіз розташування центрів та складу кластерів в розрізі поняття «перспективність свердловини» дозволяє поставити у відповідність кластерам значення перспективності: кластер 1 – висока, кластер 2 – недостатня, кластер 3 – достатня.

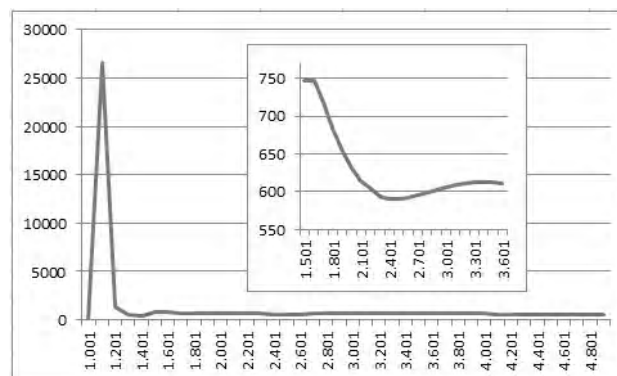
Значення критеріїв якості кластеризації на навчальному наборі даних становлять $SC(c,m) = 155$; $K(c,m) = 11880,2$; $XB(c,m) = 589,9$.

Отримані значення рівня нечіткості та координат центрів кластерів приймаємо за вихідні для обчислення ступенів належності зразків із тестової вибірки. Запропонований метод не передбачає повторного обчислення центрів кластерів та знаходження оптимального рівня нечіткості, тому час виконання обчислень лінійно залежить від кількості зразків у тестовому наборі. Результати обчислень ступенів належності зразків тестового набору даних до трьох кластерів подано в табл. 6.

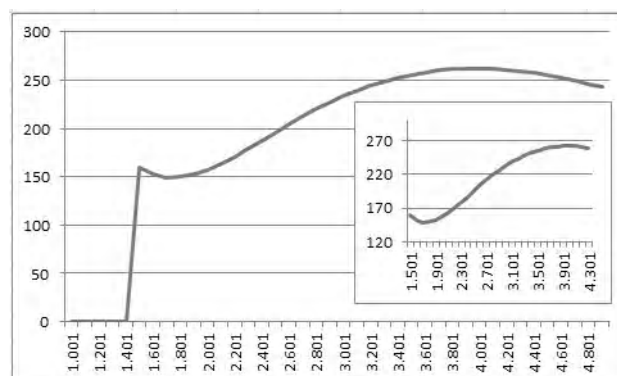
Значення критеріїв якості кластеризації на тестовому наборі даних становлять $SC(c,m) = 218,9$; $K(c,m) = 12034,4$; $XB(c,m) = 626,5$.



а



б



в

Рисунок 1 – Поведінка критеріїв якості відносно рівня нечіткості:

а – критерій Квона; б – критерій Хіе-Бені; в – індекс розбиття

Таблиця 2 – Дані досліджень свердловин (навчальна вибірка)

Змінна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x_1	1,5	3	12	22	18	15	15	26	37	35	27	4	48	50	50	30	25	22	39	31
x_2	43	12	12,5	25	4	11	32	2	5	2	10	3	3	0,8	4,5	1	40	14	1,5	3
...																				
x_{83}	2	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	2	2	3	3	2	2	2	2
x_{84}	10	7	7	10	10	10	7	10	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7

Таблиця 3 – Тестовий набір даних

Змінна	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	...	26	27	28	29	30
x_1	30	25	22	39	37	35	27	12	22	18		26	37	35	27	39
x_2	1	40	14	1,5	5	2	10	12,5	25	4		2	5	2	10	1,5
...																
x_{83}	2	2	3	3	2	3	2	2	2	3		3	2	2	3	3
x_{84}	7	7	7	10	7	10	10	10	10	10		10	7	7	7	10

Таблиця 4 – Центри кластерів

Змінна	Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3	
	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя
x_1	25,82	29,13	20,98	20,99	18,23	24,11
x_2	34,17	37,36	12,91	16	14,14	22,87
...						
x_{83}	0,9	0,99	1,05	2,82	1,48	2,24
x_{84}	7,98	9,88	5,06	9,6	6,3	6,33

Таблиця 5 – Ступені належності

№	Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3	
	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя
1	0,694	0,858	0,107	0,468	0,196	0,536
2	0,064	0,594	0,286	0,494	0,227	0,362
...						
19	0,148	0,867	0,351	0,387	0,076	0,332
20	0,209	0,730	0,167	0,382	0,323	0,494

Таблиця 6 – Ступені належності зразків тестової вибірки

№	Кластер 1		Кластер 2		Кластер 3		Результат / ширина інтервалу	Оцінка експерта
	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя	Ліва границя	Права границя		
1	0,165	0,178	0,618	0,918	0,249	0,491	Недостатня / 0,3	Недостатня
...								
4	0,722	0,99	0,029	0,326	0,053	0,352	Висока / 0,27	Висока
...								
30	0,661	0,96	0,211	0,389	0,119	0,422	Висока / 0,3	Недостатня

6 ОБГОВОРЕННЯ

Змістовність отриманих значень критеріїв якості кластеризації та характер їх інтерпретації визначається природою тестової вибірки в кожному конкретному випадку. В рамках даного дослідження тестова вибірка складалася з даних довільних свердловин на різних стадіях експлуатації, тому складно простежити закономірність, яка могла б пояснити розходження в значеннях критеріїв. Загальні критерії якості характеризують тестову вибірку в цілому та мають практичний сенс лише тоді, коли вона формувалася за деяким принципом або системою. Можливі застосування запропонованого методу, в яких значення критеріїв якості після об'єднання навчальної та тестової вибірки можуть нести змістове навантаження, доступне для інтерпретації в термінах предметної галузі. Наприклад, тестова вибірка може складатися з даних різних свердловин одного родовища в заданий момент часу, скажімо, за 10 років після введення їх в експлуатацію. В цьому випадку незначне розходження в значеннях критеріїв якості до та після внесення тестового набору може говорити про стабільність гідрогеологічної системи та процесів, що в ній відбуваються, і широкі перспективи подальшої експлуатації артезіанських свердловин на досліджуваній території.

У даному ж випадку слід звернути увагу на розходження між індивідуальними значеннями інтервалів ступенів належності зразків тестової вибірки до кластерів. Дослідження моделі на основі інтервальної кластеризації зокрема показують розходження рішення, прийнятого системою, з експертним висновком у прикладі 30 (табл. 6). Зразок

30 за всіма показниками крім одного (концентрація радону, 219 Бк/дм³) близький до кластера 1. Оскільки кластерний аналіз як технологія навчання без учителя не має можливостей для врахування інших факторів, окрім Евклідової відстані між точками в просторі ознак, зразок 30 віднесено до кластера 1 (Висока), хоча насправді вода з такими характеристиками непридатна до вживання. Безперечно, якщо розглядати зразок 30 окремо від даних інших спостережень, результат роботи системи в цьому випадку слід вважати незадовільним. В будь-якому разі, всі системи підтримки прийняття рішень у галузі моделювання гідрогеологічних процесів вимагають коригування за допомогою експертних знань. Проте якщо зважити на те, що зразок 30 за своїми значеннями практично повністю повторює зразок 4, а також на те, що зразок 30 імітує поступове виникнення негативної тенденції в часі (підвищення радіоактивності), то до оцінювання результату слід підходити по-іншому. В даному випадку спостерігається розширення зони невизначеності ([0,661; 0,96]) в порівнянні з попереднім значенням ([0,722; 0,99]) та зсув ступеня належності до «хорошого» кластера в бік зменшення. Водночас помітна зміна ступенів належності зразка до інших кластерів у бік зростання: [0,211; 0,389] порівняно з [0,029; 0,326] для зразка №4; [0,119; 0,422] проти [0,053; 0,352] відповідно.

Таким чином, у контексті задачі моніторингу артезіанської свердловини результат, отриманий для зразка 30 достатньо змістовний для того, щоб звернути увагу дослідника на процеси, що відбуваються в цій свердловині, та вказує на необхідність більш детального дослідження. В решті випадків результат роботи системи повністю уз-

годжується з рішенням експерта для відповідного зразка; ширину інтервалу можна вважати мірою невизначеності, спричиненої браком експертних знань. Вона досить суттєва, як і слід очікувати від такого складного об'єкта дослідження як гідрогеологічна система.

ВИСНОВКИ

Роботу присвячено розширенню галузі застосування методів кластерного аналізу шляхом аналізу зміни характеру розбиття набору даних у часі. Подання ступенів належності в інтервальній формі робить можливим вивчення цих змін та їх якісну інтерпретацію. Інтервальний нечіткий кластерний аналіз дозволяє враховувати та моделювати невизначеності довільної природи, що виникають в об'єкті спостереження на різних стадіях моніторингу. Ця властивість має особливу цінність у задачах моніторингу водних ресурсів, оскільки вони перебувають у тісному взаємозв'язку з зовнішнім середовищем, та величина їхніх запасів залежить від багатьох факторів, зовнішніх відносно водонасиченої системи. Тому регулярний моніторинг є невід'ємною складовою процесу дослідження та експлуатації артезіанських свердловин і дає можливість виявити ранні ознаки вичерпання джерела водопостачання, а також зміни в складі вод або глибини залягання водоносного горизонту.

В рамках дослідження виконано адаптацію методу інтервального нечіткого кластерного аналізу до прикладної задачі моніторингу стану підземних вод. Формалізація поставленої технологічної задачі в термінах інтелектуального аналізу даних передбачає можливість одночасної роботи з множиною вхідних векторів. Сформульовано покроковий алгоритм побудови інтервальної оцінки стану свердловини на основі історичних даних спостережень та поточних значень. Подання ступенів належності в інтервальній формі дозволяє враховувати та моделювати невизначеності, пов'язані з браком експертних знань. Останнє має особливо важливе значення в контексті кластерного аналізу як технології навчання без учителя. Отримані результати перевірено експериментально. Показано, що одночасне подання на вхід системи даних кількох свердловин може дати змогу оцінити не лише їхнє розташування щодо стандартних компактних класів за (потенційною) якістю води, але й взаємне розташування, і в кінцевому підсумку вказати на деяку не виявлену до цього закономірність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дюк В. А. Data Mining: учебный курс / В. А. Дюк, А. П. Самойленко. – СПб.: Изд. Питер, 2001. – 368 с.
2. Петровська М. А. Охорона вод (санітарні норми і правила): навч. посібник / М. А. Петровська. – Львів: Видавничий центр Львівського національного університету імені Івана Франка, 2005. – 205 с.
3. Субботин С. А. Выделение набора информативных признаков на основе эволюционного поиска с кластеризацией / С. А. Субботин, А. А. Олейник // Штучный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 704–711.
4. Cai W. Fast and robust fuzzy c-means clustering algorithms incorporating local information for image segmentation / W. Cai, S. Chen, D. Zhang // Pattern Recognition. – 2007. – Vol. 40, № 3. – P. 825–838.
5. Oliveira J. V. Advances in Fuzzy Clustering and Its Applications / J. V. Oliveira, W. Pedrycz. – Sidney: John Wiley & Sons, 2007. – 435 p.
6. Кондратенко Н. Р. Интервальна нечітка кластеризація на основі альтернативних критеріїв якості / Н. Р. Кондратенко, О. О. Снігур // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2012. – № 2. – С. 59–66.
7. Martyniuk T. B. Formalization of the Object Classification Algorithm / T. B. Martyniuk, A. V. Kozhemiako, L. M. Kupershtein // Cybernetics and Systems Analysis. – 2015. – Vol. 51, № 5. – P. 751–756.
8. Bankruptcy forecasting: a hybrid approach using fuzzy c-means clustering and multivariate adaptive regression splines (MARS) / [J. De Andres, P. Lorca, F. J. D. C. Juez et al.] // Expert Systems with Applications. – 2011. – № 38. – P. 1866–1875.
9. A modified FCM algorithm for MRI brain image segmentation using both local and non-local spatial constraints / [J. Wang, J. Kong, Y. Lu et al.] // Computerized Medical Imaging and Graphics. – 2008. – Vol. 32, № 8. – P. 685–698.
10. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах / Ю. П. Зайченко. – К.: «Издательский дом «Слово», 2008. – 344 с.
11. Захарченко С. М. Використання генетичного алгоритму в задачі кластеризації абонентів інтернет-провайдерів / С. М. Захарченко, Н. Р. Кондратенко, О. О. Манаєва // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія: І Міжнародна науково-практична конференція, Вінниця, 19–21 травня 2010 р.: тези доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2010. – С. 120–121.
12. Захарченко С. М. Дослідження можливостей генетичного алгоритму в задачі кластеризації користувачів мережі Інтернет / С. М. Захарченко, Н. Р. Кондратенко, О. О. Манаєва // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – Вінниця: ВНТУ. – 2010. – № 2 (18). – С. 68–72.
13. Манаєва О. О. Побудова кластерів з використанням генетичного алгоритму / О. О. Манаєва // XXXIX науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, співробітників та студентів університету з участю працівників науково-дослідних організацій та інженерно-технічних працівників підприємств м. Вінниця та області, Вінниця, 10–12 березня 2010 р.: тези доповідей. – Вінниця: ВНТУ, 2010.
14. Кондратенко Н. Р. Нечітка кластеризація абонентів інтернет-провайдерів / Н. Р. Кондратенко, О. О. Манаєва // Наукові праці Вінницького національного технічного університету. – 2011. – № 2.
15. Кондратенко Н. Р. Нечітка кластеризація з урахуванням індексу вірогідності в задачах соціального спрямування / Н. Р. Кондратенко, О. О. Манаєва // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2011. – К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ». – 2011. – С. 265.
16. Krishnapuram R. A Possibilistic Approach to Clustering / R. Krishnapuram, J. M. Keller // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 1993. – № 1 (2). – P. 98–110.
17. A fuzzy technique for food- and water quality assessment with an electronic tongue / [B. Iliev, M. Lindquist, L. Robertsson et al.] // Fuzzy Sets and Systems – 2006. – Vol. 157, № 9. – P. 1155–1168.
18. Assessment of the surface water quality in Northern Greece / [V. Simeonov, J. A. Stratis, C. Samara et al.] // Water Research. – 2003. – Vol. 37, № 17. – P. 4119–4124.
19. Боровский Б. В. Оценка запасов подземных вод / Б. В. Боровский, Н. И. Дробноход, Л. С. Язвин. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Выща шк. Головное изд-во, 1989. – 407 с.
20. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation / [S. Dahiya, B. Singh, S. Gaur et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2007. – Vol. 147, № 3. – P. 938–946.
21. Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India / [B. Singh, S. Dahiya, S. Jain, et al.] // Environmental Geology. – 2008. – Vol. 54, № 2. – P. 249–255.

22. Transient Ground-Water Flow Simulation Using a Fuzzy Set Approach / [C. Dou, W. Woldt, M. Dahab et al.] // *Groundwater*. – 2005. – Vol. 35, № 2. – P. 205–215.
23. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination / [J. Li, G. H. Huang, G. Zeng et al.] // *Journal of Environmental Management*. – 2007. – Vol. 82, № 2. – P. 173–188.
24. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool / [R. C. M. Nobre, O. C. Rotunno Filho, W. J. Mansur et al.] // *Journal of Contaminant Hydrology*. – 2007. – Vol. 97, № 3. – P. 277–292.
25. Dixon B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis / B. Dixon // *Journal of Hydrology*. – 2005. – Vol. 309, № 1. – P. 17–38.
26. Dixon B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool / B. Dixon // *Applied Geography*. – 2005. – Vol. 25, № 4. – P. 327–347.
27. Kondratenko N. Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty / N. Kondratenko, O. Snihur // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 4/4 (82). – P. 20–28.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2017.

Після доробки 17.05.2017.

Кондратенко Н. Р.¹, Снігур О. А.²

¹Канд. техн. наук, доцент, профессор кафедри захисти інформації Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Аспірант кафедри захисти інформації Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

ИНТЕРВАЛЬНЫЙ НЕЧЕТКИЙ КЛАСТЕРНЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ АРТЕЗИАНСКОЙ СКВАЖИНЫ

Актуальность. Мониторинг природных систем различного характера является необходимым условием рационального природопользования. Технологии интеллектуального анализа данных, в частности кластерный анализ, предоставляют широкие возможности для визуализации наборов данных, что позволяет использовать эти технологии людьми, не имеющими специальной математической подготовки. Задача мониторинга системы, состояние которой изменяется во времени, выдвигает требование расширенной интерпретации результатов кластеризации с учетом исторических данных. Технические возможности для выявления характера изменений, происходящих в объекте, представленном набором данных, имеют особое значение в задаче мониторинга водных ресурсов, поскольку они находятся в тесной взаимосвязи с внешней средой, и величина их запасов зависит от многих факторов, внешних по отношению к водоносной системе. После введения в эксплуатацию артезианская скважина нуждается в постоянном наблюдении для правильного управления эксплуатацией подземных вод, защиты их от загрязнения и истощения, а также предупреждения негативных последствий влияния водоотбора на окружающую среду. Кроме того, для сложных природных систем характерна высокая избыточность пространства параметров, а также наличие как известных, так и не выявленных ранее корреляционных связей между параметрами. Эти факторы обуславливают необходимость использования методов кластерного анализа, способных работать в условиях неопределенности и избыточности параметров.

Цель работы – расширение возможностей для анализа изменения состояния системы во времени путем учета неопределенностей, присутствующих в данных наблюдениях.

Метод. Предложено применение метода интервального нечеткого кластерного анализа для исследования изменения характеристик набора данных во времени и выявления общих тенденций. Формализация поставленной технологической задачи в терминах интеллектуального анализа данных предусматривает возможность одновременной работы с множеством входных векторов. Сформулирован пошаговый алгоритм построения интервальной оценки состояния природной системы на основе исторических данных наблюдений и текущих значений.

Результаты. Предложенная модель адаптирована к решению технологической задачи мониторинга артезианской скважины. Экспериментально показаны возможности раннего выявления скрытых закономерностей.

Выводы. Интервальный нечеткий кластерный анализ позволяет учитывать и моделировать неопределенности произвольной природы, возникающих в данных исследований артезианской скважины на разных стадиях мониторинга. Показано, что одновременная подача на вход системы данных нескольких скважин может позволить оценить не только их расположение относительно стандартных компактных классов по (потенциально) качеству воды, но и их взаимное расположение, и в конечном итоге указать на некоторую не обнаруженную ранее закономерность.

Ключевые слова: кластерный анализ, интервальные степени принадлежности, интервальные нечеткие множества, критерии качества кластеризации, визуализация данных.

Kondratenko N. R.¹, Snihur O. O.²

¹PhD, Associate professor, Professor of department of information security, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

²Postgraduate student of department of information security, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

INTERVAL FUZZY CLUSTER ANALYSIS FOR ARTESIAN WELL STATE MONITORING

Context. Monitoring natural systems of diverse nature is an essential condition of rational environmental management. Data Mining technologies, cluster analysis in particular, provide a wide range of capabilities for data sets visualization, which makes it possible for these technologies to be used by individuals with no specialized background in mathematics. The task of monitoring a system that changes its state in time requires extended interpretation of clustering result, which would allow accounting for historical data. Technical capabilities for revealing the nature of changes occurring in the object represented by a data set are of particular importance in water resources monitoring area, as they are strongly related to their environment, and the quantity of the available reserves depend on multiple factors, which are external to the water-bearing system. Upon commissioning, an artesian well requires constant monitoring in order to ensure proper management of groundwater processing, protection against pollution and exhaustion, and preventing negative effects of groundwater mining on the environment. In addition, high redundancy of the parameter space is typical for complex natural systems, as well as existence of both known and not yet discovered correlations between parameters. These factors necessitate the use of cluster analysis methods, which would be capable of operating within the conditions of uncertainty and parameter redundancy.

Objective. The goal of the research is extending the capabilities for analyzing changes in a system's state in time by accounting for uncertainties present in observations data.

Method. An application of the interval fuzzy cluster analysis method for investigating changes in data set characteristics in time, and for revealing general trends, is proposed. Formalizing the technological problem faced by the research in terms of Data Mining provides for a

possibility of simultaneously processing multiple input vectors. A step-by-step algorithm for interval evaluation of the state of a natural system based on historical observations data and current values is developed.

Results. The proposed model is adapted for solving the technological task of an artesian well monitoring, and its capabilities for revealing hidden patterns on early stages are demonstrated experimentally.

Conclusions. Interval fuzzy cluster analysis allows taking into account and modeling uncertainties of any given nature, which may occur in artesian well research data on different stages of monitoring. It is shown, that concurrent input of multiple wells data may allow to evaluate not only their position against the standard compact classes according to (potential) water quality, but also their position against each other, and eventually indicate a previously unknown pattern.

Keywords: cluster analysis, interval membership grades, interval fuzzy sets, clustering validity indices, data visualization.

REFERENCES

1. Dyuk V. A., Samoylenko A. P. Data Mining: uchebnyy kurs. Sankt-Peterburg, Izd. Piter, 2001, 368 p.
2. Petrovska M. A. Okhrona vod (sanitarni normy i pravyla): Navch. Posibnyk. Lviv, Vydavnychiy tsentr Lvivskoho natsionalnoho universytetu imeni Ivana Franka, 2005, 205 p.
3. Subbotin S. A., Oleynik A. A. Vyidelenie nabora informativnykh priznakov na osnove evolyutsionnogo poiska s klasterizatsiyey, *Shtuchniy Intelekt*, 2008, No. 4, pp. 704–711.
4. Cai W., Chen S., Zhang D. Fast and robust fuzzy c-means clustering algorithms incorporating local information for image segmentation, *Pattern Recognition*, 2007, Vol. 40, No. 3, pp. 825–838.
5. Oliveira J. V., Pedrycz W. Advances in Fuzzy Clustering and Its Applications. Sidney, John Wiley & Sons, 2007, 435 p.
6. Kondratenko N. R., Snihur O. O. Intervalna nechitka klasteryzatsiia na osnovi alternatyvnykh kryteriiv yakosti, *Naukovi visti NTUU «KPI»*, 2012, No. 2, pp. 59–66.
7. Martyniuk T. B., Kozhemiako A. V., Kupershtein L. M. Formalization of the Object Classification Algorithm, *Cybernetics and Systems Analysis*, 2015, Vol. 51, No. 5, pp. 751–756.
8. Andres J. De, Lorca P., Juez F. J. D. C. et al. Bankruptcy forecasting: a hybrid approach using fuzzy c-means clustering and multivariate adaptive regression splines (MARS), *Expert Systems with Applications*, 2011, No. 38, pp. 1866–1875.
9. Wang J., Kong J., Lu Y. et al. A modified FCM algorithm for MRI brain image segmentation using both local and non-local spatial constraints, *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 2008, Vol. 32, No. 8, pp. 685–698.
10. Zaychenko Yu. P. Nechetkie modeli i metody v intelektualnykh sistemah. Kiev, «Izdatskiy dom «Slovo»», 2008, 344 p.
11. Zakharchenko S. M., Kondratenko N. R., Manaieva O. O. Vykorystannia henetychnoho alhorytmu v zadachi klasteryzatsii abonentiv internet-provaidera, *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia : I Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia, Vinnytsia, 19–21 travnia 2010 r. : tezy dopovidei*. Vinnytsia, VNTU, 2010, pp. 120–121.
12. Zakharchenko S. M., Kondratenko N. R., Manaieva O. O. Doslidzhennia mozhlyvosti henetychnoho alhorytmu v zadachi klasteryzatsii korystuvachiv merezhi Internet, *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*. Vinnytsia, VNTU, 2010, No. 2 (18), pp. 68–72.
13. Manaieva O. O. Pobudova klasteriv z vykorystanniam henetychnoho alhorytmu, *KHIKh naukovo-tekhnichna konferentsiia profesorsko-vykladatskoho skladu, spivrobitnykiv ta studentiv universytetu z uchastiu pratsivnykiv naukovo-doslidnykh orhanizatsii ta inzhenerno-tekhnichnykh pratsivnykiv pidpriemstv m. Vinnytsi ta oblasti, Vinnytsia, 10–12 bereznia 2010 r. : tezy dopovidei*. Vinnytsia: VNTU, 2010.
14. Kondratenko N. R., Manaieva O. O. Nechitka klasteryzatsiia abonentiv internet-provaidera, *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 2011, No. 2.
15. Kondratenko N. R., Manaieva O. O. Nechitka klasteryzatsiia z urakhuvanniam indeksu virohidnosti v zadachakh sotsialnoho spriamuvannia, *Systemnyi analiz ta informatsiini tekhnologii: materialy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii SAIT 2011*, Kiev, NNK «IPSA» NTUU «KPI», 2011, P. 265.
16. Krishnapuram R., Keller J. M. A Possibilistic Approach to Clustering, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, No. 1 (2), pp. 98–110.
17. Iliev B., Lindquist M., Robertsson L. et al. A fuzzy technique for food- and water quality assessment with an electronic tongue, *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, Vol. 157, No. 9, pp. 1155–1168.
18. Simeonov V., Stratis J. A., Samara C. et al. Assessment of the surface water quality in Northern Greece, *Water Research*, 2003, Vol. 37, No. 17, pp. 4119–4124.
19. Borevskiy B. V., Drobnohod N. I., Yazvin L. S. Otsenka zapasov podzemnykh vod, 2-e izd., pererab. i dop. Kiev, Vyischa shk. Golovnoe izd-vo, 1989, 407 p.
20. Dahiya S., Singh B., Gaur S. et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation, *Journal of Hazardous Materials*, 2007, Vol. 147, No. 3, pp. 938–946.
21. Singh B., Dahiya S., Jain S., et al. Use of fuzzy synthetic evaluation for assessment of groundwater quality for drinking usage: a case study of Southern Haryana, India, *Environmental Geology*, 2008, Vol. 54, No. 2, pp. 249–255.
22. Dou C., Woldt W., Dahab M. et al. Transient Ground-Water Flow Simulation Using a Fuzzy Set Approach, *Groundwater*, 2005, Vol. 35, No. 2, pp. 205–215.
23. Li J., Huang G. H., Zeng G. et al. An integrated fuzzy-stochastic modeling approach for risk assessment of groundwater contamination, *Journal of Environmental Management*, 2007, Vol. 82, No. 2, pp. 173–188.
24. Nobre R. C. M., Rotunno Filho O. C., Mansur W. J. et al. Groundwater vulnerability and risk mapping using GIS, modeling and a fuzzy logic tool, *Journal of Contaminant Hydrology*, 2007, Vol. 97, No. 3, pp. 277–292.
25. Dixon B. Applicability of neuro-fuzzy techniques in predicting ground-water vulnerability: a GIS-based sensitivity analysis, *Journal of Hydrology*, 2005, Vol. 309, No. 1, pp. 17–38.
26. Dixon B. Groundwater vulnerability mapping: A GIS and fuzzy rule based integrated tool, *Applied Geography*, 2005, Vol. 25, No. 4, pp. 327–347.
27. Kondratenko N., Snihur O. Interval Fuzzy Modeling of Complex Systems under Conditions of Input Data Uncertainty, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 4/4 (82), pp. 20–28.

UDC 004.272.26: 004.93

Oliinyk A.¹, Subbotin S.², Lovkin V.³, Blagodariov O.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 Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

⁴postgraduate student of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

⁵PhD., Associate Professor of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

THE SYSTEM OF CRITERIA FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN PATTERN RECOGNITION

Context. The task of automation of feature informativeness estimation process in diagnostics and pattern recognition problems is solved. The object of the research is the process of informative feature selection. The subject of the research are the criteria of feature informativeness estimation.

Objective. The research objective is to develop the system of criteria for feature informativeness estimation which enables to compute informativeness of interdependent feature sets.

Method. The system of criteria for feature informativeness estimation is proposed. The proposed system is based on the idea that feature significance is computed according to spatial location of observations of different classes (size of changing of output parameter). The developed criteria system enables to estimate individual and group feature informativeness in classification and regression problems in situations when initial data samples contain redundant and interdependent features as well as observations with missing values. The proposed criteria don't require to construct models based on the estimated feature combinations, in such a way considerably reducing time and computing costs for informative feature selection. Application of the proposed criteria for estimation and selection of informative features allows to reduce structural complexity of synthesized diagnosis and recognition models, to raise its interpretability and generalization ability due to removing of insignificant, interdependent and redundant features in diagnostics and pattern recognition problems.

Results. The software which implements the proposed system of criteria for feature informativeness estimation and allows to select informative features for synthesis of recognition models based on the given data samples has been developed.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed operability of the proposed system of criteria for feature informativeness estimation and allow to recommend it for processing of data sets for pattern recognition in practice. The prospects for further researches may include the modification of the known feature selection methods and the development of new ones based on the proposed system of criteria for individual and group feature informativeness estimation.

Keywords: data sample, pattern recognition, feature selection, informativeness criterion, individual informativeness, group informativeness.

NOMENCLATURE

$\text{ceil}(A)$ is a function which gives the least integer that is greater than or equal to the given value A ;

M is a number of features in the sample of observations S ;

P is a set of features (attributes) of observations in the given sample;

P^* is a feature set which is estimated;

p_{qm} is a value of the m -th feature (attribute) of the q -th observation ($m = 1, 2, \dots, M$, $q = 1, 2, \dots, Q$);

$\Delta p_m(s_q; s_{q\text{oth}})$ is a quantity which computes distance along axis of feature p_m between an observation s_q and its nearest neighbor observation $s_{q\text{oth}}$ which belongs to the other class;

$\Delta p_m(s_q; s_{q\text{same}})$ is a quantity which computes distance along axis of feature p_m between an observation s_q and its nearest neighbor observation $s_{q\text{same}}$ which belongs to the same class;

$\rho(p_{qos,m}|t_q)$ is a probability of the situation when a feature p_m has value $p_{qos,m}$ on condition that output parameter T has value t_q ;

$\rho(p_m = p_{lm}|t_q)$ is a probability of the situation when a feature p_m has value p_{lm} from the l -th range of its values on condition that output parameter has value t_q ;

$\rho(p_m = p_{lm}|t_{qos})$ is a probability of the situation when a feature p_m has value p_{lm} from the l -th range of its values on condition that output parameter has value t_{qos} ;

Q is a number of observations in the given sample of observations S ;

S is a sample of observations (training sample);

$V(P^*)$ is an informativeness of a feature set P^* ;

$V(p_m)$ is an informativeness of a feature p_m ;

$V(p_{qm})$ is a partial individual informativeness of a feature p_m towards an observation $s_q \in S$;

$V(P^*, s_q)$ is a partial group informativeness of a feature set $P^* \subseteq P$ towards an observation $s_q \in S$.

t_q is a value of output parameter of the q -th observation;

T is a set of output parameter values.

INTRODUCTION

Construction of diagnosis and recognition models is connected with search of the most informative feature

combination, which characterizes researched objects, processes or systems [1–4]. The known feature selection methods [5–7] allow to extract combinations of informative features from initial data samples, removing insignificant and redundant characteristics. It simplifies process of diagnosis and recognition model synthesis and also improves its generalization and approximating abilities.

Feature selection methods generally use prognostication or classification error obtained by the model which was constructed using estimated data set as criterion of feature set informativeness estimation for searching of the most informative feature combination [3, 8–16]. Such approach needs significant computational and time costs of resources, because it is connected with computationally complex procedure of model synthesis which should be performed for every estimated feature set. Besides it feature selection result, which is a combination of features with the largest informativeness, depends on the type of model used for estimation.

Informational criteria (Information Gain, Gini Index, Entropy etc.) [3–6] don't require to perform computationally complex procedure of mathematical model synthesis for estimation of feature set informativeness. However such criteria suppose that features of initial data sample are independent [17, 18]. Therefore it is difficult to use such criteria in practice and it is unsuitable for situations when features in initial samples are interdependent and redundant. The described shortcomings cause actuality of the development of the criteria system for feature informativeness estimation, which is free from these drawbacks.

The research objective is to develop the system of criteria for feature informativeness estimation which enables to compute informativeness of interdependent feature sets.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose we have data sample $S = \langle P, T \rangle$, which consists of Q observations. Every observation is characterized by values of attributes $p_{q1}, p_{q2}, \dots, p_{qM}$ and output parameter t_q . Then the problem of informative feature selection can be ideally [1, 7] stated as searching for the feature combination P^* from the initial data sample $S = \langle P, T \rangle$ with minimum value of the given criterion of

feature set quality estimation: $V(P^*) = \min_{X \in XS} V(Xe)$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

As stated above, different criteria of individual and group feature significance estimation [1–8, 17–20] are known at present.

Pair correlation coefficient [7] is widely used for estimation of individual significance, when investigated feature and output parameter values are continuous. However such a criterion allows to estimate availability and closeness of the connection between two parameters only when it is linear.

Informational criterion [1, 6, 7] and criterion which is based on feature entropy computation use informational

approach for estimation of individual feature significance. Such criteria in contrast to pair correlation coefficient enable to estimate also closeness of nonlinear connection between features [6, 7]. However information theory is based on the assumption that system state probability values are known. For practical tasks solving, probabilities should be evaluated based on statistical data and are stochastic quantities. Therefore evaluated values can be considered as accurate only for input data samples $S = \langle P, T \rangle$ of infinitely large size [6, 7].

It is significant that criteria based on the informative approach suppose that features of the sample $S = \langle P, T \rangle$ are independent. That is why such criteria are hardly applied for solution of practical tasks, where training samples contain interdependent features [1, 6, 7].

In the papers [17, 18] it was proposed to compute feature significance based on the Relief method, which allows to estimate informativeness of interdependent features based on geometrical location of features in the sample $S = \langle P, T \rangle$. But such criteria allowed to estimate only individual significance of features and could not be used for estimation of feature set informativeness.

Criteria based on the informative approach (information-theoretical criterion, feature set entropy etc.) are applicable for evaluation of group feature informativeness [1, 7, 8]. However such criteria have the same disadvantages as criteria which are applied for individual informativeness estimation. Furthermore possibility of usage of such criteria is based on the assumption that patterns which define classes of the sample $S = \langle P, T \rangle$ are normally distributed.

Errors of models, which are synthesized using estimated feature set $P^* \subseteq P$, are often used for estimation of group informativeness in solving of feature selection problem. Such approach is characterized by significant computational and time costs of resources during feature selection. It is caused by high computational complexity of model synthesis procedure which should be performed for every estimated feature set $P^* \subseteq P$ and makes it difficult to use the known feature selection methods in practice [1, 7, 9].

Thus disadvantages of the known criteria of individual and group significance estimation cause actuality of the development of criteria system for feature informativeness estimation which should be free from the discovered drawbacks.

The described shortcomings cause actuality of the development of the criteria system for feature informativeness estimation, which is free from these drawbacks.

3 MATERIALS AND METHODS

As mentioned above, it is difficult to use informational criteria [1, 5, 7, 8] in practice for estimation of individual and group feature informativeness because such criteria suppose mutual independence of features of initial data sample. At the same time practicable data samples as a rule contain interdependent features and if such features are used for synthesis of diagnosis or recognition model, then model approximating and generalization properties and its

interpretability are getting worse and model structural complexity is increasing. Moreover possibility of usage of such criteria in practice is based on the assumption that patterns, which form classes of the sample $S = \langle P, T \rangle$, are normally distributed. In the developed criteria system it is proposed to estimate feature informativeness according to spatial location of observations of different classes (size of changing of output parameter). In contrast to criteria proposed in the papers [17, 18] and allowing to estimate individual feature informativeness for classification problem, the developed criteria system enables to estimate also group feature informativeness for classification and regression problems.

Let's define conceptions of individual and group informativeness.

Definition 1. Individual informativeness $V(p_m)$ of a feature p_m is a quantity which characterizes correlation between feature p_m and output parameter T .

Definition 2. Group informativeness $V(P^*)$ of a feature set $P^* \subseteq P$ is a quantity which characterizes correlation between feature set P^* and output parameter T .

Definition 3. Partial individual informativeness $V(p_{qm})$ of a feature p_m towards observation $s_q \in S$ is a quantity which characterizes quality of class separation (or quality of interval separation of output parameter T for discrete values of output parameter T) for observations which are the nearest to s_q along the axis of feature p_m .

Definition 4. Partial group informativeness $V(P^*, s_q)$ of a feature set $P^* \subseteq P$ towards observation $s_q \in S$ is a quantity which characterizes quality of class separation (or quality of interval separation of output parameter T for discrete values of output parameter T) for observations which are the nearest to s_q in feature space P^* .

For estimation of individual and group informativeness the following characteristics of training sample $S = \langle P, T \rangle$ should be taken into account: output parameter value type (discrete with the given number of values, for example, in the task of two-class or multiclass recognition; real values of output parameter), presence of missed values (incomplete or undefined data) in data sample.

Criterion $V(p_m)$ should be implemented for estimation of individual informativeness of features p_m in two-class recognition tasks. It is computed in the following way. At the beginning observations set $S' \subset S$ ($|S'| < |S|$) is randomly selected from the given data sample $S = \langle P, T \rangle$. Then partial individual informativeness $V(p_{qm})$ is calculated for each observation s_q from the set S' and for each feature p_m using expression (1):

$$V(p_{qm}) = \Delta p_m(s_q; s_{qoth}) - \Delta p_m(s_q; s_{qsame}), \quad (1)$$

where values of quantities $\Delta p_m(s_q; s_{qoth})$ and $\Delta p_m(s_q; s_{qsame})$ are calculated using expressions (2) and (3) accordingly:

$$\Delta p_m(s_q; s_{qoth}) = |p_{qm} - p_{qmoth}|, \quad (2)$$

$$\Delta p_m(s_q; s_{qsame}) = |p_{qm} - p_{qmsame}|. \quad (3)$$

Characteristics p_{qmoth} and p_{qmsame} represent values of the m -th feature for observations which are the nearest to s_q and belong to the other or the same class

correspondingly: $s_{qoth} = \min_{t_q \neq t_{qoth}} |p_{qm} - p_{qmoth}|$,

$s_{qsame} = \min_{t_q = t_{qsame}} |p_{qm} - p_{qmoth}|$. At that normalized values

of features p_{qm} are used for computation of values of quantities $\Delta p_m(s_q; s_{qoth})$ and $\Delta p_m(s_q; s_{qsame})$, allowing to reduce values of estimations $V(p_{qm})$ and $V(p_m)$ to the range $[-1; 1]$ which is easily interpretable.

Usage of formulas (1)–(3) for estimation of partial individual informativeness $V(p_{qm})$ is based on the assumption that greater values of feature informativeness correspond to situations with better sample division into classes. Hence the farther observation s_q of class t_q is situated on the feature axis p_m

from the nearest observation $s_{qoth} = \min_{t_q \neq t_{qoth}} |p_{qm} - p_{qmoth}|$ of

the other class $t_{qoth} \neq t_q$, the greater is partial individual informativeness $V(p_{qm})$. Analogously, the farther observation s_q is situated on the feature axis p_m from the nearest observation

$s_{qsame} = \min_{t_q = t_{qsame}} |p_{qm} - p_{qmoth}|$ of the same class $t_{qsame} = t_q$, the lower is partial individual informativeness $V(p_{qm})$.

After partial individual informativeness $V(p_{qm})$ is estimated, individual informativeness values $V(p_m)$ are calculated for each feature p_m of each observation $s_q \in S' \subset S$ using expression (4):

$$V(p_m) = \frac{1}{|S'|} \sum_{s_q \in S'} V(p_{qm}). \quad (4)$$

Thus features with high values ($V(p_m) \rightarrow 1$) of individual informativeness $V(p_m)$ are considered as significant and informative towards output parameter T , and features with low values ($V(p_m) \rightarrow -1$) are considered as insignificant.

If input data sample $S = \langle P, T \rangle$ contains information about observations s_q , which have missed values of some features p_{qm} , then three approaches could be used.

Under the first approach observations with missed values of feature p_{qm} are not considered in computation of estimations of feature informativeness $V(p_m)$. This approach has simple realization. However information presented in training samples is lost under it. Besides it some data samples $S = \langle P, T \rangle$ (for example, in medical diagnostic tasks, where some measured characteristics can be missed for the majority of patients) can contain vast majority of observations s_q for which values of some features were not measured because of absence of necessity (for example, parameters which characterize some specific illness) or because of difficulties (for example, measurement of some technical diagnostics object parameters needs special methods of destructive quality evaluation which result in changing of the measured product state to «out-of-specification»). Usage of the first approach, where observations s_q with missed values are not considered, in such situations can give inadequate estimations of feature informativeness and as consequence incorrect results of feature selection procedure.

Under the second approach if there are observations s_q with missed values in the sample $S = \langle P, T \rangle$, then quantities $\Delta p_m(s_q; s_{q\text{oth}})$ and $\Delta p_m(s_q; s_{q\text{same}})$, which are used for evaluation of partial individual informativeness estimations $V(p_{qm})$, should be calculated using formula (5):

$$\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}}) = 1 - \frac{1}{N_{\text{int}}(p_m)}. \quad (5)$$

At that $s_{q\text{os}}$ is the nearest observation to observation s_q with the other or the same output parameter value. Formula (5) is used instead of formulas (2) and/or (3) in situations when value p_{qm} of feature p_m isn't defined for one observation from observations s_q , $s_{q\text{oth}}$, $s_{q\text{same}}$. $N_{\text{int}}(p_m)$ is a number of different values (if feature p_m has the given limited number of discrete values) or number of intervals into which feature spread was divided (if feature p_m has real values from the given range).

Under the third approach quantity $\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}})$ is measured using estimated probability that observations s_q and $s_{q\text{os}}$ ($s_{q\text{oth}}$ or $s_{q\text{same}}$) have different values for the given feature p_m instead of using formula (5):

– if one observation (for example, s_q) has undefined value p_{qm} , then estimation $\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}})$ is calculated using expression (6):

$$\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}}) = 1 - \rho(p_{q\text{os},m} | t_q), \quad (6)$$

where probability $\rho(p_{q\text{os},m} | t_q)$ is calculated based on the sample data $S = \langle P, T \rangle$ using formula (7):

$$\rho(p_{q\text{os},m} | t_q) = \frac{N(s \in S : (p_m = p_{q\text{os},m}) \cap (T = t_q))}{N(t_q)}, \quad (7)$$

where $N(s \in S : (p_m = p_{q\text{os},m}) \cap (T = t_q))$ is a number of observations in data sample $S = \langle P, T \rangle$ with value of feature p_m equal to $p_{q\text{os},m}$ and with value of output parameter T equal to t_q ; $N(t_q)$ is a number of observations in data sample S with value of output parameter T equal to t_q ;

– if both observations s_q and $s_{q\text{os}}$ have undefined value of feature p_m , then estimation $\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}})$ is calculated using expression (8):

$$\Delta p_m(s_q; s_{q\text{os}}) = 1 - \sum_{l=1}^{N_{\text{int}}(p_m)} \rho(p_m = p_{lm} | t_q) \cdot \rho(p_m = p_{lm} | t_{q\text{os}}). \quad (8)$$

Formulas (6)–(8) take into account density of distribution of feature values p_m among observations of sample $S = \langle P, T \rangle$ and allow to take into account estimated probability that features p_m have the given values p_{lm} for feature informativeness estimation $V(p_m)$.

If it is necessary to select informative features for multiclass recognition tasks (output parameter T can have different values t_q from the set T' , $|T'| > 2$), then feature informativeness estimations $V(p_m)$ can be calculated using formulas (1)–(8). At that observation $s_{q\text{oth}}$ is selected as observation with minimal distance from observation s_q along axis of the estimated feature p_m and with the other class value T : $s_{q\text{oth}} = \min_{t_q \neq t_{q\text{oth}}} |p_{qm} - p_{q\text{moth}}|$.

Also for multiclass recognition tasks ($|T'| > 2$) average distance from the set S'_q to the nearest observations belonging to every possible class $t_l \in T'$, $t_l \neq t_q$ should be used instead of distance to observation which is the nearest to the observation s_q and has the opposite value of class T . In that case partial individual informativeness $V(p_{qm})$ of feature p_m should be estimated based on the expression (9), which is average distance between observation s_q and its nearest neighbor observations with the opposite classes, weighted by class frequency of the sample $S = \langle P, T \rangle$:

$$\Delta p_m(s_q; S'_q) = \sum_{\substack{l=1 \\ t_l \neq t_q}}^{|T'|} \rho(t_l) \cdot \Delta p_m(s_q; s_l). \quad (9)$$

In the expression (9) quantity $\Delta p_m(s_q; s_l)$ determines distance along axis of feature p_m between observation s_q and its nearest neighbor observation $s_l \in S'_q$ with output parameter value $t_l \in T', t_l \neq t_q$, $\rho(t_l)$ is a probability that observations of sample $S = \langle P, T \rangle$ are characterized by class t_l (is estimated as ratio of number of sample observations $N(t_l)$ with class to overall number of observations in sample).

Then partial individual informativeness of feature can be calculated using formula (10):

$$V(p_{qm}) = \Delta p_m(s_q; S'_q) - \Delta p_m(s_q; s_{qsame}), \quad (10)$$

and individual informativeness $V(p_{qm})$ of feature p_m is calculated using formula (4).

It is proposed to use criterion $V(P^*)$ for estimation of group informativeness of feature set $P^* \subseteq P$ based on data sample $S = \langle P, T \rangle$. This criterion is computed in the following way. At the beginning observation set $S' \subset S$ ($|S'| < |S|$) is randomly selected from the given data sample $S = \langle P, T \rangle$ to reduce number of computing operations. After that partial group informativeness $V(P^*, s_q)$ for the estimated feature set $P^* \subseteq P$ is calculated for each observation $s_q \in S'$ using formula (11):

$$V(P^*, s_q) = \Delta P^*(s_q; s_{qoth}) - \Delta P^*(s_q; s_{qsame}), \quad (11)$$

where quantities $\Delta P^*(s_q; s_{qoth})$ and $\Delta P^*(s_q; s_{qsame})$ determine distance in feature space P^* between observation s_q and observations s_{qoth} and s_{qsame} which are the nearest to s_q and have the other and the same class values correspondingly. Distances $\Delta P^*(s_q; s_{qos})$ between observations s_q and s_{qos} (s_{qoth} or s_{qsame}) can be computed using formulas (12)–(14) which are metrics for evaluation of Euclidean, Hamming and Minkowski distances correspondingly [1, 6, 7] (at that ω is a parameter which is set by user):

$$\Delta P^*(s_q; s_{qos}) = \sqrt{\sum_{p_m \in P^*} (p_{qm} - p_{qos,m})^2}, \quad (12)$$

$$\Delta P^*(s_q; s_{qos}) = \sum_{p_m \in P^*} |p_{qm} - p_{qos,m}|, \quad (13)$$

$$\Delta P^*(s_q; s_{qos}) = \sqrt[\omega]{\sum_{p_m \in P^*} |p_{qm} - p_{qos,m}|^\omega}. \quad (14)$$

Normalized values of features p_{qm} are used for evaluation of quantities $\Delta P^*(s_q; s_{qos})$. Group informativeness $V(P^*)$ of feature set $P^* \subseteq P$ is calculated as average value of sum of partial informativenesses $V(P^*, s_q)$: $V(P^*) = \frac{1}{|S'|} \sum_{s_q \in S'} V(P^*, s_q)$. If some observations

s_q have missed values of features p_{qm} , then quantities $\Delta P^*(s_q; s_{qos})$ can be estimated by analogy with expressions (5)–(8) used for individual feature informativeness estimation.

It is proposed to use expressions presented above for estimation of individual $V(p_m)$ and group feature informativeness $V(P^*)$ in selection of informative features for regression problems (output parameter T can have different values t_q from spread $|T'| \in [t_{\min}; t_{\max}]$). At that initial spread $|T'| \in [t_{\min}; t_{\max}]$ of output parameter T should be divided into $N_{\text{int}}(T)$ intervals. Then estimations $V(p_m)$ or $V(P^*)$ should be evaluated using formulas (1)–(14).

It is important to consider how to choose number $N_{\text{int}}(T)$ of intervals into which initial spread $|T'| \in [t_{\min}; t_{\max}]$ of output parameter T should be divided. If expert set acceptable level of precision ε_n for applied problem with numerical data determined as sample $S = \langle P, T \rangle$, then interval number $N_{\text{int}}(T)$ can be evaluated using formula (15):

$$N_{\text{int}}(T) = \text{ceil}\left(\frac{1}{2\varepsilon_n}\right). \quad (15)$$

This formula allows to divide spread of output parameter T in such a way, that normalized width of every interval ΔT shouldn't exceed quantity ε_n : $\Delta T \leq \varepsilon_n$. At that value of output parameter t_q of estimated observation s_q is mapped onto interval $\Delta t_l: t_q \in [\Delta t_{l\min}; \Delta t_{l\max}]$ for diagnosis and recognition models construction and also for feature informativeness estimation.

Thus the developed criteria system for feature informativeness estimation proposes to evaluate feature significance according to spatial location of observations of different classes (size of changing of output parameter). The proposed criteria system enables to estimate individual

and group feature informativeness for classification and regression problems in situations when initial data samples contain redundant and interdependent features as well as observations with missing values. The proposed criteria don't require to construct models based on the estimated feature combinations, in such a way considerably reducing time and computing costs for informative feature selection. Application of the proposed criteria for estimation and selection of informative features allows to reduce structural complexity of synthesized diagnosis and recognition models, to raise its interpretability and generalization ability due to removing of insignificant, interdependent and redundant features for diagnostics and pattern recognition problems.

4 EXPERIMENTS

The proposed system of feature informativeness estimation for pattern recognition was integrated into the diagnosis model synthesis software system as corresponding module [21]. This module is implemented for informative feature selection in data sample reduction stage.

Numerical experiments for solving of informative feature selection problem for vehicle recognition [22] were held for investigation of efficiency of the proposed estimation criteria system application in practice.

Every vehicle was presented by images which were gotten from highway video cameras. Every image was in color mode of shades of gray. Whole training sample contained 10,000 images. Image areas where vehicle was situated were identified by recognition system. Areas which were obtained for every image in such a way were displayed into a matrix of 128x128. Object graphic information was encoded using 26 characteristics. Besides that for formation of training sample image data were classified by experts in 6 classes:

- state «not recognized» (class 0);
- motorcyclist image (class 1);
- passenger car image (class 2);
- truck image (class 3);
- bus image (class 4);
- image of minibus or minivan (class 5).

Software system of diagnosis model synthesis should perform synthesis of set which consists of 5 models to recognize vehicles of the given classes. Every model should recognize vehicles of corresponding type. For each model training sample was formed. Every training sample contains 10,000 observations which have values of 26 features and 1 output parameter (does observation belong to the considered class or no?).

It was necessary to estimate group informativeness of training sample feature subsets at the beginning of application of the considered mechanism of diagnosis model synthesis in data reduction process. Feature informativeness estimation criteria system proposed in the paper was applied for this purpose. Hamming distance was used for calculation of group informativeness. After that it was necessary to select subset of training sample features which were used by software system for recognition.

Feature selection stage for the other considered methods (Principal Component Analysis, Group Method of Data Handling, Canonical Method of Evolutionary Search, Method of alternately Adding and Removing of Features,

Multiagent Methods with Indirect and Direct Connection between Agents) was realized according to its special mechanism. Maximum power of feature sets obtained by these methods was limited to 12.

By application of the developed mathematical support and software the tasks of informative feature selection and diagnosis model synthesis were sequentially solved.

Recognition was realized using neural network of direct propagation which contains 3 neurons on the first layer and 1 neuron on the second layer, uses logistic sigmoid activation function of neuroelements and weighted sums as discriminant functions.

Numerical study of the developed software system application based on the proposed estimation criteria system and the traditional feature selection methods was held. For comparison of the study results the following comparison criteria set was developed:

- number k of features which were selected as informative and are in sample after reduction;
- recognition error E , which is computed as ratio of incorrectly recognized observations to the total number of observations in sample;
- operating time T_c which is needed by method to achieve an acceptable solution.

At that the first criterion is a relevant estimation for each specific version of informative feature selection problem (for example, when only passenger cars are recognized). When recognition results are averaged for several classes (for example, vehicles of several types), value of this criterion should be stricken off the results.

In recognition tasks it is important not only to evaluate overall recognition error level E , but also to evaluate recognition error levels for observations of corresponding class. So if there are two classes: 1 – observations belonging to images of passenger cars, and 2 – correspondingly observations which don't belong to images of passenger cars, then after recognition the following subsets can be formed: C_{11} which consists of observations belonging to the first class and recognized as belonging to the same class, C_{12} which consists of observations belonging to the first class and recognized as belonging to the second class, C_{21} which consists of observations belonging to the second class and recognized as belonging to the first class, C_{22} which consists of observations belonging to the second class and recognized as belonging to the same class. Then recognition error for observations of the first class E_1 and the second class E_2 can be calculated as following:

$$E_1 = \frac{|C_{12}|}{|C_{11}| + |C_{12}|}, \quad (16)$$

$$E_2 = \frac{|C_{21}|}{|C_{21}| + |C_{22}|}. \quad (17)$$

Probabilistic optimization realization of the majority of the researched methods causes necessity of results averaging, therefore search was realized 100 times during numerical research, and then averaged values of comparison criteria were calculated.

5 RESULTS

Table 1 presents computed values of comparison criteria for the proposed and known informative feature selection methods in vehicle recognition task. The results represent recognition of vehicles of passenger cars class.

Distribution of recognition error, depending on the number of features (feature subset dimensionality) selected for recognition, is presented in the Figure 1.

Estimations of group informativeness of subsets with corresponding numbers of features for the class of passenger cars are presented in the Figure 2.

Estimations of group informativeness of feature subsets, selected for recognition by the methods listed in the table 1, are presented in the Figure 3.

Distribution of recognition error over the classes defined by formulas (16) and (17) for passenger cars is presented in the Figure 4.

The recognition results obtained for application of all investigated methods for recognition of all types of vehicles are presented in the Figure 5.

Averaged comparison criteria values computed for the proposed (CSFIEFS) and the known informative feature selection methods in recognition of all vehicle classes are presented in the Table 2.

Table 1 – The results of application of informative feature selection methods for passenger cars recognition

№	Feature selection method	Values of comparison criteria		
		E	T_c	K
1	Principal Component Analysis (PCA)	0.0412	524	12
2	Group Method of Data Handling (GMDH)	0.0358	18578	11
3	Canonical Method of Evolutionary Search (CMES)	0.0219	23171	10
4	Method of alternately Adding and Removing of Features (MARF)	0.0471	2199	12
5	Multiagent Method with Indirect Connection between Agents (MMICA) (Ant Colony Optimization for Feature Selection)	0.0198	10318	10
6	Multiagent Method with Direct Connection between Agents (MMDCA) (Bee Colony Optimization for Feature Selection)	0.0191	10192	11
7	Criteria System of Features Informativeness Estimation for Feature Selection (CSFIEFS)	0.0172	712	10

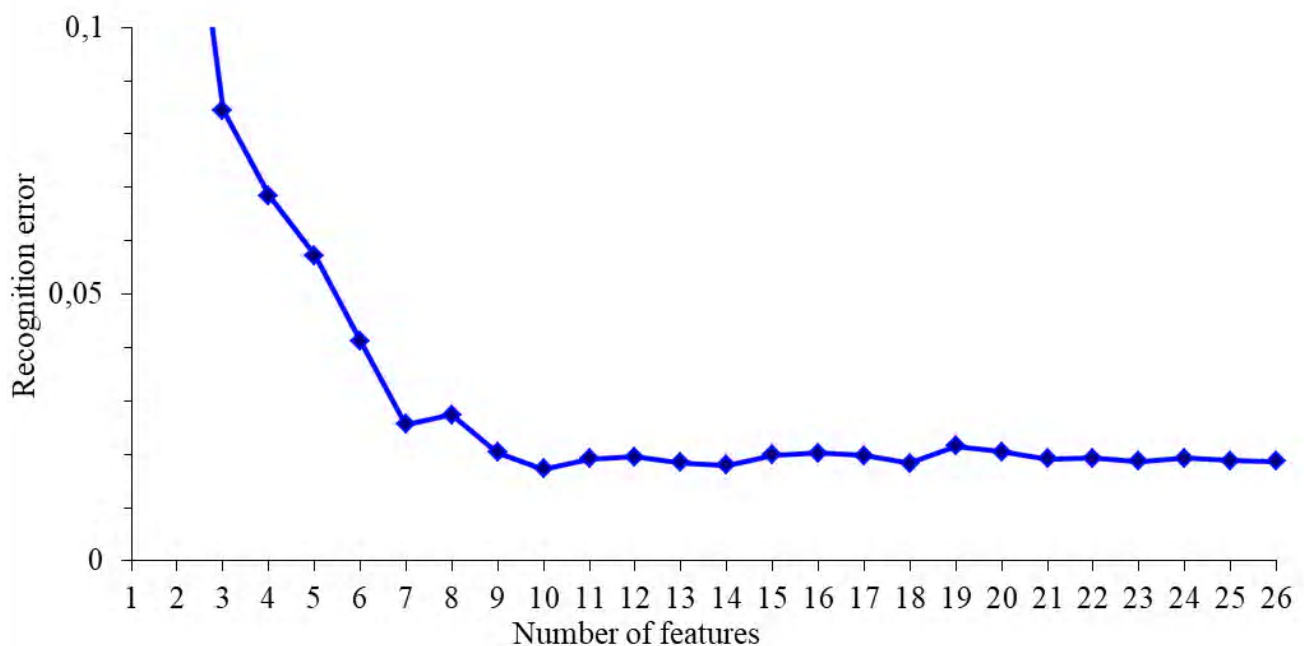


Figure 1 – Graph of dependence between recognition error and feature number

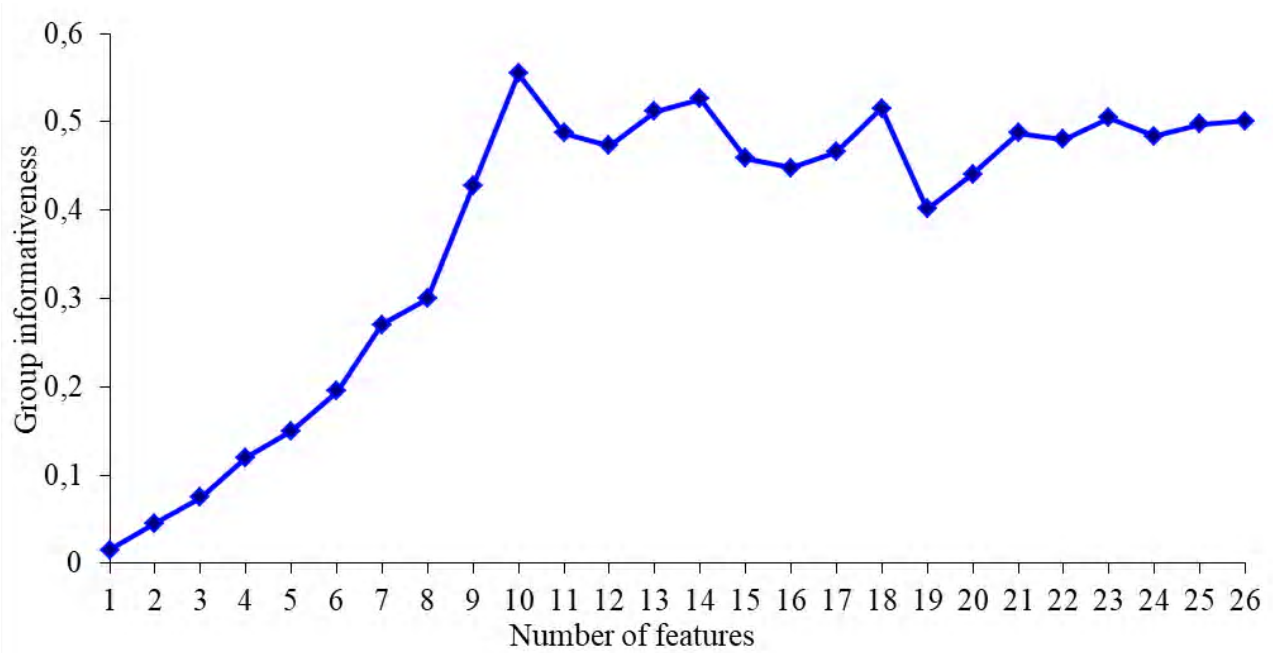


Figure 2 – Graph of dependence between group informativeness of feature subset and feature number

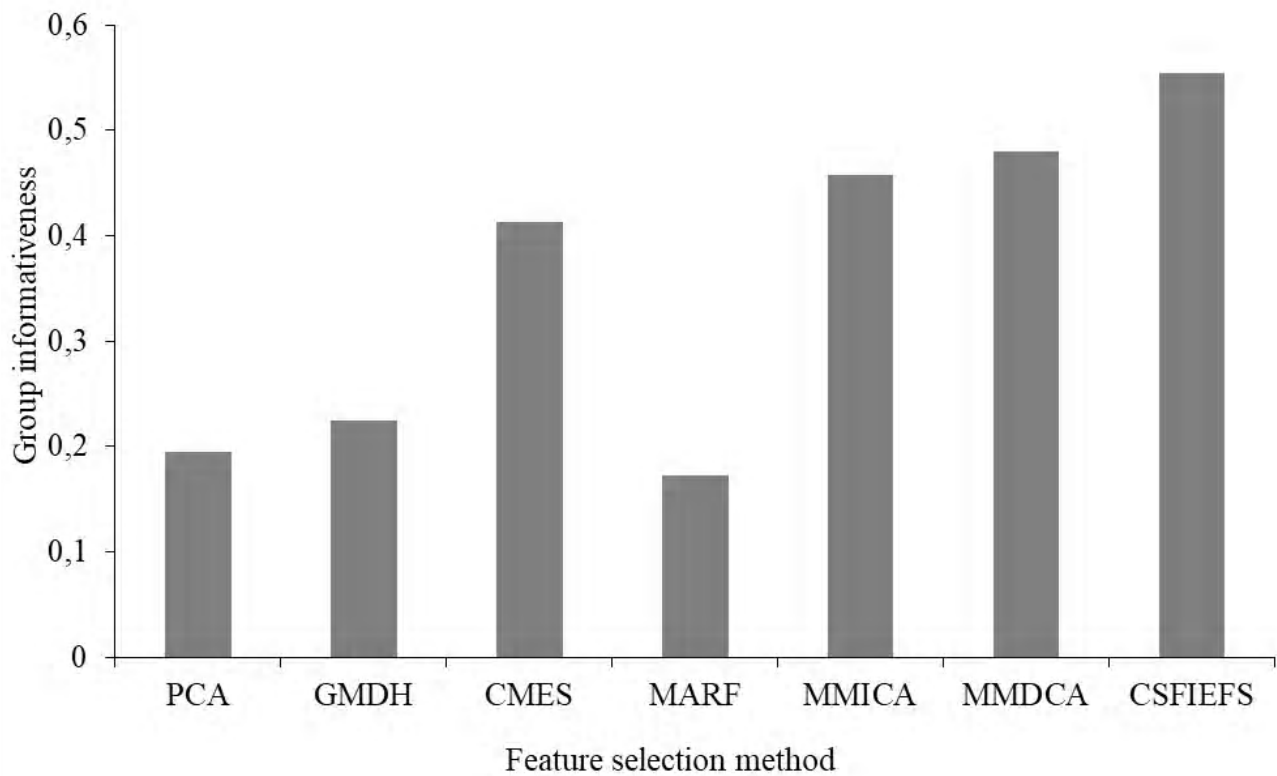


Figure 3 – Diagram of group informativeness of the selected feature subsets

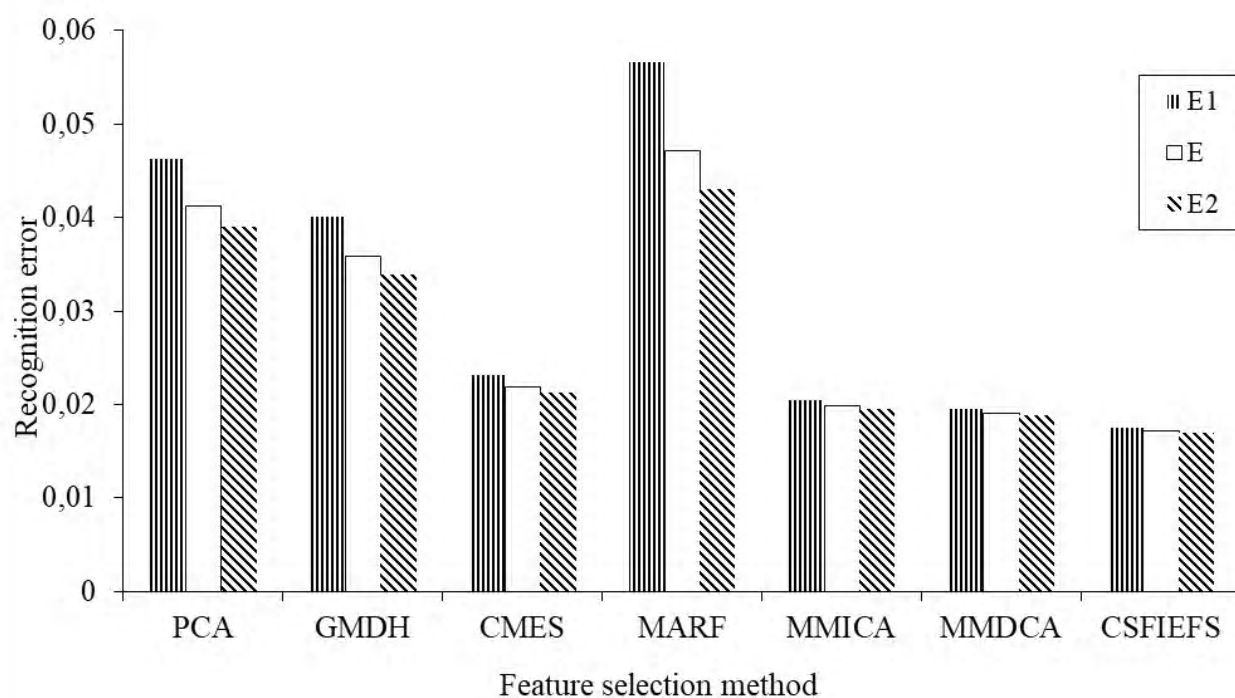


Figure 4 – Diagram of passenger cars recognition error distribution

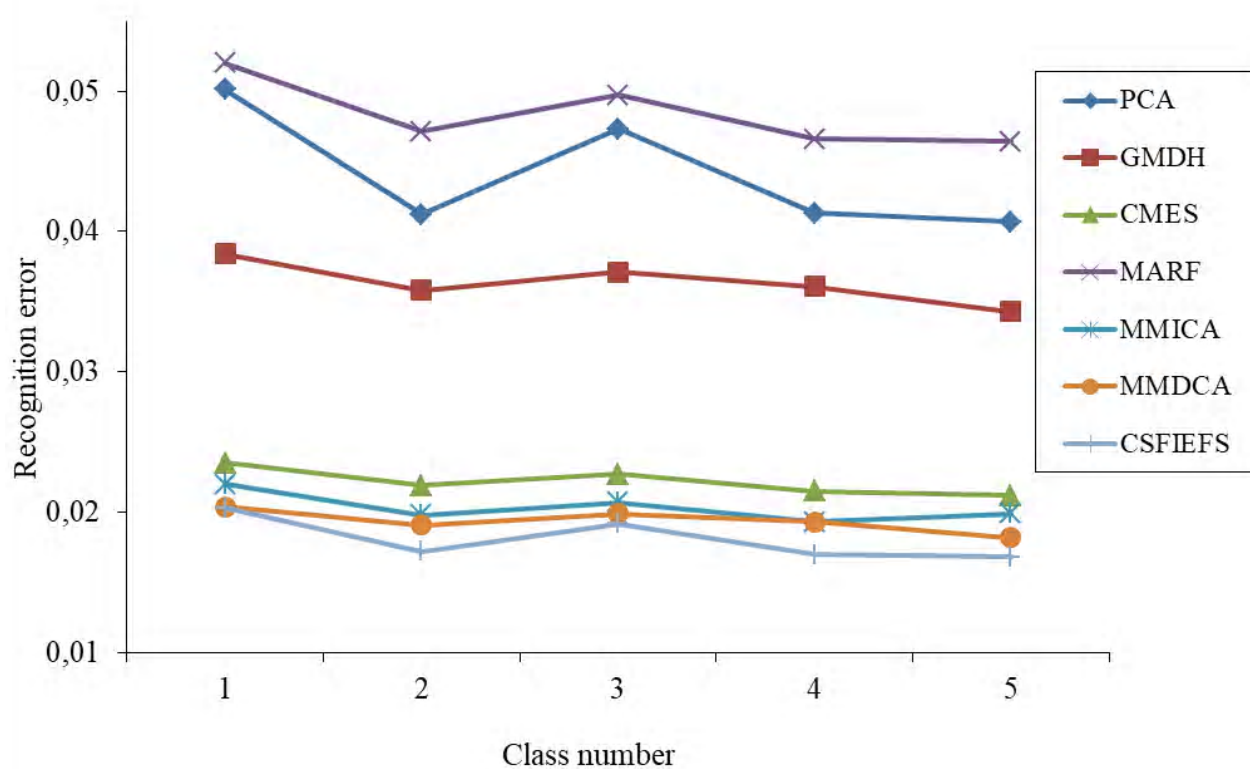


Figure 5 – Graph of dependence between recognition error obtained by the investigated feature selection methods and class number

Table 2 – The results of application of informative feature selection methods for vehicle recognition

№	Feature selection method	Values of comparison criteria	
		E	T_c
1	PCA	0.0441	618
2	GMDH	0.0363	18306
3	CMES	0.0222	23415
4	MARF	0.0484	2262
5	MMICA	0.0203	10549
6	MMDCA	0.0194	10337
7	CSFIEFS	0.0181	799

6 DISCUSSION

Comparison results, presented in the Tables 1 and 2, show that the lowest recognition error value of 0.0181 on average for all vehicles was obtained by the proposed method. Diagram, presented in the Figure 4, also shows acceptable recognition error level when it is divided into two components which correspond to every output feature value (0.0176 and 0.017).

At that PCA (618 sec) and MARF (2262 sec) operated considerably quicker (by a factor of 4.5 and more) than other traditional researched methods, however, its recognition error was the largest too. The proposed method showed speed (799 sec) comparable with these methods. It is caused by the fact that it didn't require model synthesis using data sample which is sufficiently computationally complex and long process. It allows to use the proposed feature informativeness estimation criteria system specifically under conditions of limited time and resources and also when feature selection is separated to the individual stage of decision making and its operating time gets additionally importance.

As shown in Table 1, the lowest number of features (10) for passenger cars recognition was selected by CMES, MMICA and CSFIEFS proposed in the paper. Every method reduced the sample by 61.5 %.

But at the same time as shown in Table 1 (recognition errors of 0.0219, 0.0198 and 0.0172), each method selected different informative feature subsets from the overall set, though these subsets had the same power. Data, represented in the Figure 3, show that estimated group informativeness of feature subsets selected by each method allowed to get estimation which correlates with recognition error. So it can be stated that criteria system proposed in the paper is informative and can be used for decision making.

CSFIEFS allowed to get the lowest recognition error (0.0172) among all feature subsets which were proposed by the researched methods and consist of 10 elements. It corresponds to effective feature set selection and to effective recognition problem solution.

Dependence, presented in the Figure 1, is made from feature subsets of different power. Every subset allowed to get the lowest recognition error among all subsets of the same power. This dependence shows that the most optimal solution is a subset which consists of 10 elements.

Graph, presented in the Figure 2, shows dependence between group informativeness and size of sets which were defined in a way described for the previous dependence. At that this graph shows that the proposed informativeness

criteria allow to estimate subsets in a way relevant to recognition error.

Thus the proposed criteria system for feature informativeness estimation in pattern recognition allows to efficiently solve the problem of informative feature selection, leading to effective solution of the pattern recognition task. At that in comparison with traditional informative feature selection approaches based on the error criteria this process has quicker realization, lower recourse requirements and provides the lowest recognition error.

CONCLUSIONS

In this paper the actual task of automation of feature informativeness estimation process in diagnostics and pattern recognition problems was solved.

Scientific novelty of the paper is in the proposed criteria system of feature informativeness estimation. The proposed criteria system is based on the idea that feature significance is computed according to the spatial location of observations of different classes (size of changing of output parameter). The developed criteria system enables to estimate individual and group feature informativeness in classification and regression problems in situations when input data samples contain redundant and interdependent features as well as observations with missing values. The proposed criteria don't require to construct models based on the estimated feature combinations, in such a way considerably reducing time and computing costs for informative feature selection. Application of the proposed criteria for estimation and selection of informative features allows to reduce structural complexity of synthesized diagnosis and recognition models, to raise its interpretability and generalization ability due to removing of insignificant, interdependent and redundant features for diagnostics and pattern recognition problems.

Practical significance of the paper consists in the solution of practical problems of pattern recognition. Experimental results showed that the proposed criteria system allowed to estimate individual and group informativeness of features and it could be used in practice for solving of practical tasks of diagnostics and pattern recognition.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed as part of the research work "Methods and means of decision-making for data processing in intellectual recognition systems" (number of state registration 0117U003920) of software tools department of Zaporizhzhia National Technical University.

REFERENCES

1. Jensen R. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches / R. Jensen, Q. Shen. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. – 339 p. DOI: 10.1002/9780470377888.
2. Mulaik S. A. Foundations of Factor Analysis / S. A. Mulaik. – Boca Raton, Florida: CRC Press. – 2009. – 548 p.
3. Lee J. A. Nonlinear dimensionality reduction / J. A. Lee, M. Verleysen. – New York : Springer, 2007. – 308 p. DOI: 10.1007/978-0-387-39351-3.
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. Hyvarinen A. Independent component analysis / A. Hyvarinen, J. Karhunen, E. Oja. – New York : John Wiley & Sons, 2001. – 481 p. DOI: 10.1002/0471221317.

6. Федотов Н. Г. Теория признаков распознавания образов на основе стохастической геометрии и функционального анализа / Н. Г. Федотов. – М. : Физматлит, 2010. – 304 с.
7. Guyon I. An introduction to variable and feature selection / I. Guyon, A. Elisseeff // *Journal of machine learning research*. – 2003. – № 3. – P. 1157–1182.
8. McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition / G. McLachlan. – New Jersey : John Wiley & Sons. – 2004. – 526 p. DOI: 10.1002/0471725293.
9. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition / [A. A. Oliynyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, O. Blagodariyov] // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2017. – № 2. – С. 82–92.
10. Oliynyk A. Production rules extraction based on negative selection / A. Oliynyk // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 1. – С. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
11. Oliynyk A. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing / [A. Oliynyk, S. Skrupsky, S. Subbotin et al] // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 4. – С. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
12. The model for estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations / [A. A. Oliynyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, S. A. Subbotin] // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2017. – № 1. – С. 142–152. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-16.
13. 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.
14. Shitikova O. V. Method of Managing Uncertainty in Resource-Limited Settings / O. V. Shitikova, G. V. Tabunshchik // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2015. – № 2. – P. 87–95. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-2-11.
15. Tabunshchik G. V. Verification model of systems with limited resources / G. V. Tabunshchik, T. I. Kaplienko, O. V. Shitikova // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2017. – № 4.
16. Bodyanskiy Ye. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynukurova // *Information Sciences*. – 2013. – Vol. 220. – P. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
17. Kononenko I. Estimating Attributes: Analysis And Extensions Of Relief / I. Kononenko // *Machine Learning : European Conference on Machine Learning ECML-94, Catania, 6–8 April 1994 : proceedings of the conference*. – Berlin : Springer, 1994. – P. 171–182. DOI: 10.1007/3-540-57868-4_57.
18. Kira K. A practical approach to feature selection / K. Kira, L. Rendell // *Machine Learning : International Conference on Machine Learning ML92, Aberdeen, 1–3 July 1992 : proceedings of the conference*. – New York: Morgan Kaufmann, 1992. – P. 249–256. DOI: 10.1016/B978-1-55860-247-2.50037-1.
19. 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.
20. 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.
21. Oliynyk A. A. Information Technology of Diagnosis Model Synthesis Based on Parallel Computing / [A. A. Oliynyk, S. A. Subbotin, S. Yu. Skrupsky et al] // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2017. – № 3. – С. 139–151.
22. Субботін С. О. Нейтеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
Article was submitted 27.10.2017.
After revision 15.11.2017.

Олійник А. О.¹, Субботін С. О.², Льовкін В. М.³, Благодарьов О. Ю.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 програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

⁴Аспірант кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

⁵Канд.техн.наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

СИСТЕМА КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ОЗНАК ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

Актуальність. Вирішено задачу автоматизації процесу оцінювання інформативності ознак при розв'язанні завдань діагностування та розпізнавання образів. Об'єкт дослідження – процес відбору інформативних ознак. Предмет дослідження – критерії оцінювання інформативності ознак.

Мета роботи полягає в створенні системи критеріїв оцінювання інформативності ознак, що дозволяє обчислювати інформативність наборів взаємозалежних ознак.

Метод. Запропоновано систему критеріїв оцінювання інформативності ознак. Запропонована система передбачає визначення значущості ознак виходячи з просторового розташування екземплярів різних класів (діапазонів зміни значень вихідного параметра). Розроблена система критеріїв дозволяє оцінювати індивідуальну і групову інформативність ознак при вирішенні задач класифікації і регресії в умовах, коли вихідні вибірки даних містять надлишкові і взаємозалежні ознаки, а також екземпляри з пропущеними значеннями. Запропоновані критерії не вимагають побудови моделей на основі оцінюваних комбінацій ознак, що істотно знижує часові і обчислювальні витрати в процесі відбору ознак. Використання запропонованих критеріїв для оцінювання та відбору інформативних ознак дозволяє при вирішенні завдань діагностування та розпізнавання образів знижувати структурну складність синтезованих діагностичних і розпізнавальних моделей, підвищувати їх інтепретовність і узагальнюючі властивості за рахунок виключення малозначущих, взаємозалежних і надлишкових ознак.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану систему критеріїв оцінювання інформативності ознак і дозволяє виконувати відбір ознак для синтезу розпізнавальних моделей на основі заданих наборів даних.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованої системи критеріїв оцінювання інформативності ознак і дозволяють рекомендувати її для використання на практиці при обробці масивів даних для розпізнавання образів. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в модифікації існуючих і розробці нових методів відбору ознак на основі запропонованої системи критеріїв оцінювання індивідуальної і групової інформативності ознак.

Ключові слова: вибірка даних, розпізнавання образів, відбір ознак, критерій інформативності, індивідуальна інформативність, групово інформативність.

Олейник А. А.¹, Субботин С. А.², Левкин В. Н.³, Благодарев А. Ю.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 программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

⁴Аспирант кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

⁵Канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

СИСТЕМА КРИТЕРИЕВ ОЦЕНИВАНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Актуальность. Решена задача автоматизации процесса оценивания информативности признаков при решении задач диагностирования и распознавания образов. Объект исследования – процесс отбора информативных признаков. Предмет исследования – критерии оценивания информативности признаков.

Цель работы заключается в создании системы критериев оценивания информативности признаков, позволяющей вычислять информативность наборов взаимозависимых признаков.

Метод. Предложена система критериев оценивания информативности признаков. Предложенная система предполагает определение значимости признаков исходя из пространственного расположения экземпляров разных классов (диапазонов изменения значений выходного параметра). Разработанная система критериев позволяет оценивать индивидуальную и групповую информативность признаков при решении задач классификации и регрессии в условиях, когда исходные выборки данных содержат избыточные и взаимозависимые признаки, а также экземпляры с пропущенными значениями. Предложенные критерии не требуют построения моделей на основе оцениваемых комбинаций признаков, что существенно снижает временные и вычислительные затраты в процессе отбора информативных признаков. Использование предложенных критериев для оценивания и отбора информативных признаков позволяет при решении задач диагностирования и распознавания образов понижать структурную сложность синтезируемых диагностических и распознающих моделей, повышать их интерпретируемость (понимаемость человеком) и обобщающие способности за счет исключения малозначимых, взаимозависимых и избыточных признаков.

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную систему критериев оценивания информативности признаков и позволяет выполнять отбор информативных признаков для синтеза распознающих моделей на основе заданных наборов данных.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенной системы критериев оценивания информативности признаков и позволяют рекомендовать ее для использования на практике при обработке массивов данных для распознавания образов. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в модификации существующих и разработки новых методов отбора признаков на основе разработанной системы критериев оценивания индивидуальной и групповой информативности признаков.

Ключевые слова: выборка данных, распознавание образов, отбор признаков, критерий информативности, индивидуальная информативность, групповая информативность.

REFERENCES

- Jensen R., Shen Q. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008, 339 p. DOI: 10.1002/9780470377888.
- Mulaik S. A. Foundations of Factor Analysis. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2009, 548 p.
- Lee J. A., Verleysen M. Nonlinear dimensionality reduction. New York, Springer, 2007, 308 p. DOI: 10.1007/978-0-387-39351-3.
- 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.
- Hyvarinen A., Karhunen J., Oja E. Independent component analysis. New York, John Wiley & Sons, 2001, 481 p. DOI: 10.1002/0471221317.
- Fedotov N. G. Teorija priznakov raspoznavanija obrazov na osnove stohasticheskoy geometrii i funkcional'nogo analiza. Moscow, Fizmatlit, 2010, 304 p. (In Russian).
- Guyon I., Elisseeff A. An introduction to variable and feature selection, *Journal of machine learning research*, 2003, No. 3, pp. 1157–1182.
- McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, 526 p. DOI: 10.1002/0471725293.
- Oliinyk A. A., Skrupsky S. Yu., Shkaruplyo V. V., Blagodariyov O. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, No. 2. 2017, pp. 82–92.
- 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.
- Oliinyk A., Skrupsky S., Subbotin S., Blagodariyov 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.
- 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.
- 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, pp. 97–103. DOI: 10.1007/978-3-319-48923-0_13.
- Shitikova O. V., Tabunshchik G. V. Method of Managing Uncertainty in Resource-Limited Settings, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, No. 2, pp. 87–95. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-2-11.
- Tabunshchik G. V., Kaplienko T. I., Shitikova O. V. Verification model of systems with limited resources, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 4.
- Bodyanskiy Ye., Vynokurova O. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification, *Information Science*, 2013, Vol. 220, pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
- Kononenko I. Estimating Attributes: Analysis And Extensions Of Relief, *Machine Learning : European Conference on Machine Learning ECML-94, Catania, 6–8 April 1994 : proceedings of the conference*. Berlin, Springer, 1994, pp. 171–182. DOI: 10.1007/3-540-57868-4_57.
- Kira K., Rendell L. A practical approach to feature selection, *Machine Learning : International Conference on Machine Learning ML92, Aberdeen, 1–3 July 1992 : proceedings of the conference*. New York, Morgan Kaufmann, 1992, pp. 249–256. DOI: 10.1016/B978-1-55860-247-2.50037-1.
- Salfner F., Lenk M., Malek M. A survey of online failure prediction methods, *ACM computing surveys*, 2010, Vol. 42, Issue 3, pp. 1–42. DOI: 10.1145/1670679.1670680.
- 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.
- Oliinyk A. A., Subbotin S. A., Skrupsky S. Yu., Lovkin V. M., Zaiko T. A. Information Technology of Diagnosis Model Synthesis Based on Parallel Computing, *Radio Electronics Computer Science Control*, 2017, No. 3, pp. 139–151.
- Subbotin S., Oliinyk A., Oliinyk O. Noniterative, evolutionary and multi-agent methods of fuzzy and neural network models synthesis : monograph. Zaporizhzhya, ZNTU, 2009, 375 p. (In Ukrainian).

¹Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри загальної фізики Інституту фізики, математики, економіки та інноваційних технологій Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка, Дрогобич, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних систем та мереж Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Магістрант кафедри інформаційних систем та мереж Інституту комп'ютерних наук та інформаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

ДИНАМІКА НЕЛІНІЙНОГО ОСЦИЛЯТОРНОГО НЕЙРОНА ПРИ ДІЇ ЗОВНІШНЬОГО НЕСТАЦІОНАРНОГО СИГНАЛУ

Актуальність. Розглянуто задачу частотно-часової та часової залежності морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона з урахуванням його порогового ефекту. Об'єктом дослідження є нелінійна модифікована модель Ван-дер-Поля, яка описує динаміку нелінійного осциляторного нейрона при дії на нього різних за формою, частотою та амплітудою зовнішніх нестационарних сигналів.

Мета роботи. Побудова нелінійної математичної моделі динаміки осциляторного нейрона з урахуванням його порогового ефекту при дії на нейрон зовнішніх нестационарних сигналів.

Метод. У наближенні Крилова-Боголюбова-Митропольського запропоновано методом послідовних наближень спосіб розв'язку нелінійного неоднорідного диференційного рівняння другого порядку з квадратичною нелінійністю шуканої функції при першій похідній. Запропонований метод розв'язку дозволив отримати частотно-часову та часову залежність морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона з урахуванням його порогового ефекту при дії на нейрон різних структурою вхідних сигналів. Також запропоновано кодування інформації нелінійним осциляторним нейроном на основі частотної модуляції та декодування за допомогою оберненого оператора, що діє на вектор вихідного сигналу.

Результати. Побудована нелінійна модель осциляторного нейрона реалізована в середовищі комп'ютерної математики «Mathematica 7.0». Досліджено частотно-часову та часову залежність морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона з урахуванням його порогового ефекту при різних значеннях параметрів вхідного нестационарного сигналу і різних вагових синаптичних зв'язках.

Висновки. Встановлено існування резонансного ефекту у нелінійному нейроні за умови рівності частоти зовнішнього нестационарного сигналу та власної частоти динаміки нейрона. Показано, що нелінійний осциляторний нейрон відіграє роль частотного модулятора та суттєво видозмінює структуру вхідного інформаційного нестационарного сигналу (форму, частоту та амплітуду). Запропоновано кодування інформації нелінійним осциляторним нейроном на основі частотної модуляції та декодування за допомогою оберненого оператора.

Ключові слова: нелінійний осциляторний нейрон, частотна модуляція, морфологія інформаційного сигналу, резонансний ефект, кодування та декодування інформації.

НОМЕНКЛАТУРА

α_L – початкова фаза в радіанах;

μ_k – параметр згасання коливань нелінійного осциляторного k -го нейрона;

τ_L – характерний часовий інтервал локалізації сигналу;

$\omega_k^{(n)}(t)$ – часова залежність миттєвої частоти сигналу на виході нелінійного k -го нейрона;

ω_{0k} – власна частота коливань нелінійного k -го нейрона;

ω_L – зовнішня частота несучих коливань;

σ_k^2 – дисперсія k -го нейрона;

λ_{Lk} – вагові коефіцієнти зв'язків вхідних сигналів з k -м нейроном;

λ_{0k} – ваговий коефіцієнт сигналу зсуву з k -м нейроном;

$\psi_k^{(n)}(t)$ – нестационарна фаза коливань;

$a_k^{(n)}(t)$ – часова залежність амплітуди сигналу k -го нейрона;

$\widehat{f_{BX}}$ – оператор входу;

$\widehat{f_a}$ – оператор активації;

$\widehat{f_{ВХ}}$ – оператор виходу;

$\widehat{f_{BX}}^{-1}(\widehat{f_a}^{-1}(\widehat{f_{ВХ}}^{-1}X_k(t)))$ – обернений оператор, що діє на вектор вихідного сигналу, для того, щоб отримати структуру вхідного інформаційного несучого сигналу $V_k(t)$, що поступає на k -й нейрон;

$L = (\lambda_{Lk}, \omega_L, t_L, \tau_L, \alpha_L)$ – система параметрів зовнішнього сигналу, що поступає на k -й нейрон;

N_{0k} – число імпульсів, які приходять на k -й нейрон;

N_{ck} – порогове значення імпульсів при якому k -й нейрон починає генерувати;

$p_k^2(N_{0k}; N_{ck})$ – параметр амплітуди k -го нейрона;

t_L – центр локалізації сигналу за часом;

$V_k(t)$ – вхідний нестационарний несучий сигнал, який поступає на k -й нейрон;

$X_k(t)$ – вектор сигналу на виході k -го нейрона.

ВСТУП

Значний інтерес для сучасної нейродинаміки складає дослідження процесів шифрування, обробки та розшифрування інформації, яка передається нейронами. На перших етапах обробки сенсорної інформації вейвлет-аналіз є ефективним інструментом для дослідження інформаційної складової нейронних сигналів, що реєструються. Традиційно таке дослідження зводиться до аналізу структури точкових процесів, тобто до аналізу частотно-часової динаміки нейронних відгуків [1–6], у яких носіями інформації є часи генерації імпульсів (спайків), а не їх форма [7]. Механізми, що приводять до генерації спайків, частково відомі [8]. Але те, яким чином нейрони та їх ансамблі передають інформацію про навколишній світ, до цього часу практично не досліджено.

Метою даної роботи побудова нелінійної математичної моделі динаміки осциляторного нейрона з урахуванням його порогового ефекту при дії на нього зовнішніх нестационарних сигналів.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай маємо нелінійний осциляторний пороговий k -й нейрон, який генерує коливання з власною частотою ω_{0k} . На вхід цього нелінійного нейрона подається нестационарний зовнішній сигнал

$$V_k(t) = \sum_{L=L_0}^{N-1} \lambda_{Lk} v_{Lk}(\omega_L; t-t_L; \alpha_L) + \lambda_{0k} \text{ у вигляді суми}$$

N простих нестационарних сигналів $v_{Lk}(\omega_L; t-t_L; \alpha_L)$, кожний з яких центрований в точці $t=t_L$ з ваговими коефіцієнтами λ_{Lk} і ваговим коефіцієнтом λ_{0k} зв'язку сигналу зсуву з k -м нейроном. Сигнал $V_k(t)$ описується системою п'яти параметрів $L = (\lambda_{Lk}, \omega_L, t_L, \tau_L, \alpha_L)$, де $\omega_L = 2\pi f_L$ – зовнішня частота несучих коливань в герцах (Hz), τ_L – характерний часовий інтервал локалізації сигналу в секундах, α_L – початкова фаза в радіанах.

Тоді задача динаміки нелінійного осциляторного нейрона за наявності зовнішніх нестационарних сигналів різних за формою, частотою та амплітудою полягає у визначенні частотно-часової та часової залежності морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона в межах нелінійної моделі Ван-дер-Поля з урахуванням порогового ефекту нейрона та встановлені критерію виникнення резонансних ефектів у нелінійному осциляторному нейроні.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У роботах [2, 3, 6] авторами було проаналізовано випадок перетворення сигналів сенсорним нейроном (пороговим пристроєм), однак не враховано власну динаміку нейрона. Зокрема, за допомогою класичних моделей порогових систем, таких як «integrate-and-fire» [2] («інтегруй і стріляй») та «threshold crossing» [3, 6] («перетин порогу») було показано, що різні характеристики складної динаміки на вході сенсорного нейрона зберігаються в структурі точкового процесу [2–6, 9–11].

Комп'ютерне моделювання динаміки нейрона при дії на нього зовнішнього постійного сигналу було проведено в наближенні Ван-дер-Поля [12].

Авторами роботи [13] на основі техніки подвійного вейвлет-аналізу було досліджено частотно-часову динаміку сенсорного нейрона (порогового пристрою) з урахуванням взаємодії його власної динаміки та динаміки, зумовленої дією зовнішнього нестационарного сигналу. При цьому сенсорний нейрон моделювався як пороговий пристрій, що перетворює вхідний сигнал у послідовність імпульсів на виході. Ця послідовність імпульсів описувалась послідовністю дельта-функцій Дірака, кожна з яких відповідає моменту генерації імпульсу (спайку). Ці модельні імпульси мають однакову форму і амплітуду, тому інформація про зовнішню дію динамічного сигналу відображається тільки в часових інтервалах між моментами їх генерації.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглядається сенсорний нелінійний осциляторний нейрон виду Ван-Дер-Поля (пороговий пристрій) з власною динамікою ω_{0k} , який здатний генерувати імпульси за відсутності зовнішніх нестационарних сигналів ($V_k(t) = 0$), коли кількість наявних у сенсорному нейроні імпульсів N_{0k} досягає порогового значення N_{ck} ($N_{0k} > N_{ck}$). Тобто, такий нейрон може розглядатися як пороговий пристрій, який перетворює вхідний нестационарний сигнал $V_k(t)$ на послідовність імпульсів на виході (рис. 1) за рахунок «накладання» динаміки вхідного нестационарного сигналу на власну динаміку нейрона. Внаслідок цього аналіз процесу перетворення сигналів сенсорним нелінійним осциляторним нейроном ускладнюється. Про складну динаміку перетворення вхідного нестационарного сигналу, що подається на біологічний сенсор з власною динамікою, свідчить експериментальний запис сигналу (рис. 2) [13], що генерується біологічним нейроном без дії зовнішнього сигналу (інтервал $0 < t < 110$ с з послідовністю низькочастотних δ -імпульсів). На інтервалі часу $110 < t < 200$ с (рис. 2) зображено результат взаємодії зовнішнього сигналу з біологічним сенсором з власною динамікою, яка приводить до формування послідовності високочастотних δ -імпульсів.

Для ілюстрації розглянемо кодування інформації сенсорним нелінійним осциляторним k -м нейроном, який описується нелінійним рівнянням виду:

$$\ddot{X}_k + \mu_k [X_k^2 - p_k^2(N_{0k}; N_{ck})] \dot{X}_k + \omega_{0k}^2 X_k = V_k(t), \quad (1)$$

де $p_k^2(N_{0k}; N_{ck}) = p_{0k}^2 \tanh\left(\frac{N_{0k} - N_{ck}}{\sigma_k^2}\right)$ – параметр ам-

плітуди k -го нейрона; $\mu_k > 0$; N_{0k} , N_{ck} , σ_k^2 – число імпульсів, які приходять на k -й нейрон, порогове значення імпульсів k -го нейрона та дисперсія відповідно; ω_{0k}^2 – власна частота k -го нелінійного осциляторного нейрона; $V_k(t)$ – вхідний нестационарний сигнал, який поступає на k -й нейрон.



Рисунок 1 – Схематичне зображення процесу перетворення вхідного сигналу $V_k(t)$ сенсорним нелінійним осциляторним нейроном (пороговим пристроєм). Часи генерації імпульсів на виході порогового пристрою $X_k(t)$ відповідають моментам перетину порогового рівня

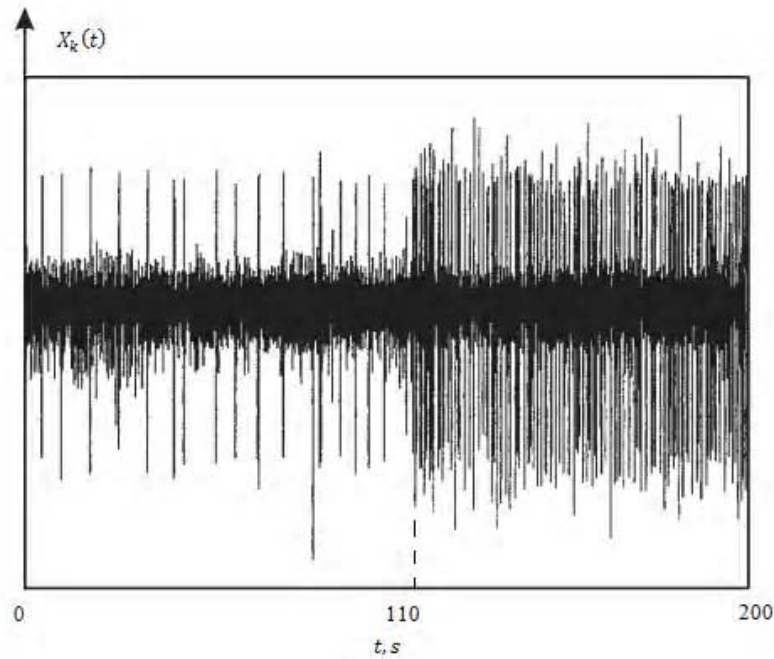


Рисунок 2 – Приклад експериментального запису сигналу, що генерується біологічним нейроном [13]

Нелінійний осциляторний нейрон має власну динаміку і генерує імпульси за відсутності зовнішніх сигналів при

$N_{0k} > N_{ck}$, оскільки за цієї умови $\tanh(\frac{N_{0k} - N_{ck}}{\sigma_k^2}) > 0$ і

відповідно $p_k^2(N_{0k}; N_{ck}) > 0$ [14]. Математична модель (1) може використовуватись також для дослідження колективної поведінки ансамблів нейронів, взаємозв'язаних синаптичними зв'язками λ_{jk} . Для цього в другому та третьому доданках необхідно зробити заміну $X_k \rightarrow X_{\alpha k}$, де

$$X_{\alpha k} = X_k + \sum_{j=1}^N \lambda_{jk} X_j; \quad \alpha = 1, 2, \dots, N.$$

Розв'язок рівняння (1) знаходимо аналітично-чисельним методом та методом послідовних наближень у вигляді

$$X_k^{(n)}(t) = a_k^{(n)}(t) \sin \psi_k^{(n)}(t), \quad (2)$$

де $n = 1, 2, 3, \dots, N$ – номер ітерації;

$$\psi_k^{(n)}(t) = \omega_{0k} t + \phi_k^{(n)}(t) \quad (3)$$

$a_k^{(n)}(t)$ і $\phi_k^{(n)}(t)$ – функції часу, які добираються так, щоб співвідношення (2) задовольняло рівняння (1). Крім цього накладаємо умову, що $a_k^{(n)}(t)$ є повільно змінна функція, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a_k^{(n)}(p_k \mu_k t)}{a_k^{(n)}(p_k t)} = 1. \quad (4)$$

Але оскільки функцій є дві $a_k^{(n)}(t)$ і $\psi_k^{(n)}(t)$, а рівняння одне, то ця умова неоднозначно визначає функції. Будемо вимагати, щоб виконувалась також умова

$$\dot{X}_k^{(n)} = \omega_{0k} a_k^{(n)}(t) \cos \psi_k^{(n)}(t), \quad (5)$$

$$\text{де } \dot{X}_k^{(n)} = \frac{dX_k^{(n)}(t)}{dt}.$$

Підставляючи (2) в (1) і враховуючи умову (5), отримаємо систему рівнянь для $a_k^{(n)}(t)$ і $\psi_k^{(n)}(t)$:

$$\begin{cases} \frac{da_k^{(n)}(t)}{dt} = -a_k^{(n-1)}(t)\mu_k \left[(a_k^{(n-1)})^2 \sin^2 \psi_k^{(n-1)}(t) - p_k^2(N_{0k}; N_{ck}) \right] \cos^2 \psi_k^{(n-1)}(t) + V_k(t) \cos \psi_k^{(n-1)}(t) \\ \frac{d\psi_k^{(n)}(t)}{dt} = \omega_{0k} + \mu_k \left[(a_k^{(n-1)})^2 \sin^2 \psi_k^{(n-1)}(t) - p_k^2(N_{0k}; N_{ck}) \right] \sin \psi_k^{(n-1)}(t) \cos \psi_k^{(n-1)}(t) - \frac{V_k(t) \sin \psi_k^{(n-1)}(t)}{a_k^{(n-1)}(t)} \end{cases} \quad (6)$$

Усереднимо праву частину системи рівнянь (6) за період 2π при $V_k(t) = 0$ за правилом [15]:

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \Phi(\psi_k^{(n)}) d\psi_k^{(n)}. \quad (7)$$

У нульовому наближенні вирази для $a_k^{(0)}(t)$ і $\psi_k^{(0)}(t)$ знаходимо з такої системи рівнянь:

$$\frac{da_k^{(0)}(t)}{dt} = A(a_k^{(0)}(t)), \quad \frac{d\psi_k^{(0)}(t)}{dt} = B(a_k^{(0)}(t)), \quad (8)$$

$$\text{де } A(a_k^{(0)}(t)) = -a_k^{(0)}(t)\mu_k \left(\frac{(a_k^{(0)})^2}{8} - \frac{p_k^2}{2} \right), \quad B(a_k^{(0)}(t)) = \omega_{0k}.$$

Інтегруючи рівняння (8), отримаємо в нульовому наближенні вирази для $a_k^{(0)}(t)$ і $\psi_k^{(0)}(t)$:

$$a_k^{(0)}(t) = \frac{2p_k}{\sqrt{1 + e^{-p_k^2 \mu_k t}}}, \quad (9)$$

$$\psi_k^{(0)}(t) = \omega_{0k} t, \quad (10)$$

де $a_k^{(0)}(t)$ задовольняє критерію (4), повільно змінної функції. Для знаходження виразів $a_k^{(1)}(t)$ і $\psi_k^{(1)}(t)$ у першому наближенні ($n=1$) необхідно підставити вирази (9), (10) у систему рівнянь (6). У результаті інтегрування отримаємо у першому наближенні вирази для $a_k^{(1)}(t)$ і $\psi_k^{(1)}(t)$. Процес ітерації припиняється, коли будуть виконуватися умови:

$$\left| \frac{a_k^{(n)}(t) - a_k^{(n-1)}(t)}{a_k^{(n)}(t)} \right| \ll 1, \quad \left| \frac{\psi_k^{(n)}(t) - \psi_k^{(n-1)}(t)}{\psi_k^{(n)}(t)} \right| \ll 1.$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Чисельний експеримент було програмно реалізовано методом послідовних наближень при розв'язуванні системи рівнянь (6) в середовищі комп'ютерної математики «Mathematica 7.0» для зовнішнього нестационарного сигналу $V_k(t)$

$$V_k(t) = \sum_{L=L_0}^{N-1} \lambda_{Lk} v_{Lk}(\omega_L; t - t_L; \alpha_L) + \lambda_{0k} \quad (11)$$

у вигляді суми N простих нестационарних сигналів $v_{Lk}(\omega_L; t - t_L; \alpha_L)$

$$v_{Lk}(\omega_L; t - t_L; \alpha_L) = \frac{1}{2\tau_L \sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{(t - t_L)^2}{4\tau_L^2} \right] \cos(\omega_L(t - t_L) + \alpha_L), \quad (12)$$

кожний з яких центрований в точці $t = t_L$ і характеризується системою п'яти параметрів L [16]

$$L = (\lambda_{Lk}, \omega_L, t_L, \tau_L, \alpha_L), \quad (13)$$

де λ_{Lk} – вагові коефіцієнти зв'язків вхідних сигналів $v_1, \dots, v_N$ з k -м нейроном; λ_{0k} – ваговий коефіцієнт зв'язку сигналу зсуву з k -м нейроном; $\omega_L = 2\pi f_L$ – зовнішня частота несучих коливань в герцах (Hz), t_L – центр локалізації сигналу за часом в секундах, τ_L – характерний часовий інтервал локалізації сигналу в секундах, α_L – початкова фаза в радіанах.

Числовий розрахунок морфології зовнішнього нестационарного сигналу $V_k(t)$ (11), (12), функціональної часової залежності сигналу на виході нелінійного нейрона $X_k(t)$ та часової залежності миттєвої частоти несучого інформаційного сигналу $\omega_k(t)$ проведений для системи параметрів $L = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$, $= (3, 4, 12, 3, 0)$. Запропонована математична модель зовнішнього нестационарного сигналу $V_k(t)$ відображає динаміку реального сигналу, що характеризує певний фізичний (біологічний) процес.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 3, рис. 4 зображено перший доданок ($N = 1$) нестационарного зовнішнього сигналу $V_k(t)$ ((11), (12)) в залежності від часу

$$v_{L_0k}(t - t_{L_0}) = \frac{\lambda_{L_0k}}{2\tau_{L_0} \sqrt{\pi}} \exp \left[-\frac{(t - t_{L_0})^2}{4\tau_{L_0}^2} \right] \cos(\omega_{L_0}(t - t_{L_0}) + \alpha_{L_0}), \quad (14)$$

що подається на сенсорний нелінійний осциляторний нейрон для двох значень параметра L_0 : $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3, 0)$; $L_0 = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$ відповідно. У першому випадку сигнал $v_{L_0k}(t - t_{L_0})$ (рис. 1) має амплітуду $\lambda_{L_0k} = 3$, а в другому – $\lambda_{L_0k} = 1$, відповідно у першому випадку сигнал має частоту $f_{L_0} = 2$ Hz, центрований за часом в точці $t_{L_0} = 12$ с з часовим інтервалом локалізації сигналу $\tau_{L_0} = 3$ с та початковою фазою $\alpha_{L_0} = 0$, а в другому – $f_{L_0} = 3$ Hz; $t_{L_0} = 21$ с, $\tau_{L_0} = 3$ с; $\alpha_{L_0} = 0$.

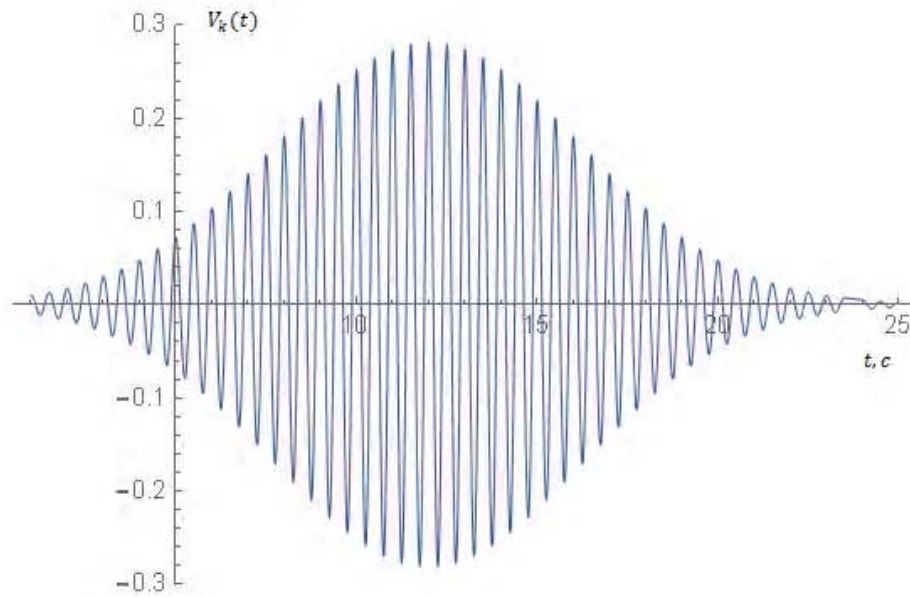


Рисунок 3 – Морфологія зовнішнього інформаційного сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14) при значеннях параметрів $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3,)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1$

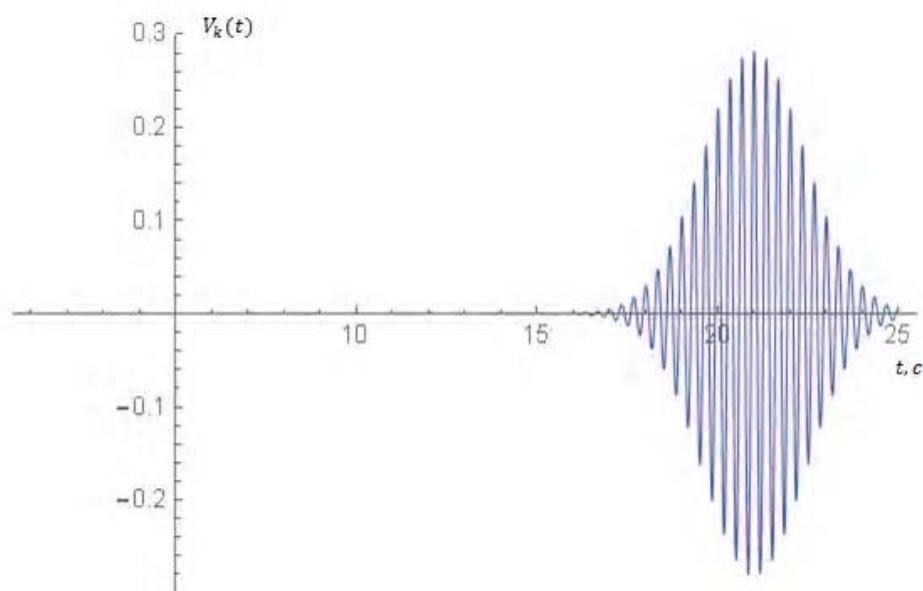


Рисунок 4 – Морфологія зовнішнього інформаційного сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14) при значеннях параметрів $L_0 = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1$

При числових розрахунках сигналів $X_k(t)$ на виході нелінійного осциляторного нейрона з вхідними сигналами (рис. 3, рис. 4) параметри $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1$ співпадають.

На рис. 5, рис. 6 представлено графіки частотної модуляції $\omega_k^{(n)} = \frac{d\psi_k^{(n)}(t)}{dt}$, тобто зміни миттєвої частоти несучого інформаційного коливання $V_k(t)$ (11), яке складається тільки з одного простого нестационарного сигнала

$v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14), у відповідності зі зміною сигналу, що зумовлена взаємодією зовнішнього несучого інформаційного сигналу з власною динамікою $\omega_{0k} = 0,2\pi$ (рис. 5) і $\omega_{0k} = 2$ (рис. 6) нелінійного осциляторного нейрона.

На рис. 7, рис. 8 представлено графіки морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона $X_k(t)$, яка визначається характером взаємодії власної динаміки нейрона з частотами $\omega_{0k} = 0,2\pi$ та $\omega_{0k} = 2$ і динаміки, зумовленої зовнішньою дією $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14).

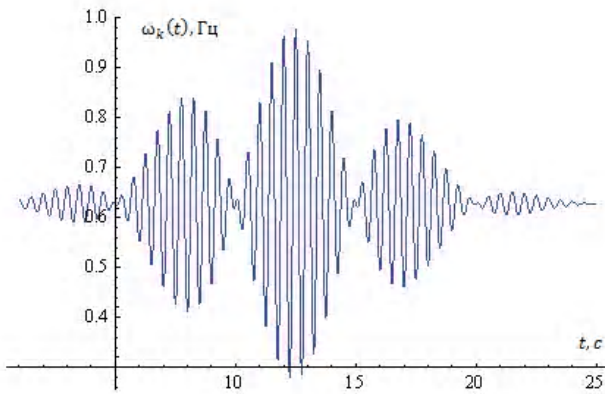


Рисунок 5 – Часова залежність миттєвої частоти несучого інформаційного сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14) при значеннях параметрів $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3, 0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 0,2\pi$

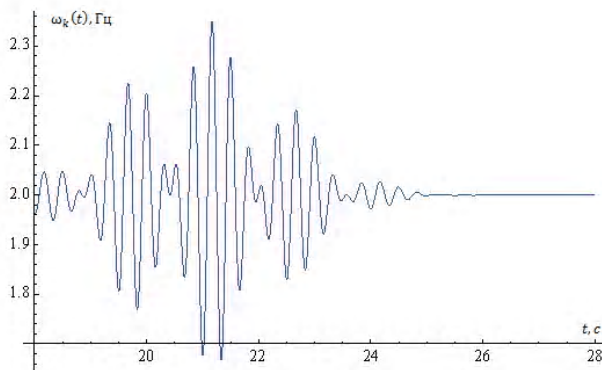


Рисунок 6 – Часова залежність миттєвої частоти несучого інформаційного сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14) при значеннях параметрів $L_0 = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 2$

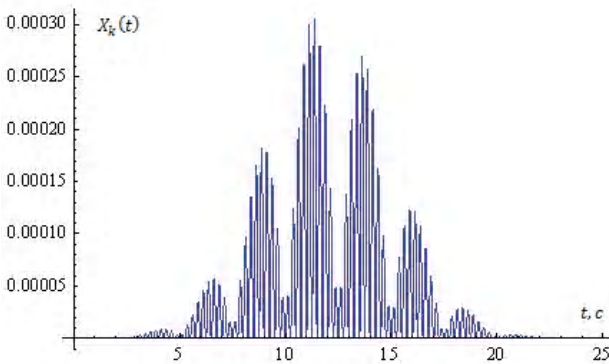


Рисунок 7 – Графік морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона $X_k(t)$ при значеннях параметрів $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3, 0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 0,2\pi$

При взаємодії зовнішнього сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ з параметрами $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3, 0)$; $L_0 = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$ з власною динамікою нелінійного осциляторного нейрона $\omega_{0k} = 4\pi$ або $\omega_{0k} = 6\pi$ спостерігається різке зростання

амплітуди вихідного сигналу $X_k(t)$ (рис. 9) порівняно з вихідним сигналом на рис. 7. Тобто має місце резонансний ефект при співпаданні частоти зовнішнього сигналу з власною частотою коливань нелінійного нейрона, ($\omega_{L_0} = \omega_{0k}$). Графік частотної модуляції $\omega_k^{(n)}(t)$ у випадку резонансного ефекту представлений на рис. 10

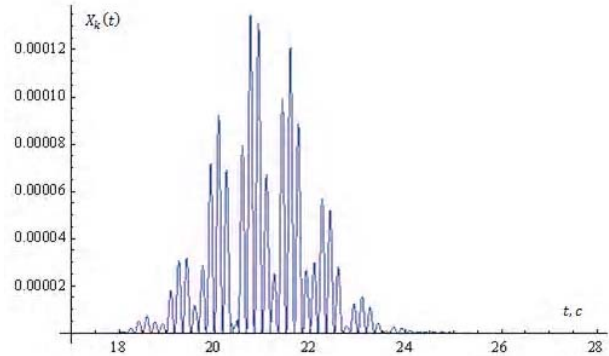


Рисунок 8 – Графік морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона $X_k(t)$ при значеннях параметрів

$L_0 = (1, 6\pi, 21, 1, 0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 2$

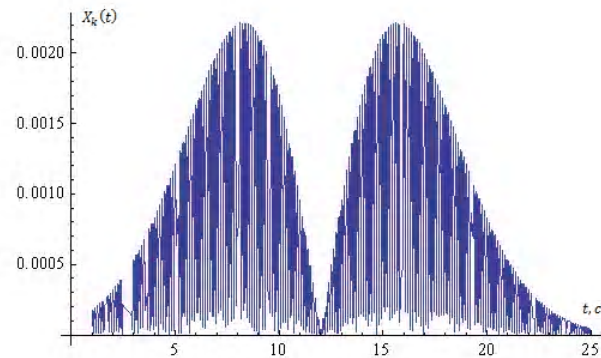


Рисунок 9 – Графік морфології сигналу на виході нелінійного осциляторного нейрона $X_k(t)$ у випадку резонансного ефекту при значеннях параметрів $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3, 0)$; $p_k = 0,4$ та

$\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 4\pi$

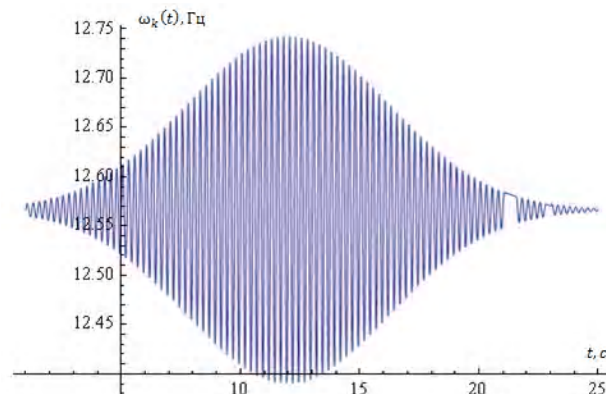


Рисунок 10 – Часова залежність миттєвої частоти несучого інформаційного сигналу $v_{L_0k}(t-t_{L_0})$ (14) у випадку резонансного ефекту при значеннях параметрів $L_0 = (3, 4\pi, 12, 3,$

$0)$; $p_k = 0,4$ та $\mu_k = 0,1, \omega_{0k} = 4\pi$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Формула (11) з урахуванням (12) описує всі вхідні сигнали, включаючи сигнал зсуву, які поступають з ваговими коефіцієнтами λ_{Lk} на суматор k -го нелінійного осциляторного нейрона (вхідний оператор $\widehat{f_{\text{вх}}}$). Вхідний оператор перетворює зважені ваговими коефіцієнтами входи і подає їх на оператор активації $\widehat{f_a}$ (рис. 11). Для сенсорного нелінійного осциляторного нейрона оператор активації $\widehat{f_a}$ має вигляд:

$$\widehat{f_a} = \frac{d^2}{dt^2} + \mu_k \left[X_k^2 - p_k^2(N_{0k}; N_{ck}) \right] \frac{d}{dt} + \omega_{0k}^2. \quad (15)$$

Вихідний сигнал нелінійного осциляторного нейрона $X_k(t)$ (рис. 11), який є результатом взаємодії власної динаміки нейрона з динамікою зовнішнього нестационарного сигналу являє собою перетворений вихідним оператором $\widehat{f_{\text{вх}}}$ вихідний сигнал оператора активації. Вихідний оператор $\widehat{f_{\text{вх}}}$ є необхідний для представлення стану нейрона у бажаній області значень. У більшості робіт цей оператор не виділяють, а під вихідним сигналом нейрона розуміють сигнал після оператора активації $\widehat{f_a}$. Однак під час аналізу й синтезу штучних нейронних мереж, які мають різні активаційні функції з різними областями значень й областями визначення виникає необхідність урахування оператора виходу. Отже, нелінійний оператор перетворення вектора вхідних сигналів $V_k(t)$ у вектор вихідного сигналу $X_k(t)$ можна записати у вигляді:

$$X_k(t) = \widehat{f_{\text{вх}}}(\widehat{f_a}(\widehat{f_{\text{вх}}}(V_k(t), \lambda_{Lk}))). \quad (16)$$

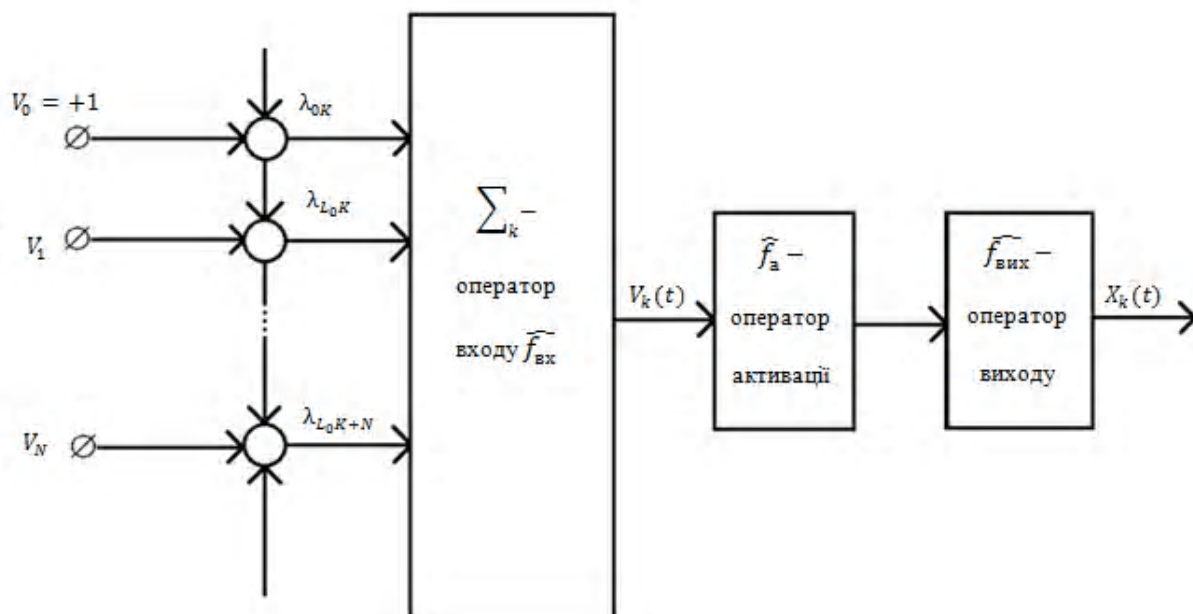


Рисунок 11 – Структура штучного нелінійного осциляторного нейрона

Для того щоб розшифрувати структуру вихідного сигналу $X_k(t)$, необхідно знати код програми, яка описує обернений оператор, що діє на вектор вихідного сигналу, тобто

$$\widehat{f_{\text{вх}}}^{-1}(\widehat{f_a}^{-1}(\widehat{f_{\text{вх}}}^{-1}X_k(t))) = V_k(t, \lambda_{Lk}). \quad (17)$$

Результати досліджень динаміки нелінійного нейрона при дії на нього зовнішнього нестационарного сигналу показали, що нейрон може працювати в режимі частотного модулятора і при співпадінні частот зовнішнього нестационарного сигналу з власною частотою коливаний нейрон, останній проявляє резонансні ефекти.

Таким чином, отримані результати дозволяють висунути гіпотезу про те, що процес кодування інформації нелінійними нейронами може розглядатися в термінах частотної модуляції, оскільки в радіофізиці відомо, що частотна модуляція є одним із способів передачі інформації.

ВИСНОВКИ

1. Запропоновано спосіб розв'язку методом послідовних наближень нелінійного неоднорідного диференційного рівняння другого порядку з квадратичною нелінійністю шуканої функції при першій похідній.

2. Встановлено, що нелінійний осциляторний нейрон може відігравати роль частотного модулятора, тобто модулювати вхідний інформаційний нестационарний сигнал.

3. Встановлено, що нелінійний осциляторний нейрон з пороговим ефектом суттєво видозмінює структуру вхідного інформаційного нестационарного сигналу різною за формою, частотою та амплітудою.

4. Встановлено існування резонансних ефектів у нелінійному осциляторному нейроні за умови рівності частоти зовнішнього нестационарного сигналу та власної частоти динаміки нейрона.

5. Запропоновано кодування інформації нелінійним осциляторним нейроном на основі частотної модуляції та декодування за допомогою оберненого оператора, що діє на вектор вихідного сигналу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sauer T. Reconstruction of dynamical systems from interspike intervals / T. Sauer // *Phys. Rev. Lett.* – 1994. – Vol. 72. – P. 3811–3814. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3811>
2. Racicot D. M. Interspike interval attractors from chaotically driven neuron models / D. M. Racicot, A. Lonytin // *Physic D.* – 1997. – Vol. 104. – P. 184–204.
3. Castro R. Correlation dimension of attractors through interspike intervals / R. Castro, T. Sauer // *Phys. Rev. E.* – 1997. – Vol. 55. – P. 287–290. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.287>
4. Sauer T. Nonlinear Dynamics and Time Series / T. Sauer // *American Mathematical Society.* – 1997. – Vol. 11. – P. 63 – 75.
5. Hegger R. Embedding of sequences of time intervals / R. Hegger, H. Kantz // *Europhys. Lett.* – 1997. – Vol. 38. – P. 267–272. DOI: <https://doi.org/10.1209/epl/i1997-00236-0>
6. Castro R. Chaotic Stochastic Resonance: Noise-Enhanced Reconstruction of Attractors / R. Castro, T. Sauer // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – Vol. 79. – P. 1030–1033. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.1030>
7. Вейвлет-анализ в нейродинамике / [А. Н. Павлов, А. Е. Храмов, А. А. Короновский и др.] // *Успехи физических наук.* – 2012. – Т. 182, № 9. – С. 905–939. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201209a.0905
8. Tuckwell H. C. *Introduction to Theoretical Neurobiology* / H. C. Tuckwell. – Cambridge: Cambridge University, 1988. – 304 p.
9. Reconstruction of dynamical and geometrical properties of chaotic attractors from threshold-crossing interspike intervals / [N. B. Janson, A. N. Pavlov, A. B. Neiman et al.] // *Phys. Rev. E.* – 1998. – Vol. 58. – P. R4–R7. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.R4>
10. Extracting dynamics from threshold-crossing interspike intervals: Possibilities and limitations / [A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, E. Mosekilde et al.] // *Phys. Rev. E.* – 2000. – Vol. 61. – P. 5033–5044. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.5033>
11. Chaotic dynamics from interspike intervals / [A. N. Pavlov, O. V. Sosnovtseva, E. Mosekilde et al.] // *Phys. Rev. E.* – 2001. – Vol. 63. – P. 036205 (5). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.036205>
12. Bay J. S., Hemami H. Modeling of a Neural Generator with Coupled Nonlinear Oscillators / J. S. Bay, H. Hemami // *IEEE Transactions biomedical engineering.* – 1987. – Vol. BME – 34, № 4, April. – P. 297 – 306. DOI: 10.1109/TBME.1987.326091
13. Павлов А. Н. Применение вейвлет-анализа в исследованиях структуры точечных процессов / А. Н. Павлов, О. Н. Павлова // *Письма в ЖТФ.* – 2006. – Т. 32, вып. 21. – С. 11–17.
14. Сугаков В. Й. Основы синергетики / В. Й. Сугаков. – Київ: Обереги, 2001. – 288 с.
15. Боголюбов М. М. Асимптотичні методи в теорії нелінійних рівнянь / М. М. Боголюбов. – Київ: Наука, 1992. – 312 с.
16. Божокин С. В. Непрерывное вейвлет-преобразование и точно решаемая модель нестационарных сигналов / С. В. Божокин // *ЖТФ.* – 2012. – Т.82, Вып. 7. – С. 8–13.

Стаття надійшла до редакції 03.05.2017.

Після доробки 12.06.2017.

Пелешак Р. М.¹, Литвин В. В.², Пелешак І. Р.³

¹Д-р физ. мат. наук, профессор, заведующий кафедрой общей физики, Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко, Дрогобыч, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой информационных систем и сетей, Национальный университет «Львовская политехника», Украина

³Магистрант кафедры информационных систем и сетей, Национальный университет «Львовская политехника», Украина

ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНОГО ОСЦИЛЯТОРНОГО НЕЙРОНА ПРИ ДЕЙСТВИИ НА НЕГО ВНЕШНЕГО НЕСТАЦИОНАРНОГО СИГНАЛА

Актуальность. Рассмотрена задача частотно-временной и временной зависимости морфологии сигнала на выходе нелинейного осциляторного нейрона с учетом его порогового эффекта. Объектом исследования является нелинейная модифицированная модель Ван-дер-Поля, которая описывает динамику нелинейного осциляторного нейрона при действии на него различных по форме, частоте и амплитуде внешних нестационарных сигналов.

Цель работы. Построение нелинейной математической модели динамики осциляторного нейрона с учетом его порогового эффекта при действии на нейрон внешних нестационарных сигналов.

Метод. В приближении Крылова-Боголюбова-Митропольского предложено путем последовательных приближений способ решения нелинейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка с квадратичной нелинейностью искомой функции при первой производной. Предложенный метод решения позволил получить частотно-временную и временную зависимость морфологии сигнала на выходе нелинейного осциляторного нейрона с учетом его порогового эффекта при действии на нейрон различных за структурой входных сигналов. Также предложено кодирование информации нелинейным осциляторным нейроном на основе частотной модуляции и декодирования с помощью обратного оператора, которая действует на вектор выходного сигнала.

Результаты. Построена нелинейная модель осциляторного нейрона, которая реализована в среде компьютерной математики «Mathematica 7.0». Исследованы частотно-временная и временная зависимости морфологии сигнала на выходе нелинейного осциляторного нейрона с учетом его порогового эффекта при различных значениях параметров входного нестационарного сигнала и разных весовых синаптических связей.

Выводы. Установлено существование резонансного эффекта в нелинейном нейроне при равенстве частоты внешнего нестационарного сигнала и собственной частоты динамики нейрона. Показано, что нелинейный осциляторный нейрон играет роль частотного модулятора и существенно видоизменяет структуру входного информационного нестационарного сигнала (форму, частоту и амплитуду). Предложено кодирование информации нелинейным осциляторным нейроном на основе частотной модуляции и декодирования с помощью обратного оператора.

Ключевые слова: нелинейный осциляторный нейрон, частотная модуляция, морфология информационного сигнала, резонансный эффект, кодирование и декодирование информации.

Peleshchak R. M.¹, Lytvyn V. V.², Peleshchak I. R.³

¹PhD., Professor, head of the Department of Physics at the Institute of Physics, Mathematics, Economics and Innovative Technologies, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Ukraine

²PhD., Professor, head of the Department of Information Systems and Networks at the Institute of Computer Science and Information Technology, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine

³Master student of Information Systems and Networks at the Institute of Computer Science and Information Technology, National University «Lviv Polytechnic», Ukraine

THE DYNAMICS OF NONLINEAR OSCILLATOR NEURON BY THE ACTION OF EXTERNAL NON-STATIONARY SIGNAL

Context. Deals with the problem of time-frequency and time dependence of the morphology of the signal at the output of nonlinear oscillatory neuron with regard to its threshold effect. The object of study is non-linear modified model of Van-der-Pol, which describes the dynamics of nonlinear oscillatory neurons under the action of various shape, frequency and amplitude of an external non-stationary signals.

Objective. Construction of nonlinear mathematical models of oscillatory dynamics of a neuron given its threshold effect under the action of a neuron to external non-stationary signals.

Method. In the approximation of Krylov-Bogoliubov-Mitropolskii the proposed method of successive approximations method for solving nonlinear differential equations of second order with quadratic nonlinearity of the unknown function with the first derivative. The proposed solution method allowed us to obtain the frequency-temporal and temporal dependence of the morphology of the signal at the output of nonlinear oscillatory neuron given its threshold effect when the effect on the neuron structure of the various input signals. Proposed coding information oscillatory nonlinear neuron on the basis of frequency modulation and decoding using the inverse operator which acts on the vector of the output signal.

Results. A non-linear model, the oscillatory neuron is implemented in the environment of computer algebra “Mathematica 7.0”. Investigation of frequency-temporal and temporal dependence of the morphology of the signal at the output of nonlinear oscillatory neuron given its threshold effect at various values of the parameters of the input non-stationary signal and different weight of synaptic connections.

Conclusions. The existence of the resonance effect in nonlinear neuron with equal external frequency non-stationary signal and frequencies of the dynamics of the neuron. It is shown that nonlinear oscillatory neuron plays the role of the frequency modulator and significantly alters the structure of the input information signal is non-stationary (shape, frequency and amplitude). Proposed coding information oscillatory nonlinear neuron on the basis of frequency modulation and decoding by using the inverse operator.

Keywords: nonlinear oscillator neuron, frequency modulation, the morphology of the information signal, resonance effect, coding and decoding information.

REFERENCES

1. Sauer T. Reconstruction of dynamical systems from interspike intervals / T. Sauer // *Phys. Rev. Lett.*, 1994, Vol. 72, pp. 3811 – 3814. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.3811>
2. Racicot D. M., Lonytin A. Interspike interval attractors from chaotically driven neuron models, *Physic D*, 1997, Vol. 104, pp. 184–204.
3. Castro R., Sauer T. Correlation dimension of attractors through interspike intervals, *Phys. Rev. E.*, 1997, Vol. 55, pp. 287–290. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.55.287>
4. Sauer T. Nonlinear Dynamics and Time Series, *American Mathematical Society*, 1997, Vol. 11, pp. 63–75.
5. Hegger R., Kantz H. Embedding of sequences of time intervals, *Europhys. Lett.*, 1997, Vol. 38, pp. 267–272. DOI: <https://doi.org/10.1209/epl/i1997-00236-0>
6. Castro R., Sauer T. Chaotic Stochastic Resonance: Noise-Enhanced Reconstruction of Attractors, *Phys. Rev. Lett.*, 1997, Vol. 79, pp. 1030–1033. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.79.1030>
7. Pavlov A. N., Hramov A. E., Koronovskij A. A. et al. Vejvlet-analiz v nejrodinamike, *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2012, Vol. 182, No. 9, pp. 905–939. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201209a.0905
8. Tuckwell H. C. Introduction to Theoretical Neurobiology. Cambridge, Cambridge University, 1988, 304 p.
9. Janson N. B., Pavlov A. N., Neiman A. B. et al. Reconstruction of dynamical and geometrical properties of chaotic attractors from threshold-crossing interspike intervals, *Phys. Rev. E.*, 1998, Vol. 58, pp. R4–R7. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.58.R4>
10. Pavlov A. N., Sosnovtseva O. V., Mosekilde E. et al. Extracting dynamics from threshold-crossing interspike intervals: Possibilities and limitations, *Phys. Rev. E.*, 2000, Vol. 61, pp. 5033–5044. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.61.5033>
11. Pavlov A. N., Sosnovtseva O. V., Mosekilde E. et al. Chaotic dynamics from interspike intervals, *Phys. Rev. E.*, 2001, Vol. 63, pp. 036205 (5). DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.63.036205>
12. Bay J. S., Hemami H. Modeling of a Neural Generator with Coupled Nonlinear Oscillators, *IEEE Transactions biomedical engineering*, 1987, Vol. BME – 34, No. 4, April, pp. 297–306. DOI: 10.1109/TBME.1987.326091
13. Pavlov A. N., Pavlova O. N. Primenenie vejvlet-analiza v issledovanijah struktury tochechnyh processov, *Pis'ma v ZhTF*, 2006, Vol. 32, No. 21, pp. 11–17.
14. Sugakov V. J. Osnovi sinergetiki. Kiiv:Oberegi, 2001, 288 p.
15. Bogoljubov M. M. Asimptotichni metodi v teorii nelinejnih rivnjan'. Kyiv, Nauka, 1992, 312 p.
16. Bozhokin S. V. Nepreryvnoe vejvlet-preobrazovanie i tochno reshaemaja model' nestacionarnyh signalov, *ZhTF*, 2012, Vol. 82, No. 7, pp. 8–13.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.2

Бабаков Р. М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики и компьютерных технологий Донецкого национального университета, г. Винница, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ АППАРАТУРНЫХ ЗАТРАТ В МИКРОПРОГРАММНОМ АВТОМАТЕ С ОПЕРАЦИОННЫМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДОВ

Актуальность. Решена задача определения аппаратурных затрат в логической схеме микропрограммного автомата с канонической структурой и микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов и различными способами формирования кодов операций переходов.

Цель работы – получение аналитических выражений для определения аппаратурных затрат в исследованных структурах микропрограммных автоматов в зависимости от параметров автомата при использовании элементного базиса программируемых логических интегральных схем.

Метод. На основании результатов VHDL-моделирования получены экспериментальные значения аппаратурных затрат в типовых функциональных узлах цифровых устройств. В качестве единицы измерения аппаратурных затрат используются LUT-элементы, являющиеся регулярными структурными элементами ПЛИС типа FPGA. Среди типовых функциональных узлов исследованы комбинационная логическая схема, мультиплексор, схема арифметико-логической операции и регистр. Путем аппроксимации экспериментальных данных получены аналитические выражения для определения аппаратурных затрат в типовых функциональных узлах в зависимости от параметров узлов. Путем замены параметров типовых функциональных узлов параметрами структурных блоков исследованных структур микропрограммных автоматов выполнено преобразование аналитических выражений для определения аппаратурных затрат в типовых функциональных узлах в аналогичные выражения для отдельных структурных блоков автоматов.

Результаты. Для каждой из исследованных структур микропрограммных автоматов получены аналитические выражения для определения суммарных аппаратурных затрат в логической схеме автомата.

Выводы. Полученные аналитические выражения учитывают структурные особенности автоматов Мили и Мура и могут быть использованы для решения задачи определения области эффективного применения структур микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов.

Ключевые слова: микропрограммный автомат, операционный автомат переходов, аппаратурные затраты, VHD-моделирование, аналитическая аппроксимация.

НОМЕНКЛАТУРА

МПА – микропрограммный автомат;
СФП – схема формирования переходов;
РП – регистр памяти;
СФМО – схема формирования микроопераций;
ОАП – операционный автомат переходов;
HDL – hardware description language, язык описания аппаратуры;
ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;
 T – код текущего состояния автомата;
 X – множество входных сигналов автомата;
 F – функция переходов автомата;

D_r – отдельный выходной сигнал СФП;
 Y – множество микроопераций, формируемых автоматом;
 U_k – каноническая структура МПА;
 U_1 – структура МПА с ОАП, в которой операция переходов сопоставляется отдельному переходу автомата;
 U_2 – структура МПА с ОАП, в которой операция переходов сопоставляется отдельному состоянию автомата;
 Z – код операции переходов;
 Z – структурный блок МПА с ОАП, формирующий код операции переходов Z ;
 $ОЧ$ – операционная часть;
 D – код следующего состояния МПА с ОАП;

O_i – произвольная операция переходов;
 H^{U_K} – затраты аппаратуры в структуре МПА U_K ;
 H^{U_1} – затраты аппаратуры в структуре МПА U_1 ;
 H^{U_2} – затраты аппаратуры в структуре МПА U_2 ;
 $H_{\text{СФП}}^{U_K}$ – затраты аппаратуры в блоке СФП структуры U_K ;
 $H_{\text{РП}}^{U_K}$ – затраты аппаратуры в блоке РП структуры U_K ;
 $H_{\text{СФМО}}^{U_K}$ – затраты аппаратуры в блоке СФМО структуры U_K ;
 $H_{\text{ОЧ}}^{U_1}$ – затраты аппаратуры в блоке ОЧ структуры U_1 ;
 $H_{\text{РП}}^{U_1}$ – затраты аппаратуры в блоке РП структуры U_1 ;
 $H_Z^{U_1}$ – затраты аппаратуры в блоке Z структуры U_1 ;
 $H_{\text{СФМО}}^{U_1}$ – затраты аппаратуры в блоке СФМО структуры U_1 ;
 $H_{\text{ОЧ}}^{U_2}$ – затраты аппаратуры в блоке ОЧ структуры U_2 ;
 $H_{\text{РП}}^{U_2}$ – затраты аппаратуры в блоке РП структуры U_2 ;
 $H_Z^{U_2}$ – затраты аппаратуры в блоке Z структуры U_2 ;
 $H_{\text{СФМО}}^{U_2}$ – затраты аппаратуры в блоке СФМО структуры U_2 ;
LUT – look-up table, таблица поиска;
КЛС – комбинационная логическая схема;
 $H_{\text{КЛС}}$ – затраты аппаратуры на реализацию системы булевых уравнений;
 $H_{\&}$ – затраты аппаратуры на реализацию конъюнктивной части системы булевых уравнений;
 $H_{\vee}$ – затраты аппаратуры на реализацию конъюнктивной части системы булевых уравнений;
 t – количество уравнений в системе булевых уравнений;
 q – количество различных термов в системе булевых уравнений;
 s – количество различных переменных в системе булевых уравнений;
 l – количество термов в одном уравнении системы булевых уравнений;
 k_1 – коэффициент минимизации системы булевых уравнений;
 r – разрядность типового цифрового функционального узла;
 $H_{\text{МХ}}$ – затраты аппаратуры на реализацию мультиплексора;
 d – количество каналов мультиплексора;
 $H_{\text{ОП}}$ – затраты аппаратуры на реализацию операции переходов;
 k_2 – коэффициент масштабирования величины $H_{\text{ОП}}$;
 H_{RG} – затраты аппаратуры на реализацию регистра;
 M – количество состояний автомата;

R – разрядность кода состояния автомата;
 B – количество переходов автомата;
 N_d – количество комбинационных схем в операционной части ОАП;
 k_3 – доля переходов, реализуемых с помощью операций переходов, от общего числа переходов B ;
 k_4 – доля условных переходов от общего числа переходов B ;
 k_5 – средняя доля термов в одном уравнении системы булевых уравнений от общего числа термов, используемых в системе;
 k_6 – коэффициент эффективности использования базиса блочной памяти ПЛИС FPGA по отношению к базису LUT-элементов.

ВВЕДЕНИЕ

Для координации работы узлов цифровых вычислительных систем используется устройство управления, одной из форм реализации которого является микропрограммный автомат [1, 2]. При этом актуальной научной проблемой является разработка новых оптимизированных структур МПА, характеризующихся в общем случае меньшими аппаратными затратами в логической схеме автомата по сравнению с известными структурами. При использовании аппаратных затрат в качестве критерия оптимальности возникает задача исследования аппаратных затрат в логической схеме МПА, позволяющая провести сравнительный анализ эффективности оптимизированных структур МПА по сравнению с канонической структурой.

Одним из факторов при выборе подхода к исследованию аппаратных затрат является элементный базис, используемый при реализации логической схемы автомата. В настоящее время для этих целей применяется базис ПЛИС – FPGA, CPLD или ASIC. Данный базис поддерживается рядом современных САПР, использующих для определения аппаратных затрат модели цифровых устройств, реализованные на одном из языков описания аппаратуры (HDL). HDL-моделирование сегодня является одним из этапов проектирования цифровых устройств и дает возможность не только определить затраты аппаратуры, но и проверить логическую правильность работы схемы устройства.

Объектом исследования в работе выступает микропрограммный автомат с операционным автоматом переходов – МПА, в структуре которого используется представление функции переходов в виде множества частичных функций. Предметом исследования являются аппаратные затраты в логической схеме МПА с операционным автоматом переходов. Цель работы состоит в экспериментальном определении численных значений аппаратных затрат в логической схеме МПА с ОАП и МПА с канонической структурой при различных значениях параметров автомата, а также в их последующей аналитической аппроксимации. Получение аналитических выражений для определения аппаратных затрат в исследуемых структурах МПА позволит в дальнейшем определить эффективность оптимизированных структур МПА по сравнению с известными каноническими струк-

турами. Это, в свою очередь, даст возможность определить область эффективного применения МПА с операционным автоматом переходов, выражаемую совокупностью диапазонов значений параметров автомата.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Основной научной задачей, решаемой в данной работе, является исследование зависимости аппаратных затрат в логической схеме микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов от параметров автомата. В качестве метода исследования используется моделирование отдельных структурных блоков МПА на языке VHDL в САПР Xilinx ISE, позволяющее получить экспериментальные значения аппаратных затрат для выбранных серий ПЛИС. Для экспериментально полученных наборов данных исследуется возможность их аппроксимации аналитическими выражениями, позволяющими определить затраты аппаратуры в зависимости от параметров автомата.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На рис. 1 приведена каноническая структура микропрограммного автомата [2]. Структура образована следующими блоками:

– СФП: формирует множество сигналов $D_r \in \Phi$, реализуя, таким образом, функцию переходов автомата

$$\Phi = \Phi(T, X). \quad (1)$$

– РП: служит для хранения состояния автомата, реализуется на триггерах D-типа;

– СФМО: формирует множество микроопераций $y_n \in Y$, реализуя тем самым функцию выходов МПА, определяемую выражением (2) в случае автомата Мили и выражением (3) в случае автомата Мура:

$$Y = Y(T, X), \quad (2)$$

$$Y = Y(T). \quad (3)$$

При наличии на рис. 1 связи, обозначенной пунктиром, данная структура соответствует автомату Мили, при отсутствии связи – автомату Мура. Условимся в рамках данной работы обозначать каноническую структуру МПА символом U_K .

В настоящее время известно множество методов оптимизации аппаратных затрат в логической схеме МПА, приводящих к различным структурным реализациям автомата [3, 4].

В работе [5] предложена структура микропрограммного автомата с операционным автоматом переходов, в рамках данной работы обозначаемая символом U_1 и включающая следующие блоки (рис. 2).

– ОАП: реализует функцию переходов автомата, представляемую в виде множества частичных функций;

– Z: управляет работой ОАП путем формирования кода Z операции переходов, выполняемой ОАП над кодом текущего состояния в данном такте работы автомата:

$$Z = Z(T, X); \quad (4)$$

– СФМО: организована и функционирует аналогично СФМО в каноническом МПА.

Внутренняя организация ОАП представляет собой совокупность блоков ОЧ и РП (рис. 3) [6].

Здесь ОЧ представляет собой набор комбинационных схем, каждая из которых соответствует одной из операций переходов O_i :

$$O_i = O_i(T, X). \quad (5)$$

Выходы комбинационных схем мультиплексируются под управлением сигналов Z в код состояния перехода D, поступающий в РП.

В работе [7] предложена модификация структуры U_1 , в которой код операции переходов определяется только кодом T текущего состояния автомата (структура U_2 , рис. 4).

Здесь блок Z реализует функцию

$$Z = Z(T), \quad (5)$$

позволяя сопоставлять отдельную операцию переходов каждому состоянию автомата. По принципу функционирования и внутренней организации боков структура U_2 подобна структуре U_1 .

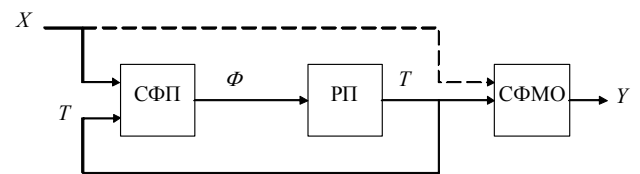


Рисунок 1 – Структурная схема канонического МПА

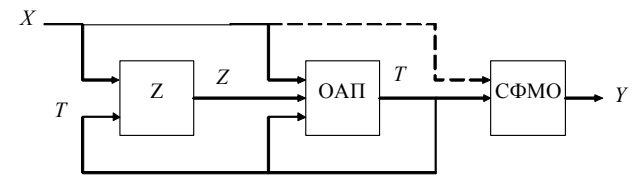


Рисунок 2 – Структурная схема МПА с ОАП U_1

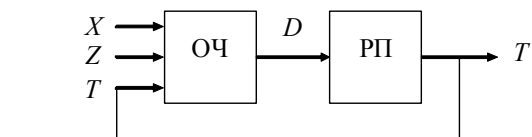


Рисунок 3 – Структурная организация операционного автомата переходов

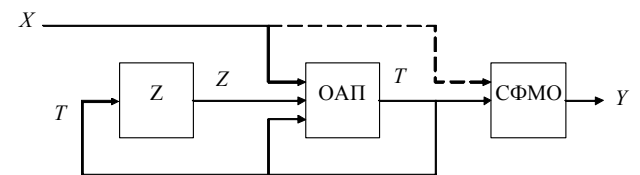


Рисунок 4 – Структурная схема МПА с ОАП U_2

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Обозначим численно выраженные аппаратные затраты в структурах U_K , U_1 и U_2 символами H^{U_K} , H^{U_1} и H^{U_2} соответственно. Каждая из данных величин есть сумма аппаратных затрат во всех блоках соответствующей структуры. Для канонического МПА H^{U_K} определяется выражением (6), для структур U_1 и U_2 – выражениями (7) и (8) соответственно.

$$H^{U_K} = H_{СФП}^{U_K} + H_{РП}^{U_K} + H_{СФМО}^{U_K}; \quad (6)$$

$$H^{U_1} = H_{OЧ}^{U_1} + H_{РП}^{U_1} + H_Z^{U_1} + H_{СФМО}^{U_1}; \quad (7)$$

$$H^{U_2} = H_{OЧ}^{U_2} + H_{РП}^{U_2} + H_Z^{U_2} + H_{СФМО}^{U_2}. \quad (8)$$

Отдельные блоки в исследуемых структурах имеют внутреннюю архитектуру, схожую с типовыми функциональными узлами, такими как комбинационная схема, регистр, мультиплексор, модуль памяти, сумматор, сдвигатель и другие. Например, в каноническом МПА блоки СФП и СФМО синтезируются по системе булевых уравнений, а РП представляет собой стандартный синхронный регистр. Исключение могут составлять узлы в блоке ОЧ, реализующие нестандартные операции переходов. Однако в большинстве случаев разбиение таких узлов на более простые не вызывает сложностей. Это дает возможность провести исследование аппаратурных затрат не для структурных блоков, а для соответствующих им функциональных узлов, отождествив полученные результаты со структурными блоками.

Исследования аппаратурных затрат выполним путем VHDL-моделирования с использованием САПР Xilinx ISE [8, 9]. В качестве единицы измерения аппаратурных затрат используем LUT-элементы, являющиеся регулярными функциональными узлами FPGA. С целью экономии LUT-элементов допускается использование базиса блочной памяти FPGA (там, где это позволяет архитектура синтезируемого блока) [10].

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследуем аппаратурные затраты в стандартных функциональных узлах цифровых схем в зависимости от параметров узлов. Рассмотрим следующие узлы:

- комбинационная схема, реализующая систему булевых уравнений;
- мультиплексор;
- узлы, реализующие арифметико-логические операции;
- регистр.

Исследуем комбинационную схему, реализующую систему булевых уравнений.

Пусть система булевых функций, представленных в форме ДНФ, содержит s аргументов, t функций и q про-

межуточных термов. Условимся рассматривать систему, в которой каждое уравнение содержит в правой части ровно l булевых термов. Будем также полагать, что число конъюнктивных компонент в каждом терме одинаково и равно s . Также будем учитывать, что величина l не может превышать общее количество q промежуточных термов.

Затраты аппаратуры $H_{\text{КЛС}}$ на реализацию системы булевых функций, представленных в форме ДНФ, есть сумма двух величин: затраты $H_{\&}(q, s)$ на реализацию конъюнктивных термов и затраты $H_{\vee}(t, l)$ на их дизъюнктивное объединение в отдельные уравнения:

$$H_{\text{КЛС}} = H_{\&} + H_{\vee}. \quad (9)$$

Поскольку функции $H_{\&}$ и $H_{\vee}$, согласно аргументам, являются взаимно независимыми, каждая из них может быть исследована отдельно.

Аппаратурные затраты $H_{\&}$, затрачиваемые на реализацию множества термов, используемых в системе булевых функций, зависят от количества термов q и числа переменных в каждом терме. Исследуем зависимость $H_{\&}(q, s)$, для чего воспользуемся VHDL-моделью, в которой каждый терм связан с отдельным выходным сигналом. Пример модели для системы БФ (10) дан на рис. 5.

$$\begin{cases} y_1 = \bar{x}_1 x_2 x_3 x_4 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4; \\ y_2 = x_1 x_2 \bar{x}_3 x_4 \vee x_1 x_2 x_3 x_4 \vee x_1 \bar{x}_2 \bar{x}_3 x_4. \end{cases} \quad (10)$$

Определим следующие условия проведения эксперимента:

- величины q и s независимо изменяются в диапазоне [10, 100] с шагом 10;
- в каждом терме количество конъюнктивных компонент одинаково и равно s ; компонентами термов могут выступать как сами входные переменные, так и их инверсные значения;
- выбор термов из множества всех возможных термов выполняется произвольным образом; при этом функция минимизации схемы (например, совместная реализация фрагментов термов) возлагается на САПР;
- определение экспериментальных значений $H_{\&}$ осуществляется с помощью САПР Xilinx ISE 9.2i для ПЛИС типа FPGA фирмы Xilinx.

1	entity KLS is
2	port(x : in std_logic_vector (1 to 4);
3	q : out std_logic_vector (1 to 5));
4	end KLS;
5	
6	architecture A_KLS of KLS is
7	signal nx : std_logic_vector (1 to 4);
8	begin
9	nx <= not x;
10	q(1) <= nx(1) and x(2) and x(3) and x(4);
11	q(2) <= x(1) and nx(2) and nx(3) and x(4);
12	q(3) <= nx(1) and nx(2) and nx(3) and nx(4);
13	q(4) <= x(1) and x(2) and nx(3) and x(4);
14	q(5) <= x(1) and x(2) and x(3) and x(4);
15	end A_KLS;

Рисунок 5 – Пример VHDL-модели для исследования зависимости $H_{\&}$

Как показали исследования, существующие у фирмы Xilinx серии ПЛИС типа CPLD (CoolRunner-2, XC9500XL) имеют недостаточную ресурсную емкость для реализации используемых VHDL-моделей. При этом возможность использования нескольких CPLD для реализации одного проекта в рамках данных исследований не рассматривалась.

В табл. 1 приведены измеряемые в LUT-элементах значения функции $H_{\&}(q, s)$ для ПЛИС марки XC3S1500 серии Spartan 3. Исследования показали, что для ПЛИС марки XC4VLX15 серии Virtex 4 результаты оказываются идентичными. Указанные микросхемы являются типичными представителями ПЛИС типа FPGA и имеют достаточную ресурсную емкость для реализации VHDL-модели при значениях $q=s=100$. Используемая VHDL-модель не имеет привязки к конкретным маркам ПЛИС, что позволяет при необходимости повторить эксперимент для ПЛИС других серий.

Дополнительные исследования показывают, что замена одних булевых термов другими (такого же размера) незначительно влияет на количество аппаратных затрат. Также незначительным оказывается использование в системе уравнений булевых термов различной длины при сохранении в пределах системы средней длины термов, равной s .

Исследования показали возможность аппроксимации содержимого табл. 1 выражением (11).

$$H_{\&} = \frac{q \cdot s}{10}. \quad (11)$$

Величину $H_{\vee}$ в выражении (9) условимся рассматривать как функцию двух аргументов: $H_{\vee}(t, l)$. Для ее

экспериментального исследования воспользуемся VHDL-моделью, пример которой дан на рис. 6.

В данной модели входные порты q соответствуют булевым переменным, отождествляемым с конъюнктивными термами ДНФ. Сигналы y , подключенные к выходным портам, соответствуют булевым функциям реализуемой системы. В примере на рис. 6 система включает $t=5$ уравнений по $l=7$ термов в каждом, причем в уравнениях системы задействованы $q=20$ различных булевых термов.

Исследуем зависимость $H_{\vee}(t, l)$. Определим следующие условия эксперимента:

- величина t изменяется в диапазоне $[1, 10]$ с шагом 1;
- величина l изменяется в диапазоне $[10, 100]$ с шагом 10;
- в каждом уравнении количество термов одинаково и равно l ;

– определение численных значений $H_{\vee}$ осуществляется с помощью САПР Xilinx ISE для ПЛИС типа FPGA фирмы Xilinx, в которых аппаратные затраты измеряются в LUT-элементах.

В табл. 2 приведены измеряемые в LUT-элементах экспериментальные значения функции $H_{\vee}(t, l)$ для ПЛИС марки XC3S1500 серии Spartan 3.

Аппроксимируем содержимое табл. 2 следующим выражением:

$$H_{\vee} = \frac{t \cdot l}{4}. \quad (12)$$

С учетом (11) и (12), выражение (9) принимает следующий вид:

$$H_{\text{КЛС}} = \frac{q \cdot s}{10} + \frac{t \cdot l}{4}. \quad (13)$$

Таблица 1 – Значения функции $H_{\&}(q, s)$ для ПЛИС XC3S1500 серии Spartan 3, LUT

$q \backslash s$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	23	40	59	68	82	94	108	115	126	142
20	38	70	107	140	167	188	224	238	255	276
30	49	96	133	160	199	227	251	276	300	325
40	54	114	159	173	209	251	284	324	358	382
50	67	139	191	202	257	294	343	383	420	476
60	71	147	218	228	311	357	438	462	517	552
70	76	167	234	264	351	419	480	534	598	667
80	82	180	253	322	395	453	513	593	680	720
90	94	196	301	346	476	557	624	758	779	843
100	104	215	352	414	531	630	729	826	897	948

1	entity KLS is
2	port(q : in std_logic_vector (1 to 20);
3	y : out std_logic_vector (1 to 5));
4	end KLS;
5	architecture A_KLS of KLS is
6	begin
7	y(1) <= q(1) or q(2) or q(3) or q(4) or q(5) or q(6) or q(7);
8	y(2) <= q(8) or q(9) or q(10) or q(11) or q(12) or q(13) or q(14);
9	y(3) <= q(1) or q(3) or q(5) or q(7) or q(15) or q(17) or q(19);
10	y(4) <= q(2) or q(4) or q(6) or q(8) or q(16) or q(18) or q(20);
11	y(5) <= q(5) or q(9) or q(11) or q(15) or q(16) or q(19) or q(20);
12	end A_KLS;

Рисунок 6 – Пример VHDL-модели для исследования функции

Для систем булевых уравнений с параметрами q, s, l , t фактические затраты аппаратуры могут оказаться меньше вычисленных по формуле (13) за счет минимизации. Для учета данного фактора введем в (13) специальный коэффициент $k_1 \in (0; 1]$:

$$H_{\text{КЛС}} = k_1(H_{\&} + H_{\vee}) = k_1 \left(\frac{q \cdot s}{10} + \frac{t \cdot l}{4} \right). \quad (14)$$

При $k_1=1$ минимизация не приводит к снижению аппаратных затрат; при $k_1 \rightarrow 0$ затраты аппаратуры на реализацию системы булевых уравнений стремятся к нулю.

Исследуем аппаратурные затраты на реализацию мультиплексора.

Мультиплексор является частью структур U1 и U2 и отсутствует в структуре UK. В МПА с ОАП мультиплексор используется в операционной части для мультиплексирования результата, а также может встречаться в комбинационных схемах, реализующих операции переходов. В обоих случаях выходом мультиплексора является R -разрядный код состояния автомата, причем R обычно лежит в диапазоне от 4 бит (для МПА малой сложности) до 10 и выше для МПА большой и сверхбольшой сложности) [2]. При этом число мультиплексируемых направлений для мультиплексора в операционной части ОАП соответствует количеству используемых комбинационных схем и может достигать нескольких десятков.

Исследуем аппаратурные затраты H_{MX} на реализацию r -разрядного мультиплексора с d направлений, для чего воспользуемся VHDL-моделью, пример которой приведен на рис. 7. Модификация модели для различных параметров r и d осуществляется путем изменения соответствующих констант в разделе package.

Исследования, подобные проведенным выше, показали возможность аппроксимации экспериментальных значений функции $H_{MX}(r, d)$ выражением (17). Дан-

ное выражение получено на основе экспериментальных значений при включенной опции «Mux Extraction» в САПР Xilinx ISE, дающей около 10% экономии аппаратных затрат при синтезе мультиплексора.

$$H_{MX} = r \left(\frac{d}{2} + 1 - \lceil \log_2(d+1) \rceil + \lceil \log_2 d \rceil \right). \quad (15)$$

Исследуем аппаратурные затраты в узлах, реализующих следующие арифметико-логические операции:

- сложение с константой, вычитание константы, инкремент, декремент;
- умножение на константу;
- деление на константу, равную степени двойки;
- логический сдвиг;
- инверсия;
- конъюнкция с константой, дизъюнкция с константой, сумма по модулю 2 с константой.

Затраты аппаратуры в данных узлах исследовались в зависимости от разрядности операнда r . По результатам исследований были сделаны следующие выводы:

- затраты аппаратуры на реализацию r -разрядных операций сложения с константой, вычитания константы, инкремента и декремента приблизительно одинаковы и составляют r LUT-элементов;
- затраты на реализацию r -разрядной операции умножения на константу при использовании встроенных в ПЛИС блоков умножения равны нулю;
- затраты на реализацию r -разрядной операции деления на константу, равную степени двойки, равны нулю;
- затраты на реализацию r -разрядной операции инверсии равны нулю;
- затраты на реализацию r -разрядных операций конъюнкции с константой, дизъюнкции с константой и суммы по модулю 2 с константой одинаковы и составляют r LUT-элементов.

Обобщив данные результаты, примем измеряемые в LUT-элементах затраты аппаратуры $H_{\text{ОП}}$ на реализацию

```

1  package my is
2      constant r: integer := 7;  -- Разрядность выхода
3      constant d: integer := 10; -- Число входных направлений
4      type InputBus is array (0 to d-1) of bit_vector (1 to r);
5  end package;
6
7  use my.all;
8
9  Entity MX is
10     port (X: in InputBus;
11           Y: out bit_vector (1 to r);
12           sel: in natural range 0 to d-1);
13 end entity MX;
14
15 Architecture MX_A of MX is
16 begin
17     Y <= X (sel);
18 end architecture MX_A;
```

Рисунок 7 – VHDL-модель для исследования функции H_{MX}

любой операции переходов в операционной части ОАП равными разрядности операнда r . Для обеспечения возможности анализа аппаратных затрат в случае усложнения используемых операций переходов (например, при использовании в составе одной ОП нескольких арифметико-логических операций) введем коэффициент $k_2 \in (0; \infty)$, позволяющий масштабировать величину $H_{\text{ОП}}$. Таким образом, функцию $H_{\text{ОП}}(r)$, измеряемую в LUT-элементах, зададим следующим выражением:

$$H_{\text{ОП}} = k_2 r. \quad (16)$$

Исследуем аппаратные затраты на реализацию регистра.

Исследования показали, что при использовании VHDL-модели g -разрядного синхронного регистра с функцией сброса в нулевое состояние затраты аппаратуры H_{RG} , выраженные в LUT-элементах, численно равны разрядности регистра:

$$H_{RG} = r. \quad (17)$$

Отметим, что помимо LUT элементов, при синтезе регистра используются триггеры, входящие, наряду с LUT-элементами, в состав функциональных блоков ПЛИС типа FPGA и не учитываемые выражением (17).

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На основании выражений (14)–(17) были построены аналитические выражения для определения аппаратных затрат в МПА со структурами U_K , U_1 и U_2 . Пусть исследуемые структуры МПА характеризуются параметрами, перечисленными в табл. 3.

Поясним некоторые параметры из табл. 3.

k_2 – коэффициент масштабирования аппаратных затрат на реализацию одной операции переходов. При исследовании структур МПА с ОАП значение k_2 берется одинаковым для каждой ОП, входящей в операционный автомат переходов, являясь, таким образом, усредняющим коэффициентом масштабирования.

k_3 – коэффициент, равный отношению числа переходов МПА с ОАП, реализуемых с помощью тех или иных операций переходов, к общему числу B переходов автомата. Соответственно, число переходов автомата, реали-

зуемых каноническим способом, равно $(1 - k_3)B$. При $k_3 = 1$ все переходы автомата реализуются с помощью множества операций переходов. При $k_3 = 0$ все переходы реализуются каноническим способом, и МПА с ОАП вырождается в МПА U_K .

k_4 – коэффициент, равный отношению количества условных переходов к общему числу B переходов автомата. При этом число безусловных переходов равно $(1 - k_4)B$. При $k_4 = 1$ в автомате отсутствуют безусловные переходы, при $k_4 = 0$ – условные.

k_5 – коэффициент, равный отношению среднего количества термов в одном уравнении системы булевых уравнений к общему числу термов, используемых в системе. Общее число термов зависит от того, что выступает в качестве аргументов системы уравнений. Например, в системе булевых уравнений, реализующей схему СФМО, общее число термов в случае автомата Мили не превышает числа переходов B , в случае автомата Мура – числа состояний M . Данный коэффициент позволяет определить для заданной КЛС значение параметра l в выражении (14). При $k_5 \rightarrow 1$ дизъюнктивная часть системы каждого уравнения является максимально сложной, при $k_5 \rightarrow 0$ – максимально простой. Отметим, что при $k_5 = 1$ каждое уравнение содержит все возможные термы системы, вырождаясь в булеву функцию «константа 1». Аналогично при $k_5 = 0$ в уравнениях системы отсутствуют булевы термы, что позволяет сопоставить каждому уравнению булеву функцию «константа 0».

В общем случае для разных систем булевых уравнений значение k_5 различно. Однако в рамках проводимых исследований данный коэффициент берется одинаковым для каждого структурного блока, синтезируемого по системе булевых уравнений, являясь, таким образом, усреднением соответствующих коэффициентов для разных КЛС.

k_6 – коэффициент, позволяющий выразить в LUT-элементах аппаратные затраты на реализацию КЛС (блока, синтезируемого по системе булевых уравнений), при использовании базиса блочной памяти (Block RAM, BRAM) ПЛИС типа FPGA [8].

Таблица 3 – Параметры исследуемых структур МПА

Обозначение	Описание
M	количество состояний
R	разрядность структурного кода состояния
B	количество переходов
N	количество микроопераций
N_d	количество комбинационных схем в блоке ОЧ операционного автомата переходов
k_1	коэффициент минимизации КЛС, $k_1 \in (0; 1]$
k_2	коэффициент сложности схем КС в блоке ОЧ, $k_2 \in (0; \infty)$
k_3	доля переходов, реализуемых с помощью операций переходов, от общего числа переходов B , $k_3 \in [0; 1]$
k_4	доля условных переходов от общего числа переходов B , $k_4 \in [0; 1]$
k_5	средняя доля термов в одном уравнении системы булевых уравнений от общего числа термов, используемых в системе, $k_5 \in (0; 1)$
k_6	коэффициент эффективности использования базиса блочной памяти ПЛИС FPGA по отношению к базису LUT-элементов, $k_5 \in (0; \infty)$

Значение $k_6 < 1$ следует выбирать в том случае, если используемая ПЛИС содержит большое количество встроенных блоков памяти, не использующихся в рамках текущего проекта. В этом случае реализация КЛС в базе блочной памяти оказывается более предпочтительной, чем на LUT-элементах, поскольку относительная ценность используемых при этом ресурсов ПЛИС оказывается ниже. При $k_6 = 1$ ценность данных базисов для используемой ПЛИС считается одинаковой. При $k_6 > 1$ реализация КЛС в базе LUT-элементов считается более предпочтительной по сравнению с базисом блочной памяти.

Использование коэффициента k_6 возможно в том случае, если:

1. Используемая ПЛИС содержит достаточное количество блочной памяти.

2. Число входных сигналов синтезируемой КЛС не превышает числа адресных входов блока памяти, которое в современных ПЛИС FPGA фирмы Xilinx не превышает 16 [8]. Например, в МПА Мура схема СФМО имеет число входных сигналов, равное R , и в случае $R \leq 16$ (а также при достаточной разрядности строки данных для реализации множества микроопераций) может быть синтезирована в базе блочной памяти. В МПА Мили на входы схемы СФМО дополнительно подаются L сигналов логических условий, что при средних значениях L ($L=30$, [2]) приводит к невозможности использования блочной памяти ПЛИС для синтеза СФМО.

Подстановка параметров, перечисленных в табл. 3, в выражения (14)–(17) позволила получить аналитические выражения для определения аппаратных затрат в отдельных блоках исследуемых структур, указанных в правой части выражений (6)–(8). Например, для каждой из трех исследуемых структур аппаратные затраты в регистре памяти определяются выражением (17), где $r=R$:

$$H_{PI}^{U_K} = H_{PI}^{U_1} = H_{PI}^{U_2} = R. \quad (18)$$

Это позволило выразить правые части выражений (6)–(8) через параметры, указанные в табл. 3, получив в результате аналитические выражения для определения аппаратных затрат в исследуемых структурах МПА. Так, выражениям (6)–(8) в случае автомата Мили соответствуют выражения (19)–(21), в случае автомата Мура – выражения (22)–(24).

$$\begin{aligned} H^{U_K} &= H_{СФП}^{U_K} + H_{PI}^{U_K} + H_{СФМО}^{U_K} = \\ &= k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B R}{4} \right) + \\ &\quad + R + k_1 \frac{k_5 B N}{4}; \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} H^{U_1} &= H_{OЧ}^{U_1} + H_{PI}^{U_1} + H_Z^{U_1} + H_{СФМО}^{U_1} = \\ &= \left(k_2 R (N_d - 1) + k_1 (1 - k_3) k_5 \frac{B R}{4} + \right. \\ &\quad \left. + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2 (N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) \right) + \\ &\quad + R + k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{k_5 B \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + k_1 \frac{k_5 B N}{4}; \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} H^{U_2} &= H_{OЧ}^{U_2} + H_{PI}^{U_2} + H_Z^{U_2} + H_{СФМО}^{U_2} = \\ &= \left(k_2 R (N_d - 1) + k_1 (1 - k_3) k_5 \frac{B R}{4} + \right. \\ &\quad \left. + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2 (N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) \right) + \\ &\quad + R + k_1 k_6 \left(\frac{M R}{10} + \frac{k_5 M \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + \\ &\quad + k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B N}{4} \right); \end{aligned} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} H^{U_K} &= H_{СФП}^{U_K} + H_{PI}^{U_K} + H_{СФМО}^{U_K} = \\ &= k_1 \left(\frac{B \left((1-k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1-k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B R}{4} \right) + \\ &\quad + R + k_1 k_6 \left(\frac{M R}{10} + \frac{k_5 M N}{4} \right); \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned}
H^{U_1} &= H_{ОЧ}^{U_1} + H_{РП}^{U_1} + H_Z^{U_1} + H_{СФМО}^{U_1} = \\
&= \left(k_2 R(N_d - 1) + k_1(1 - k_3)k_5 \frac{BR}{4} + \right. \\
&+ R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) + \\
&+ R + k_1 \left(\frac{B \left((1 - k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1 - k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 B \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + \\
&+ k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 MN}{4} \right); \quad (23)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
H^{U_2} &= H_{ОЧ}^{U_2} + H_{РП}^{U_2} + H_Z^{U_2} + H_{СФМО}^{U_2} = \\
&= k_2 R(N_d - 1) + R \left(\frac{N_d}{2} + 1 - \lceil \log_2(N_d + 1) \rceil + \lceil \log_2 N_d \rceil \right) + \\
&+ k_1(1 - k_3) \left(\frac{B \left((1 - k_4)R + k_4 \left(R + \frac{k_4 B}{2(M - (1 - k_4)B)} \right) \right)}{10} + \frac{k_5 BR}{4} \right) + \\
&+ R + k_1 k_6 \left(\frac{MR}{10} + \frac{k_5 M \lceil \log_2 N_d \rceil}{4} \right) + k_1 k_6 \frac{k_5 MN}{4}. \quad (24)
\end{aligned}$$

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные в данной работе выражения для определения аппаратурных затрат могут быть использованы в дальнейших исследованиях при решении задачи определения области эффективного применения структур МПА с операционным автоматом переходов. Под областью эффективного применения в данном случае понимается совокупность значений или диапазонов значений параметров автомата, перечисленных в табл. 3, при которых структуры U_1 и U_2 обладают меньшими аппаратурными затратами по сравнению с каноническим МПА.

Практическое применение выражения (19)–(24) могут найти в САПР цифровых устройств управления, ориентированных на использование элементного базиса ПЛИС типа FPGA. Возможность аналитического определения аппаратурных затрат в различных структурах МПА позволяет автоматизировать процесс выбора оптимальной структуры МПА для имплементации заданного алгоритма управления при условии использования аппаратурных затрат в качестве критерия оптимальности.

7 БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в соответствии с приоритетным направлением развития науки и техники в Украине до 2020 года «Информационные и коммуникационные технологии» и содержат некоторые результаты НИР «Исследование эффективности микропрограммного

автомата с операционным автоматом переходов» (номер государственной регистрации 0117U004097), финансируемой за счет средств исполнителей.

ВЫВОДЫ

В настоящей работе для трех структур микропрограммных автоматов предложены аналитические выражения для определения аппаратурных затрат в логической схеме автомата на основании значений параметров автомата при реализации схемы в базисе программируемых логических интегральных схем типа FPGA. Результаты получены для МПА с канонической структурой и двух структур МПА с ОАП, использующих различные способы формирования кодов операций переходов. В качестве метода исследований аппаратурных выбрано моделирование типовых функциональных узлов цифровых вычислительных систем с использованием языка VHDL в САПР Xilinx ISE.

По результатам моделирования получены экспериментальные значения аппаратурных затрат на реализацию типовых функциональных узлов, выраженные в LUT-элементах, являющихся традиционной единицей измерения ресурсов кристалла ПЛИС в случае FPGA. Проведенная аппроксимация полученных экспериментальных данных дала возможность получить аналитические выражения для определения аппаратурных затрат в типовых функциональных узлах цифровых систем. Замена в данных выражениях параметров узлов параметрами автоматов позволила отождествить данные выражения с отдельными структурными блоками МПА. Результирующие выражения для определения аппаратурных затрат в исследованных структурах МПА представляют собой сумму аппаратурных затрат в отдельных блоках соответствующих структур и различаются для автоматов Мили и Мура, а также учитывают ряд особенностей проектирования и используемого элементного базиса.

Дальнейшее направление исследований состоит в использовании результатов, полученных в данной работе, при оценке эффективности рассмотренных структур МПА с ОАП в сравнении с каноническим автоматом для различных значений параметров автомата при использовании аппаратурных затрат в качестве критерия оптимальности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов / В. М. Глушков. – М. : Физматгиз, 1962. – 476 с.
2. Баранов С. И. Синтез микропрограммных автоматов / С. И. Баранов. – Л. : Энергия, 1979. – 232 с.
3. Баркалов А. А. Синтез микропрограммных устройств управления / А. А. Баркалов, А. В. Палагин. – Киев : Институт кибернетики НАН Украины, 1997. – 135 с.
4. Баркалов А. А. Синтез устройств управления на программируемых логических устройствах / А. А. Баркалов. – Донецк, ДонНТУ, 2002. – 262 с.
5. Бабаков Р. М. Операционное формирование кодов состояний в микропрограммных автоматах / Р. М. Бабаков, А. А. Баркалов, // Кибернетика и системный анализ. – 2011. – № 2. – С. 21–26.
6. Бабаков Р. М. Операционный автомат переходов / Р. М. Бабаков, И. В. Ярош // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия «Вычислительная техника и автоматизация». Выпуск 1 (28). – Красноармейск : ДонНТУ, 2015. – С. 33–40.
7. Бабаков Р. М. Формирование кодов операций переходов в микропрограммном автомате с операционным автоматом пе-

- реходов / Р. М. Бабаков, И. В. Ярош // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета. Серия «Информатика, кибернетика и вычислительная техника». Выпуск 1 (20). – Красноармейск, ДонНТУ, 2015. – С. 11–16.
8. Тарасов И. Е. Разработка цифровых устройств на основе ПЛИС Xilinx с применением языка VHDL / И. Е. Тарасов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2005. – 252 с.
9. Зотов В. Ю. Проектирование встраиваемых микропроцессорных систем на основе ПЛИС фирмы Xilinx. / В. Ю. Зотов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 520 с.
10. Макфилд К. Проектирование на ПЛИС. Курс молодого бойца / Клайв Макфилд. – М. : Издательский дом «Додэка-XXI», 2007. – 408 с.

Статья поступила в редакцию 20.04.2017.
После доработки 22.06.2017.

Бабаков Р. М.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной механики та комп'ютерних технологій Донецького національного університету, м. Вінниця, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТУРНИХ ВИТРАТ В МІКРОПРОГРАМНОМУ АВТОМАТІ З ОПЕРАЦІЙНИМ АВТОМАТОМ ПЕРЕХОДІВ

Актуальність. Вирішено задачу визначення апаратних витрат в логічній схемі мікропрограмного автомата з канонічною структурою та мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів і різними способами формування кодів операцій переходів.

Мета роботи – отримання аналітичних виразів для визначення апаратних витрат у досліджуваних структурах мікропрограмних автоматів в залежності від параметрів автомата при використанні елементного базису програмувальних логічних інтегральних схем.

Метод. На основі результатів VHDL-моделювання одержані експериментальні значення апаратних витрат у типових функціональних вузлах цифрових пристроїв. У якості одиниці виміру апаратних витрат використовуються LUT-елементи, що є регулярними структурними елементами ПЛИС типу FPGA. Серед типових функціональних вузлів досліджені комбінаційна логічна схема, мультиплексор, схема арифметико-логічної операції та регістр. Шляхом апроксимації експериментальних даних отримані аналітичні вирази для визначення апаратних витрат в типових функціональних вузлах в залежності від параметрів вузлів. Шляхом заміни параметрів типових функціональних вузлів параметрами структурних блоків досліджених структур мікропрограмних автоматів виконано перетворення аналітичних виразів для визначення апаратних витрат в типових функціональних вузлах в аналогічні вирази для окремих структурних блоків автоматів.

Результати. Для кожної із досліджених структур мікропрограмних автоматів отримані аналітичні вирази для визначення сумарних апаратних витрат в логічній схемі автомата.

Висновки. Отримані аналітичні вирази враховують структурні особливості автоматів Мілі і Мура та можуть бути використані для вирішення задачі визначення області ефективного застосування структур мікропрограмного автомата з операційним автоматом переходів.

Ключові слова: мікропрограмний автомат, операційний автомат переходів, апаратні витрати, VHDL-моделювання, аналітична апроксимація.

Babakov R. M.

PhD, Associate professor of the Department of Applied Mechanics and Computer Technologies of the Donetsk national university, Vinnytsya, Ukraine

RESEARCH OF HARDWARE EXPENSES IN MICROPROGRAM FINAL-STATE MACHINE WITH DATAPATH OF TRANSITIONS

Context. The problem of determining the hardware expenses in the logical circuit of a microprogram final-state machine with a canonical structure and a microprogram final-state machine with datapath of transition and various ways of generating of codes of transition operations was solved.

Objective. The goal of the work is the obtaining of analytical expressions for determining the hardware expenses in the investigated structures of microprogram final-state machine depending on parameters of the automaton when using the elemental basis of programmable logical integrated circuits.

Method. Based on results of HDL simulation, the experimental values of hardware expenses in typical functional blocks of digital devices are obtained. As a unit of measurement of hardware expenses, LUT elements, which are regular structural elements of the FPGA, are used. Among the typical functional blocks, a combinational logical circuit, a multiplexer, an arithmetic-logical operation circuit, and a register are investigated. By approximating the experimental data, analytical expressions for determining the hardware expenses in typical functional blocks, depending on the parameters of the blocks, are obtained. By replacing the parameters of typical functional blocks with parameters of the structural blocks of the microprogram final-state machines being researched, the analytical expressions to determine the hardware expenses in typical functional nodes are transformed in analogous expressions for separate structural blocks of automata.

Results. For each of the researched structures of microprogram final-state machines, analytical expressions for determining the total hardware expenses in the logical circuit of the automaton are obtained.

Conclusions. Received analytical expressions take into account the structural features of the Mealy and Moore automata and can be used to solve the problem of determining the field of effective application of the microprogram final-state machine structures with datapath of transitions.

Keywords: microprogram final-state machine, datapath of transition, hardware expenses, VHD-modeling, analytical approximation.

REFERENCES

1. Glushkov V. M. Sintez tsifrovih avtomatov. Moscow, Fizmatgiz, 1962, 476 p.
2. Baranov S. I. Sintez mikroprogramnih avtomatov. Leningrad, Energiya, 1979, 232 p.
3. Barkalov A. A., Palagin A. V. Sintez mikroprogramnih ustroystv upravleniya. Kiev, Institut kibernetiki NAN Ukraini, 1997, 135 p.
4. Barkalov A. A. Sintez ustroystv upravleniya na programmirovaniy logicheskikh ustroystv. Donetsk, DonNTU, 2002, 262 p.
5. Babakov R. M., Barkalov A. A. Operatsionnoe formirovaniye kodov sostoyaniy v mikroprogramnykh avtomatakh, *Kibernetika i sistemnyy analiz*, 2011, No. 2, pp. 21–26.
6. Babakov R. M., Yarosh I. V. Operatsionnyy avtomat perehodov *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: «Vichislitel'naya tekhnika i avtomatizatsiya»*. Vipusk 1 (28). Krasnoarmeysk, DonNTU, 2015, pp. 33–40.
7. Babakov R. M., Yarosh I. V. Formirovaniye kodov operatsiy perehodov v mikroprogrammnom avtomate s operatsionnim avtomatom perehodov, *Sbornik nauchnykh trudov Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya «Informatika, kibernetika i vichislitel'naya tekhnika»*, Vipusk 1 (20). Krasnoarmeysk, DonNTU, 2015, pp. 11–16.
8. Tarasov I. E. Razrabotka tsifrovih ustroystv na osnove PLIS Xilinx s primeneniye yazyka VHDL. Moscow, Goryachaya liniya, Telekom, 2005, 252 p.
9. Zotov V. U. Proektirovaniye vstraivayemykh mikroprotsessornykh sistem na osnove PLIS firmi Xilinx. Moscow, Goryachaya liniya, Telekom, 2006, 520 p.
10. Maksfild K. Proektirovaniye na PLIS. Kurs molodogo boytsa. Moscow, Izdatelskiy dom «Dodeka-XXI», 2007, 408 p.

¹Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, Россия

²Старший преподаватель кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, Россия

МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДАЧ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Актуальность. Решена задача количественной оценки вероятностных и временных характеристик подсистемы планирования задач узлов для проектирования распределенных систем реального времени. Объектом исследования являлся циклический алгоритм планирования задач на основе приоритетов (round robin priority driven preemptive scheduler), используемый в распределенных fieldbus-сетях.

Цель работы – построение модели и разработка способа количественной оценки вероятностных и временных характеристик подсистемы планирования задач узла: задержки и интервалов времени решения задач, интенсивности информационной нагрузки на каналы промышленной fieldbus-сети.

Метод. Для решения задачи использован аппарат теории вероятностей. Предложен граф состояний и переходов модели описывающий функционирование циклического алгоритма планирования задач узла. Получены аналитические соотношения для оценки основных вероятностных и временных характеристик модели подсистемы планирования задач: среднего времени задержки обработки задачи, среднего интервала времени между решением задач, интенсивности информационной нагрузки на каналы fieldbus-сети. Предложенные модель и способ оценки отличаются от известных детализацией ранее не анализируемыми в совокупности значимыми параметрами функционирования алгоритма: разнородными уровнями приоритетов, количеством задач по приоритетам, конфигурационными свойствами задач, задержками операций и частотой наступления событий планировщика, процедурами прерывания и дообслуживания задач, и другими параметрами.

Результаты. Разработанная модель и способ количественной оценки вероятностных и временных характеристик подсистемы планирования задач с циклическим алгоритмом обработки на основе приоритетов.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность и адекватность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач проектирования распределенных систем реального времени с заданными временными характеристиками. В ходе проектирования инструментарий будет использован для определения: допустимого числа программных модулей планировщика и распределения среди них приоритетных и не приоритетных задач обрабатываемых узлом в зависимости от частоты технологических событий и заданных требований по задержке обработки.

Ключевые слова: планирование задач, реальное время, циклический алгоритм, приоритет-ориентированный алгоритм, модель, вероятностные и временные характеристики, распределенная система, промышленная сеть, fieldbus.

НОМЕНКЛАТУРА

ТЗКС – точка завершения критической секции (точка входа);

ЦНПЗ – цикл неприоритетных задач;

ЦПЗ – цикл приоритетных задач;

a – приоритет модуля планировщика задач;

b_i – индикатор формирования модулем i информации для передачи по сети;

c_i – среднее количество подряд следующих циклов обработки задачи i планировщика;

d_i – интервал времени между проверкой текущего и предшествующего модулей;

i – текущий номер модуля планировщика;

j – номер анализируемого модуля планировщика;

N – количество модулей планировщика задач;

n – количество приоритетных модулей планировщика задач;

m – количество неприоритетных модулей планировщика задач;

p_i – вероятность наступления технологического события для модуля i планировщика;

T_n – время проверки технологического условия;

T_z – время обработки задачи планировщика;

T_v – время обработки информации в точке входа;

T_{ci} – средний интервал времени между событиями модуля i планировщика задач;

T_i – среднее полное время обработки задачи модуля i планировщика;

t_i – средний интервал времени между проверками модуля с номером i ;

t_i^y – средний интервал времени между успешными проверками модуля i ;

t_n^H – средняя продолжительность пустого (неуспешного) цикла приоритетных задач;

t_{zi} – среднее время завершения цикла после проверки модуля i ;

t_{ni} – среднее время с начала цикла (точки входа) и до начала обработки модуля i ;

u_i – порядок закона распределения Эрланга интервала времени проверки модуля i ;

y – начальный порядок закона распределения Эрланга времени между проверками модулей;

λ_Σ – суммарная интенсивность нагрузки узла на канал передачи сети.

ВВЕДЕНИЕ

Циклический алгоритм (Round-robin) – один из наиболее распространенных алгоритмов, используемых

программными планировщиками задач в вычислениях реального времени. Широкое распространение данный алгоритм получил благодаря детерминированности интервалов времени решения задач в системах мягкого и жесткого реального времени. Различные модификации алгоритма применяются при пакетном планировании задач передачи данных в компьютерных и сенсорных сетях, для сбора, обработки и передачи технологической (измерительной и управляющей) информации в распределенных системах управления (Distributed control system), в том числе построенных на основе сетевых fieldbus-технологий. Соответственно применяются алгоритмы: Round Robin, Weighted Round Robin, Deficit Round Robin and Modified Deficit Round-Robin [1, 2]; Priority-based, Rate Monotonic Analysis, Earliest Deadline First [3–6]. Область применения алгоритмов определена эффективностью обработки планируемых задач в зависимости от их количества, приоритетности, периодичности/спорадичности [5, 6], вычислительной сложности, продолжительности и других параметров. Количественная оценка эффективности алгоритма производится по характеристикам детерминированности временных интервалов и времени реакции на их выполнение, эффективности использования времени. Для анализируемого в работе алгоритма планирования на основе приоритетов (priority-based), применяемого в распределенных системах с событийно-ориентированным (event-driven) принципом обработки задач и передачи информации узлами (контроллерами) fieldbus-сети (LonWorks, BacNet, CAN, EIB/KNX и др.), важнейшей характеристикой является время реакции и решения планируемой задачи. Данное время представляет собой интервал между спорадическим моментом необходимости решения задачи (называемым в работе событием) и ее фактическим решением. Возможное запаздывание в решении задачи негативно влияет на показатели качества управления (время переходного процесса, перерегулирование) техническими объектами и технологическими процессами, отражается на качестве реализуемой продукции. Таким образом, необходимым является проектирование планировщика задач узла с временными характеристиками не хуже требуемых. Это актуализирует решение задачи построения адекватной модели циклического алгоритма планирования задач и оценки ее вероятностных и временных характеристик.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе производится анализ и построение адекватной аналитической модели алгоритма планирования задач [7, 8], управляемого приоритетом (priority-driven preemptive scheduler), применяемого на узлах распределенных (на основе fieldbus) систем управления, и разработка способа количественной оценки времени решения задач. Решение требует принятия во внимание множества значимых параметров и особенностей функционирования планировщика узла систем, ранее не анализируемых в совокупности в известной литературе: разнородные уровни приоритетов, количество задач по приоритетам, конфигурационные свойства задач, задержки на реализацию элементарных операций пла-

нировщика, включая проверки и задачи, частота (закон, случайные интервалы времени) наступления событий планировщика, прерывание и дообслуживание задач, и другие параметры [7, 8].

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проектированию и оценке информационных характеристик распределенных систем управления на основе fieldbus-сетей посвящено большое число публикаций, в том числе распространенной промышленной сети LonWorks [7–15]. В значительной части публикаций выполняется оценка транспортной задержки, как основной характеристики системы [9–11, 13, 15]. Это обусловлено применением в анализируемых fieldbus-сетях случайного метода множественного доступа с контролем несущей (CSMA). Примерами таких fieldbus сетей являются сети LonWorks, BacNet с протоколами доступа predictive p-persistent CSMA, EtherNet/IP, Modbus/TCP с протоколами CSMA/CD, Can, Knx/Eib и DeviceNet с протоколами CSMA/CA (NDA) [7, 8]. При этом известна и высокая значимость задержки планировщика задач узла сети, вносимой обработкой измерительной и управляющей информации, которая часто превышает транспортное запаздывание [7, 8, 12, 14]. Не смотря на отмеченное, анализу данной тематики посвящено значимо меньшее число публикаций. Как будет показано, это обусловлено многопараметричностью создаваемой модели и сложностью ее количественного расчета. Данная трудноразрешимая задача решается учеными по разному.

В работах [7, 12] выполнен анализ и систематизированы факторы работы планировщика, потенциально влияющие на задержку обработки информации. В работе [12] проведен натурный эксперимент и получены типовые значения задержек и законы их распределения для различных элементарных операций. Полученные результаты подтверждают и расширяют результаты полученные в ходе испытаний технологии, опубликованные в [7, 8]. В [7] также предложены аналитические соотношения для приближенной оценки задержки вносимой планировщиком задач в обработку информации. Недостаток предложенных формул заключается в отсутствии учета значимых параметров (см. постановку задачи) функционирования планировщика узла системы, что нарушает адекватность оценок. В [14] предложена имитационная модель планировщика задач в системе моделирования AnyLogic. В модели учтены основные значимые факторы функционирования и выполнена адекватная оценка задержки. Недостаток модели заключается в высоких временных затратах получения статистически корректных оценок. Таким образом, малая проработанность темы и проблема адекватности, высокие временные затраты на оценку, требуют разработки новой аналитической модели функционирования алгоритма планирования задач и способа оценки его вероятностных и временных характеристик.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Циклический алгоритм планирования задач определяет последовательность обработки собранной узлом измерительной и поступившей из сети управляющей информации. На каждом такте цикла выполняется рабо-

та с программным модулем планировщика, состоящим из проверки «when» условия события (изменения технологической информации) и решения задачи «task» обработки данной информации (рис. 1).

Управление планированием осуществляется на основе приоритета и номера задачи. Выделяют два уровня приоритета: приоритетный и непероритетный. Цикл решения задач состоит из цикла приоритетных задач (ЦПЗ), в рамках которого происходит последовательная обработка приоритетных модулей, и цикла непероритетных задач (ЦНПЗ), который наступает только после завершения ЦПЗ и характеризуется обработкой только одного модуля планировщика (в порядке следования) (рис. 1). При успешной проверке «when» события модуля выполняется решение соответствующей задачи и переход в точку завершения критической секции (ТЗКС, точку входа), после чего начинается новый ЦПЗ.

Модель алгоритма планирования может быть представлена в виде графа (рис. 2), основными элементами которого являются: вершины – состояния входа «в», проверки «п», задачи «з» (сокращения используются в индексах параметров), характеризуемые соответствующими задержками T обработки информации; ребра – вероятности p переходов между состояниями модели.

Предложенный граф модели позволяет учитывать следующие параметры планировщика. Основные параметры планировщика: количество модулей N , включая n – приоритетных, m – непероритетных; последовательность и приоритеты модулей $a \in \{0, 1\}$. Индивидуальные параметры модулей: тип модуля (входящий, исходящий, комбинированный), конфигурационные свойства, функция изменения контролируемой величины [7, 8].

Количественная оценка характеристик алгоритма планирования требует выполнения стохастического анализа модели с использованием математического аппарата теории вероятностей. Для упрощения решаемой задачи в работе вначале будет выполнен анализ модели цикла приоритетных задач алгоритма ($n=N, m=0$) (рис. 3).

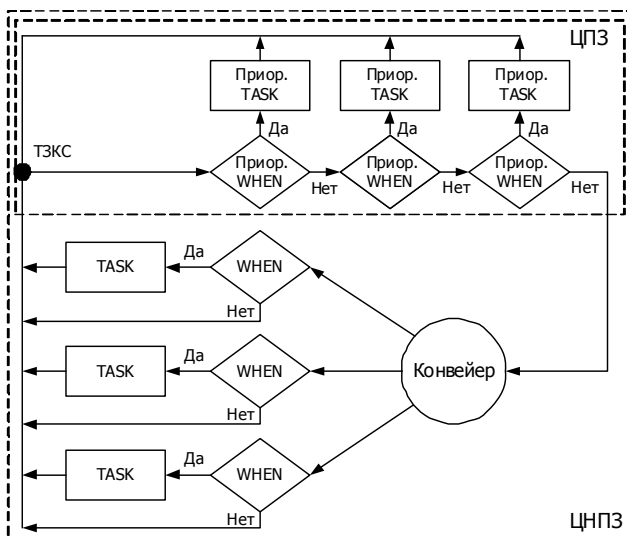


Рисунок 1 – Схема циклического алгоритма планирования задач

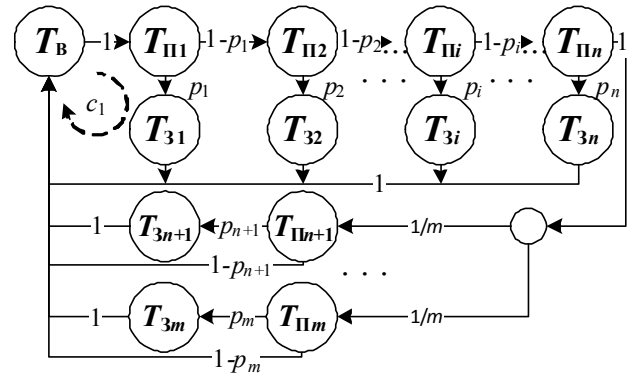


Рисунок 2 – Модель алгоритма

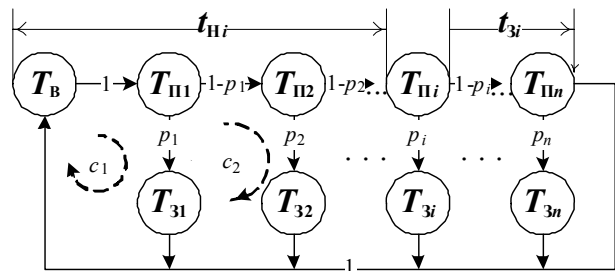


Рисунок 3 – Модель цикла приоритетных задач алгоритма

Время реакции планировщика на произошедшее (потенциальное) в системе событие изменяется в широких диапазонах. Это связано с спорадическими моментами наступления событий в системе. Поэтому время до начала обработки модуля может изменяться от 0, когда событие наступает в момент начала обработки проверки модуля, и до значения, когда событие наступает в момент завершения обработки модуля планировщика. Предполагая статистическую независимость временных интервалов работы планировщика задач от случайных моментов событий, среднее время T_i обработки задачи $i \in \{1..N\}$ (рис. 3):

$$T_i = [t_{zi} + t_{ni} + (T_{pi} + T_{zi} + T_B)]/2 = [t_i + (T_{pi} + T_{zi} + T_B)]/2, \quad (1)$$

где t_{zi} – время завершения текущего цикла приоритетных задач, t_{ni} – время от начала цикла до начала i проверки, t_i – средний интервал времени между проверками модуля i .

Типовое время задержки T_{pi} , T_{zi} , T_B состояний модели [7, 12] примем распределенным по экспоненциальному закону. Это позволит получить оценку наивысшей средней задержки решения задач. Для упрощения аналитических выкладок и уменьшения количества исходных данных в модели примем равными для всех модулей задержки обработки информации в точке входа, проверки и задачи, а их сумму, определяющую полное время обработки одного модуля, обозначим $T_{пзв}$. Выполним оценку неизвестных в формуле (1) величин.

Среднее время завершения цикла t_{zi} после проверки модуля i , безотносительно к результату проверки, можно определить суммой времени завершения цикла на текущем и на каждом последующем модуле $j = i + 1..n$ с уче-

том вероятности наступления события p_j и при условии, что все предшествующие модулю j проверки неуспешны:

$$t_{3i} = \begin{cases} T_3 \cdot p_i & \text{при } i = n, \\ T_3 \cdot p_i + \sum_{j=i+1}^n \left[\prod_{k=i}^{j-1} (1-p_k) [T_{\Pi} + p_j \cdot T_3] \right] & \text{при } i < n. \end{cases} \quad (2)$$

Вероятность p_i успешного результата проверки (наступления события) модуля i определяется временем t_i , прошедшим с момента последней проверки модуля, и средним временем T_i между событиями этого модуля. Учитывая экспоненциальный характер интервалов времени между событиями, вероятность:

$$p_i = 1 - e^{-t_i/T_i}. \quad (3)$$

Среднее время t_{Π} с начала цикла (точки входа) и до начала обработки модуля i представляет собой сумму задержек: точки входа, проверки $(i-1)$ предшествующих модулей, решения промежуточных задач с вероятностью p_j , что создает фрагментацию цикла задач с возможным повторным выполнением данного фрагмента цикла c_i раз подряд. Таким образом для $i = 1$ время с начала цикла равняется времени обработки точки входа T_{Π} . Проверке модуля с номером $i = 2$ предшествует время обработки точки входа T_{Π} и $(i-1)$ предшествующих модулю i неуспешных проверок, а также количество c_{i-1} фрагментов цикла, каждый из которых продолжительностью T_{Π} . При $i > 2$ задержка до начала обработки модуля t_{Π} возрастает за счет фрагментации и выражается в увеличении количества проверок и решаемых задач, возникающих в результате повторного обслуживания модулей предшествующих обработке целевого модуля i :

$$t_{\Pi i} = \begin{cases} T_{\Pi} & \text{при } i = 1, \\ T_{\Pi} + T_{\Pi} \cdot (i-1) + T_{\Pi} \cdot c_{i-1} & \text{при } i = 2, \\ T_{\Pi} + T_{\Pi} \cdot \left[i-1 + \sum_{j=2}^{i-1} ((j-1) \cdot c_j) \right] + \\ + T_{\Pi} \cdot \left[\sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{i-1} \left\{ c_k, k = j, \right. \right. \\ \left. \left. 1 + c_k, k > j \right\} \right] & \text{при } i > 2, \end{cases} \quad (4)$$

где c_i – среднее число подряд следующих циклов обработки модуля i ,

$$c_i = p_i + p_i^2 + p_i^3 + p_i^4 + \dots = \frac{p_i}{1-p_i}. \quad (5)$$

Средний интервал времени t_i между проверками модуля $i > 1$ может быть оценен суммой времени между проверками предыдущего модуля и разницы d_i между временем текущей и предыдущей проверок:

$$t_i = t_1 + \sum_{k=1}^i d_k = t_{i-1} + [d_i] = t_{i-1} + [(t_{3i} + t_{\Pi i}) - (t_{3i-1} + t_{\Pi i-1})] = t_{i-1} + [d_{\Pi i} + d_{3i}]. \quad (6)$$

Разница $d_{\Pi i}$ во времени t_{Π} от начала цикла для модулей i и $(i-1)$ по формуле (4):

$$d_{\Pi i} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = 1, \\ T_{\Pi} + T_{\Pi} \cdot c_{i-1} & \text{при } i = 2, \\ T_{\Pi} \cdot [1 + (i-2) \cdot c_{i-1}] + T_{\Pi} \times \\ \times \left[\sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{i-1} \left\{ c_k, k = j \vee k = i-1 \right\} \right] & \text{при } i > 2. \end{cases} \quad (7)$$

Разница d_{3i} времени завершения цикла для соседних модулей по формуле (2):

$$d_{3i} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = 1, \\ (p_i - p_{i-1}) \cdot T_3 - (1 - p_{i-1}) \cdot (T_{\Pi} + p_i \cdot T_3) + \\ + p_{i-1} \cdot \sum_{j=i}^{n-1} \left[\prod_{k=i}^j (1-p_k) \cdot (T_{\Pi} + p_j \cdot T_3) \right] & \text{при } i > 1. \end{cases} \quad (8)$$

Упрощенно, с учетом малости величин p_i , p_{i-1} , формула (8):

$$d_{3i} = \begin{cases} 0 & \text{при } i = 1, \\ -(1 - p_{i-1}) \cdot T_{\Pi} & \text{при } i > 1. \end{cases} \quad (9)$$

Тогда разница d_i между средним временем проверки текущего и предыдущего модулей определяется суммой выражений (7) и (9):

$$d_i = \begin{cases} 0 & \text{при } i = 1, \\ T_{\Pi} + T_{\Pi} \cdot c_{i-1} - (1 - p_{i-1}) \cdot T_{\Pi} & \text{при } i = 2, \\ T_{\Pi} \cdot [1 + (i-2) \cdot c_{i-1}] + T_{\Pi} \times \\ \times \left[\sum_{j=1}^{i-1} \prod_{k=j}^{i-1} \left\{ c_k, k = j \vee k = i-1 \right\} \right] - (1 - p_{i-1}) \cdot T_{\Pi} & \text{при } i > 2. \end{cases} \quad (10)$$

Расчет t_i по формуле (6) требует оценки значения интервала времени t_1 между моментами проверки первого модуля планировщика. Величина изменяется в диапазоне $[T_{\Pi} \dots T_{\Pi} + n \cdot T_{\Pi} + T_3]$. Нижняя граница T_{Π} характерна для высокой вероятности ($=1$) наступления события первого модуля (режим перегрузки). Верхняя граница диапазона обусловлена вариантом ожидания завершения полного цикла приоритетных задач (режим низкой загрузки) с решением последней. Близким к верхней границе является значение времени $(T_{\Pi} + nT_{\Pi})$, характеризующее практическую малую загрузку планировщика задач. С увеличением загруженности планировщика (без перегрузки) величина времени изменяется за счет возможного, с вероятностью p , выполнения задачи и составляет величину $(T_{\Pi} + jT_{\Pi} + pT_3)$, где j – номер проверки, на которой закончится цикл. Указанное означает, что интервал времени между проверками первого модуля определяется нагрузкой, создаваемой всеми модулями $1 \dots N$ планировщика. Таким образом, для типовых низкой и средней загрузки интервал времени между

проверками первого модуля может быть выбран равным времени завершения полного «пустого» (без успешных проверок) цикла обработки ($T_b + nT_n$). Значение данной величины сильно влияет на характеристики модели и поэтому при большой загрузке планировщика оценки временных задержек могут быть занижены. Таким образом, определены все неизвестные величины для определения времени задержки (1) для алгоритма с приоритетными задачами.

Выполним анализ модели с учетом $m > 0$ неприоритетных модулей (рис. 2), образующих множество M дополнительных модулей планировщика. С учетом дисциплины обслуживания только одного модуля планировщика за время неприоритетного цикла, интервал времени между проверками первого приоритетного модуля составит величину t_1 равную $(T_b + (n + 1) \cdot T_n)$. При этом выражение (6) для оценки времени t_i приоритетных модулей остается без изменений. Средний интервал времени t_i между проверками каждого неприоритетного модуля $i \in M = \{n + 1..n + m\}$ представляет сумму продолжительности обработки m циклов приоритетных задач и времени t обработки циклов неприоритетных задач:

$$t_i = m \cdot t_n^H + t, \quad (11)$$

где t_n^H – полное время цикла приоритетных задач:

$$t_n^H = t_n(1 + c_n), \quad (12)$$

$$t = T_n + \sum_{j \in (M \setminus \{i\})} (T_n + p_j \cdot T_3). \quad (13)$$

Расчет времени задержки t по формуле (13) может быть выполнен с учетом пренебрежимо малой величины вероятности p_i . Тогда $t = (m-1) \cdot T_n$, а вероятности срабатывания каждого модуля p могут быть последовательно определены по формуле (3). Вероятности могут быть уточнены путем итеративного пересчета с учетом времени t_i оцениваемого по формулам (11–13). Таким образом, интервал времени между проверками неприоритетных модулей $i \in M$

$$t_i = t_n(1 + c_n) \cdot m + T_n + \sum_{j \in (M \setminus \{i\})} (T_n + p_j \cdot T_3). \quad (14)$$

Расчет времени задержки решения планируемых приоритетных и неприоритетных задач выполняется по формуле (1).

Частным вариантом планировщика является вариант с отсутствием приоритетных задач. В данном случае обработке цикла неприоритетных задач предшествует точка входа, и поэтому в (12), (14) $t_n = t_0 = T_b$, и $c_n = 0$.

При проектировании планировщика задач узла распределенной системы реального времени важно выполнять оценку не только создаваемой им временной задержки, но и интенсивности λ_Σ формируемых им информационных сообщений, которые будут передаваться по каналам промышленной сети. Анализ данной величины необходим для оценки транспортных задержек [15]. Расчет интенсивности можно произвести суперпозицией интенсивности каждого модуля планировщика задач. Индивидуальную интенсивность модуля можно оценить

через величину обратную интервалу времени t_i^Y между его последовательными успешными проверками (задачами). Суммарная интенсивность нагрузки узла на канал передачи сети:

$$\lambda_\Sigma = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cdot b_i = \sum_{i=1}^N \frac{1}{t_i^Y} \cdot b_i, \quad (15)$$

где b_i – индикатор (0/1) формирования модулем i информации для передачи.

Интервал времени t_i^Y ($t_i^Y > t_i$) потока успешных проверок модуля i может быть найден путем прореживания потока всех проверок модуля средним значением времени T_i между информационными событиями модуля. Прореживание должно производиться экспоненциальным потоком событий модуля с известной интенсивностью $1/T_i$. Сложность корректного прореживания заключается в неопределенности типа распределения времени проверок исходного потока проверок модулей. Известно только среднее время между проверками t_i , определяемое формулой (11). Основываясь на результатах имитационных исследований [14], примем, что распределение интервалов времени потока проверок модулей подчиняется закону Эрланга, а его параметры зависят от номера модуля и создаваемой им интенсивности нагрузки. Эмпирически порядок u_i закона распределения для модуля i выбран:

$$u_i = \left\lceil y + 1 - \frac{i}{y} \right\rceil, \quad (16)$$

где, квадратные скобки в выражении определяют целую часть значения; y – начальный порядок закона распределения Эрланга, зависит от вероятности срабатывания модулей и предшествующего им числа проверок i :

$$y = n - \sum_{i=1}^n (i \cdot p_i). \quad (17)$$

Таким образом, поток Эрланга успешных проверок t_i^Y модуля i представляет собой сумму u_i экспоненциальных потоков с параметром интенсивности u_i/t_i . Прореживание потока осуществляется простой выборкой из указанного распределения случайных значений, больших или равных значениям экспоненциального потока событий модуля с интенсивностью $1/T_i$, что определяет условие превышения среднего интервала времени между событиями модуля i . Математическое ожидание среднего интервала времени между успешными проверками модуля i определяется расчетом среднего арифметического значения полученного прореженного распределения. Интенсивность информационной нагрузки узла на канал промышленной сети определяется по формуле (15).

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Выполним анализ среднего времени задержки обработки задач планировщика узла с использованием предложенной модели и способа оценки характеристик. Исследуем три различных сценария загрузки планировщи-

ка задач (табл. 1): C1) однородная информационная нагрузка модулей с низкой частотой технологических событий (большим интервалом времени между событиями); C2) однородная нагрузка с высокой частотой событий; C3) разнородная (контрастная) нагрузка модулей. Анализ предложенных сценариев и сравнение полученных результатов с результатами имитационного моделирования [14] позволит установить адекватность разработанной аналитической модели и способа оценки. Примем типовые исходные данные для моделирования (табл. 1) [7]: $N(n=N)$, T_b , T_n , T_z , T_{ci} .

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты оценки времени задержки обработки задач планировщика узла промышленной сети систематизированы в табл. 2 по анализируемым сценариям функционирования. Результаты аналитического (А) моделирования дополнены оценками полученными имитационным (И) моделированием [14], а также расчетом относительного отклонения полученных результатов.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнительный анализ результатов моделирования (табл. 2) позволил сделать следующие основные выводы. Анализ характера изменения среднего времени задержки обработки задач подтверждает известные из литературы [7] и создает новые положения. Получены следующие основные результаты:

- с ростом номера решаемой задачи возрастает время ее обработки, что объясняется сокращением частоты проверок модулей с большими номерами за счет фрагментации;
- с изменением номера модуля время обработки задачи изменяется практически линейно (при однородной нагрузке модулей планировщика задач);
- рост времени задержки обработки задачи, следующей за модулем с высокой частотой событий, носит скачкообразный характер.

Отклонение результатов разработанной аналитической модели от имитационной [14] не превышает значения 15%. Исследование других сценариев функционирования, не представленных в работе, при различном количестве модулей программы N , подтверждает указанный результат. Во многом полученные отклонения

результатов аналитической модели объясняются принятыми допущениями (16), (17) в расчетах порядка распределения Эрланга интервалов времени t_i между последовательными проверками модулей планировщика задач. Полученные результаты подтверждают адекватность разработанной аналитической модели планировщика задач и способа оценки его задержек.

Предложенная в работе модель и способ анализа задержек будут использоваться при проектировании подсистем планирования задач на узлах распределенных систем реального времени с целью обеспечения заданных временных характеристикам обработки технологической информации. Указанное предполагает использование предложенного математического аппарата для определения: допустимого числа программных модулей планировщика и распределения среди них приоритетных и не приоритетных задач обрабатываемых узлом в зависимости от частоты технологических событий и заданных требований по задержке обработки.

ВЫВОДЫ

В работе построена аналитическая модель и предложен способ количественной оценки вероятностных и временных характеристик циклического алгоритма планирования задач узла, управляемого приоритетами, в распределенной fieldbus-системе реального времени. Впервые при оценке характеристик учтена ранее не анализируемая в известных аналитических моделях наиболее полная совокупность значимых параметров и особенностей функционирования алгоритма: разнородные уровни приоритетов, количество задач по приоритетам, конфигурационные свойства задач, задержки операций и частота наступления событий планировщика, процедуры прерывания и дообслуживания задач, и другие параметры. Как показано, это обеспечивает адекватность, приемлемую точность и низкую вычислительную сложность аналитических расчетов характеристик подсистемы планирования задач узла по сравнению с известной имитационной моделью. Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности эффективного проектирования программной подсистемы планирования задач узла распределенной системы мягкого реального времени с требуемыми временными характеристиками.

Таблица 1 – Исходные данные (временные параметры указаны в мс)

Сцен.	N	T_b	T_n	T_z	T_{c1}	T_{c2}	T_{c3}	T_{c4}	T_{c5}	T_{c6}	T_{c7}	T_{c8}	T_{c9}	T_{c10}
C1	10	1	0,3	1	1000									
C2					50									
C3					200		10		200		10		200	

Таблица 2 – Результаты сравнения аналитических и имитационных оценок времени задержки

№ задачи	Сценарии функционирования								
	C1			C2			C3		
	А	И	О (%)	А	И	О (%)	А	И	О (%)
1	4,189	4,266	1,805	4,322	4,268	1,265	4,263	4,211	1,235
2	4,214	4,256	0,987	4,664	4,460	4,574	4,313	4,234	1,866
3	4,198	4,240	0,991	4,866	4,715	3,203	4,266	4,336	1,614
4	4,234	4,269	0,820	5,109	5,047	1,228	5,432	5,508	1,380
5	4,225	4,264	0,915	5,384	5,468	1,536	5,739	5,629	1,954
6	4,237	4,305	1,580	6,141	6,041	1,655	5,850	5,821	0,498
7	4,224	4,296	1,676	6,569	6,826	3,765	5,669	5,945	4,643
8	4,252	4,337	1,960	7,079	7,919	10,607	8,799	10,346	14,953
9	4,285	4,340	1,267	9,381	9,498	1,232	9,935	11,047	10,066
10	4,280	4,373	2,127	10,354	11,882	12,860	10,280	12,048	14,675

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- David Neels Pon Kumar D. An Enhanced Scheduling Scheme for QoS in Mobile WiMAX Networks / D. David Neels Pon Kumar, Jithin Raj, K. Arun Kumar, K. Murugesan // International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT). – 2012. – Vol. 2, № 5. – P. 163–169.
- Park W. Scheduler Design for Multiple Traffic Classes in OFDMA Networks / W. Park, S. Cho, S. Bahk // in Proc. IEEE Int. Conf. Communications, Istanbul, Turkey. – 2006. – Vol. 2. – P. 790–795.
- Кавалеров М. В. Повышение эффективности планирования с фиксированными приоритетами задач жесткого реального времени на основе применения г-алгоритма для формирования запросов этих задач / М. В. Кавалеров, Н. Н. Матушкин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2014. – №12. – С. 14–19.
- Кавалеров М. В. Новый алгоритм назначения параметров задач реального времени с линейными интервальными ограничениями в условиях планирования с фиксированными приоритетами, основанный на сокращенном переборе приоритетов / М. В. Кавалеров, Н. Н. Матушкин // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2013. – №11. – С. 012–017.
- Embedded System Software. Module 6. Version 2. EE IIT, Kharagpur 1 Lesson 30 Real-Time T. 31437008-Realtime-Task-Scheduling-2. – 128 p. – Access mode: <http://www.nptel.ac.in/courses/108105057/Pdf/Lesson-30.pdf>
- Marcus Völz. Real-Time Systems: Event-Driven Scheduling / Marcus Völz, Hermann Härtig [Electronic resource]. – 2003. – Access mode: <https://os.inf.tu-dresden.de/Studium/RTS/WS2013/05-EventDriven.pdf>
- Дитрих Д. LON-технология, построение распределенных приложений / Д. Дитрих, Д. Лой, Г. Ю. Швайнциер // Пер. с нем. – под ред. О. Б. Низамутдинова. – Пермь : Звезда, 1999 – 242 с.
- LonTalk protocol specification: ANSI/CEA-709.1-B. – United States, 2006.
- Moshe Kam. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks / Moshe Kam // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering. – Edmonton, Canada: IEEE, 2005. – P. 319–326.
- Mi kowicz M. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA / M. Mińkowicz // Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International, 2007. – Vol. 7. – P. 3535–3559.
- Mińkowicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol / M. Mińkowicz // Computer Standards & Interfaces. Nederland: Elsevier Science Publishing Company, 2009. – P. 548–556.
- Mińkowicz M. Latency characteristics of event-driven task scheduler embedded in neuron chip / M. Mińkowicz // IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. – 2007. – Vol. 7, № 12. – P. 132–149.
- Buchholz P. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type / P. Buchholz, J. Plonnigs // Proc. of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2004, Wien, 2004. – P. 127–136.
- Даденков С. А. Разработка имитационной модели уровня приложений узла LonWorks сети / С. А. Даденков, В. В. Чмыков // Материалы конференции «Автоматизированные системы управления и информационные технологии», 2014. – Режим доступа: http://etf.pstu.ru/conf/files/stud_conf_2014.pdf.
- Даденков С. А. Подход к построению аналитической модели информационно-управляющей сети LonWorks на основе нейронных сетей / С. А. Даденков, Е. Л. Кон // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2013. – №11. – С. 64–69.

Статья поступила в редакцию 10.05.2017

После доработки 21.08.2017.

Даденков С. О.¹, Даденков Д. О.²¹Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, м. Перм, Россия²Старший преподаватель кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» Пермского национального исследовательского политехнического университета, м. Перм, Россия

МОДЕЛЬ ЦИКЛИЧНОГО АЛГОРИТМУ ПЛАНУВАННЯ ЗАДАЧ У РОЗПОДІЛЕНІЙ СИСТЕМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Актуальність. Вирішено задачу кількісного оцінювання ймовірнісних і часових характеристик підсистеми планування задач вузлів для проектування розподілених систем реального часу. Об'єктом дослідження є циклічний алгоритм планування задач на основі пріоритетів (round robin priority driven preemptive scheduler), використовуваний у розподілених fieldbus-мережах.

Мета роботи – побудова моделі і розробка способу кількісного оцінювання ймовірнісних і часових характеристик підсистеми планування задач вузла: затримки й інтервалів часу рішення задач, інтенсивності інформаційного навантаження на канали промислової fieldbus-мережі.

Метод. Для вирішення задачі використано апарат теорії ймовірностей. Запропоновано графа станів і переходів моделі, що описує функціонування циклічного алгоритму планування задач вузла. Отримано аналітичні співвідношення для оцінки основних ймовірнісних і часових характеристик моделі підсистеми планування задач: середнього часу затримки обробки задачі, середнього інтервалу часу між рішенням задач, інтенсивності інформаційного навантаження на канали fieldbus-мережі. Запропоновані модель і спосіб оцінки відрізняються від відомих деталізацією раніше не аналізованими в сукупності значимими параметрами функціонування алгоритму: різнорідними рівнями пріоритетів, кількістю задач по пріоритетах, конфігураційними властивостями задач, затримками операцій і частотою настання подій планувальника, процедурами переривання і дообслуговування задач, та іншими параметрами.

Результати. Розроблені модель і спосіб кількісної оцінки ймовірнісних та часових характеристик підсистеми планування задач з циклічним алгоритмом обробки на основі пріоритетів.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність і адекватність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач проектування розподілених систем реального часу з заданими тимчасовими характеристиками. У ході проектування інструментарій буде використаний для визначення: припустимого числа програмних модулів планувальника і розподілу серед них пріоритетних і непріоритетних задач оброблюваних вузлом у залежності від частоти технологічних подій і заданих вимог по затримці обробки.

Ключові слова: планування задач, реальний час, циклічний алгоритм, пріоритет-орієнтований алгоритм, модель, ймовірнісні та часові характеристики, розподілена система, промислова мережа, fieldbus.

Dadenkov S. A.¹, Dadenkov D. A.²

¹PhD, Assistant professor of department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

²Assistant professor of department «Microprocessor automation equipment», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

ROUND-ROBIN PREEMPTIVE SCHEDULER MODEL IN DISTRIBUTED REAL-TIME SYSTEM

Context. The problem of quantitative estimation of probabilistic and temporal characteristics of the planning node's tasks subsystem for the design of distributed real-time systems has been solved. Round robin priority driven preemptive scheduler is the subject of research, used in distributed fieldbus-networks.

The goal is to create a model and a method of quantifying the probabilistic and temporal characteristics of the node's task scheduling subsystem: delays and time intervals for solving problem, intensity of the information load on the industrial fieldbus-network channels.

Method. The method of probability theory has been used there to solve problems. State and transition graph of model has been offered, describing the functioning of cycle algorithm for scheduling node tasks. Analytical relations for estimating the main probabilistic and temporal characteristics of the task scheduling subsystem model have been got. Specifically, an average delay time for task processing, an average time interval between solving problems, an intensity of the information load on the fieldbus-network channels. The proposed model and method are different from well-known ones: with the detailing of the important parameters of the algorithm functioning, that weren't previously analyzed: dissimilar levels of priorities, number of priority tasks, configuration characteristics of tasks, operation delays and frequency of events of scheduler, etc.

Results. The developed model and method of quantifying the probabilistic and temporal characteristics of tasks scheduling subsystem with round robin priority driven preemptive scheduler.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the proposed software operability and adequacy, allow recommending it for use in practice to solve problems of designing distributed real-time systems with specified time characteristics. During the design process tools will be used for determining: the allowable number of scheduler software modules and the distribution among them of the priority and non-priority tasks handled by the node, depending on the frequency of the technological events and the specified processing delay requirements.

Keywords: task scheduling, real-time, round-robin, priority-driven preemptive scheduler, model, probable and time response characteristics, distributed system, industrial network, fieldbus.

REFERENCES

1. David Neels Pon Kumar D., Jithin Raj, K. Arun Kumar, K. Murugesan An Enhanced Scheduling Scheme for QoS in Mobile WiMAX Networks, *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 2012, Vol. 2, No. 5, pp. 163–169.
2. Park W., Cho S., Bahk S. Scheduler Design for Multiple Traffic Classes in OFDMA Networks, in *Proc. IEEE Int. Conf. Communications, Istanbul, Turkey*, 2006, Vol. 2, pp. 790–795.
3. Kavalerov M. V., Matushkin N. N. Povyshenie effektivnosti planirovaniya s fiksirovannymi prioritetami zadach zhestkogo real'nogo vremeni na osnove primeneniya r-algoritma dlya formirovaniya zaprosov e'tix zadach, *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye*, 2014, No. 12, pp. 14–19.
4. Kavalerov M. V., Matushkin N. N. Novyj algoritm naznacheniya parametrov zadach real'nogo vremeni s linejnymi interval'nymi ogranicheniyami v usloviyax planirovaniya s fiksirovannymi prioritetami, osnovannyj na sokrashhennom perebore prioritetov, *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye*, 2013, No. 11, pp. 012–017.
5. Embedded System Software. Module 6. Version 2. EE IIT, Kharagpur 1 Lesson 30 Real-Time T. 31437008-Realtime-Task-Scheduling-2, 128 p. Access mode: <http://www.nptel.ac.in/courses/108105057/Pdf/Lesson-30.pdf>
6. Marcus Völp., Hermann Härtig [Electronic resource], Real-Time Systems: Event-Driven Scheduling, 2003, Access mode: <https://os.inf.tu-dresden.de/Studium/RTS/WS2013/05-EventDriven.pdf>
7. Ditrix D., Loj D., Shvajncer G. Yu. LON-tehnologiya, postroenie raspredelennyx prilozhenij, Per. s nem. pod red. O. B. Nizamutdinova. Perm', Zvezda, 1999, 242 p.
8. LonTalk protocol specification: ANSI/CEA-709.1-B. United States, 2006.
9. Moshe Kam. Collision Resolution Simulation for Distributed Control Architectures using LonWorks, *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Edmonton, Canada, IEEE, 2005, pp. 319–326.
10. Miśkiewicz M. Analysis of Mean Access Delay in Variable-Window CSMA, Sensors. Schweiz: Molecular Diversity Preservation International, 2007, Vol. 7, pp. 3535–3559.
11. Miśkiewicz M. Access delay in LonTalk MAC protocol, *Computer Standards & Interfaces. Nederland: Elsevier Science Publishing Company*, 2009, pp. 548–556.
12. Miśkiewicz M. Latency characteristics of event-driven task scheduler embedded in neuron chip, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 2007, Vol. 7, No. 12, pp. 132–149.
13. Buchholz P., Plonnigs J. Analytical analysis of access-schemes of the CSMA type, *Proc. of IEEE International Workshop on Factory Communication Systems WFCS'2004, Wien*, 2004, pp. 127–136.
14. Dadenkov S. A., Chmykov V. V. Razrabotka imitacionnoj modeli urovnya prilozhenij uzla LonWorks seti, *Materialy konferencii «Avtomatizirovannye sistemy upravleniya i informacionnye tehnologii»*, 2014. Rezhim dostupa: http://etf.pstu.ru/conf/files/stud_conf_2014.pdf.
15. Dadenkov S. A., Kon E. L. Podxod k postroeniyu analiticheskoy modeli informacionno-upravlyayushhej seti LonWorks na osnove nejrochipov, *Nejrokompyutery: razrabotka, primeneniye*. Moscow, Radiotekhnika, 2013, No. 11, pp. 64–69.

EFFECTIVE ALGORITHM FOR PARSING SENTENCES USING SEMANTICALLY ATTRIBUTED WEIGHTED AFFIX CONTEXT FREE

Context. The problem of increasing efficiency of affix grammars over a finite lattice (AGFL) is considered. AGFL is a context-free grammar with flexible and compact form of productions for parsing texts in natural languages.

Objective. The goal of the work is to increase efficiency of parsing sentences by means of AGFL with a modification that adds semantical attributes to the productions and introduces a new form of production called the “template production”. This modification helps to decrease the number of productions that are required to describe a language and lets reduce the computational complexity of the parsing algorithm.

Method. A mathematical model of the template production is developed and the theorem is proved that claims that the normal form of the template production exists and the normalization procedure produces an equivalent grammar. The normal form is utilized to increase efficiency of parsing Ukrainian sentences. The template production helps to represent ontology-based rules in a short and computationally inexpensive way. The normal form of template production is studied, and an effective algorithm for parsing sentences is proposed. The

worst-case complexity of the proposed algorithm is $O(n^3 \cdot m_p^3 \cdot m_r)$, where n is the length of input string of terminals, m_p is the maximum number of combinations of symbol and attributes that can produce the same string of terminals, and m_r is the maximum number of productions that have the same starting non-terminal symbol in the right part. The growth of parsing time turned out to be almost linear function of the number of words in a sentence when parsing of sentences from the test database of Ukrainian fiction literature.

Results. The developed method has been implemented in the UkrParser software that is available open-source on GitHub.

Conclusions. The developed algorithm was tested on the database of Ukrainian sentences and demonstrated ten times faster parsing speed than Stanford parser. The future research can be focused on the development of grammatically attributed ontologies for wider set of topics that should improve results of semantical sentence parsing.

Keywords: weighted affix context-free grammar, semantic parsing, ontology-driven sentence parsing, template productions.

NOMENCLATURE

A – a set of all affixes;

$A(D_i)$ – a set of affixes that constitute domain D_i ;

2^A – a power set of A ;

D – a set of disjoint affix domains D_i , $D=\{D_i\}$;

D_{GENDER} – a domain for gender;

D_{NUMBER} – a domain for number;

D_{CASE} – a domain for case;

D_{SEM} – a domain for semantic affixes;

G – a weighted affix grammar over a finite lattice

$G=(T,V,S,D,P)$;

n – a length of input sequence of terminals. It is equal to the number of words in input sentence;

P – a set of template and regular productions;

S – a starting symbol, $S \in V \setminus T$;

T – a set of all terminal symbols t_i ;

V – a set of all symbols;

$w \in R^+$ – a multiplicative weight of production. The weight symbol is omitted where it is equal to 1.

INTRODUCTION

The problem of natural text parsing arises in such areas of computer applications as text summarization, machine translation, information retrieval, document classification, human-computer interaction, question answering systems, social networks monitoring, expert systems, etc.

The task of semantic parsing is a complex problem of artificial intelligence because its comprehensive solution requires the construction of a complete human knowledge model. Although such models are currently under development [1], no viable solution is available yet.

We propose an approach for partial syntactic and semantic parsing by means of weighted affix grammar over a finite lattice (WAGFL). WAGFL uses benefits of probabilistic context-free grammars (PCFG) [2] and affix grammars over a finite lattice (AGFL) developed by C.H.A. Koster [3]. Weighted and stochastic grammars are known to be equally expressive [4], but the approach based on weights is less restrictive and thus more flexible.

This article supports an approach where semantic analysis is integrated into the syntax parsing algorithm. This approach helps to decrease the number of intermediate constructions that have to be considered. It is especially important for flexible word order languages like Ukrainian and other slavonic languages.

The main contribution of this work is an approach to effective representation of weighted affix context-free grammar using a special form of “template productions”. A small review of the existing methods is given in Section 2, “template productions” and the algorithm for parsing sentences are introduced in Section 3, experiments are provided in Section 4, parsing results are given in Section 5, and the results are discussed in Section 6.

1 PROBLEM STATEMENT

The problem is to develop effective methods for integrating semantic attributes into productions of weighted

affix context-free grammar and to develop computationally effective algorithm for parsing sentences. The sentence is considered as a list of words $w_1 w_2 \dots w_n$ that is converted to a sequence of terminal symbols $t_1 t_2 \dots t_n$ of the WAGFL grammar. The sentence parsing is formulated as a problem of finding a sequence of productions that has the maximum weight and can be applied sequentially to the starting symbol S to produce the given sequence of terminals $t_1 t_2 \dots t_n$. The weight of the sequence is calculated as a multiplication of weights of all contained productions.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The problem of syntactic sentence parsing has been studied for a long time. Among many methods of parsing sentences, the approach based on generative grammars introduced by Noam Chomsky [5] is one of the most studied. Extended affix grammars (EAG) [6] and probabilistic context-free grammars (PCFG) [2] are generative grammar fundamental extensions widely used in linguistic applications nowadays.

Affix grammars, which belong to the family of two-level grammars, are a subset of augmented grammars. Productions of affix grammars are the productions that are extended with attributes. The domain of attributes is defined by a meta-grammar.

Efficient affix grammars over a finite lattice (AGFL) formalism and its parsing algorithm were developed by C. H. A. Koster [3]. The formalism imposes restrictions on a set of productions and attributes to make the parsing computationally inexpensive. However, it still leaves it expressive enough to parse most of the natural sentence structures. AGFL extensions that are based on probabilities were also studied by T. C. Smith and J. G. Cleary [7].

Our approach is based on weighted affix grammar over a finite lattice. It is close to the method introduced by C.H.A. Koster. However, we formulate lattice grammar and productions in a slightly different way what leads to a shorter form of productions and a more compact sentence parsing algorithm.

3 MATERIALS AND METHODS

For the purpose of partial semantic-syntactic parsing of sentences, a new parser was developed. It is based on the weighted affix grammar over a finite lattice. This grammar extends symbols of generative grammar with affixes what can be used to decrease the number of productions required to describe a language. Our definition of the affix grammar over a finite lattice is slightly different from the original given by C.H.A. Koster, but it has the same idea. This new definition was used to prove that some transformation rules can be applied to the grammar to speed up the process of parsing.

The weighted affix grammar over a finite lattice G is defined as a 5-tuple (T, V, S, D, P) .

Regular productions have the form $\langle (V \times 2^A)^* \xrightarrow{w} (V \times 2^A)^* \rangle$, where $A = A(D) = \bigcup_{D_j \in D} A(D_j)$ and $(V \times 2^A)^*$ represents all non-empty strings of attributed symbols $s_1 s_2 \dots s_k$, with $k > 0$, $s_j = (v_j, A_j)$, $(v_j, A_j) \in V \times 2^A$.

Terminal symbols $t_i \in T$ do not have attributes. They usually represent words of parsed sentences. For example, the word “student” can be a male or female singular noun until it is known from the context. In terms of generative grammar, it can be written in the following way:

$$(noun, \{a_{FEMALE}, a_{SINGULAR}, a_{STUDENT}\}) \rightarrow (student, \emptyset),$$

$$(noun, \{a_{MALE}, a_{SINGULAR}, a_{STUDENT}\}) \rightarrow (student, \emptyset).$$

An alternative form is $(noun, \{a_{FEMALE}, a_{MALE}, a_{SINGULAR}, a_{STUDENT}\}) \rightarrow (student, \emptyset)$

It represents both cases given above. Productions that generate terminal symbols are added by a morphological parser. If some word is a homograph, the morphological parser generates one production for every meaning of the word. The weight of each production represents the admissibility of this meaning in the parsed context.

In the example above, $a_{FEMALE}, a_{MALE}, a_{SINGULAR}$ are grammatical attributes, and $a_{STUDENT}$ is a semantical attribute. Semantical attributes are elements of domain D_{SEM} .

Providing regular productions for all possible combinations of affixes can be inefficient. Thus, a template form of production is introduced. This form is tailored for the needs of computationally efficient language processing.

The template production has the form

$$(v_1, D_{inh1}, A_{set1}) \dots (v_k, D_{inhk}, A_{setk}) \xrightarrow{w} (v'_1, D_{uni1}, A_{req1}) \dots (v'_m, D_{unim}, A_{reqm}),$$

where $D_{inh1}, D_{inh2}, \dots, D_{inhk} \subset D$ are domains which affixes are inherited by symbols $v_1, v_2, \dots, v_k$; $D_{uni1}, D_{uni2}, \dots, D_{unim} \subset D$ are domains which affixes should be common for symbols $v'_1, v'_2, \dots, v'_m$; $A_{set1}, A_{set2}, \dots, A_{setk} \subset A$ are additional affixes for symbols in the left part of the production, and $A_{req1}, A_{req2}, \dots, A_{reqm} \subset A$ are required affixes for symbols in the right part of the production; and w is a multiplicative weight of the production.

The template form is equivalent to a set of regular productions by definition. Consider the following template and regular productions (1) and (2):

$$q = \langle (v_1, D_{inh1}, A_{set1}) \dots (v_k, D_{inhk}, A_{setk}) \xrightarrow{w} (v'_1, D_{uni1}, A_{req1}) \dots (v'_m, D_{unim}, A_{reqm}) \rangle, \quad (1)$$

$$p = \langle (v_1, A_1) \dots (v_k, A_k) \xrightarrow{w} (v'_1, A'_1) \dots (v'_m, A'_m) \rangle. \quad (2)$$

Let $A_{uni}(p, q)$ denote the intersection of all attributes that should be uniform in the right part of regular production p in order to conform to template production q :

$$A_{uni}(p, q) = \bigcap_{i=1}^m (A'_i \cup \overline{A}(D_{uni i})) \cap A(D_{uni 1..m}),$$

$$\bar{A}(D_{uni\ i}) = A \setminus A(D_{uni\ i}), D_{uni\ 1..m} = D_1 \cup D_2 \cup \dots \cup D_m.$$

We say that regular production p conforms to template production q if requirements R1–R3 are met:

$$R1. (\forall j \in 1 \dots n) D_j \in D_{uni\ 1..m} \Rightarrow A_{uni}(p, q) \cap A(D_j) \neq \emptyset;$$

$$R2. (\forall i \in 1 \dots m) A_{req\ i} \subset A'_i;$$

$$R3. (\forall i \in 1 \dots k) A_i = A_{set\ i} \cup (A_{uni}(p, q) \cap A(D_{inh\ i})).$$

Requirement R1 assures that for each unified domain there is at least one common affix. Requirement R2 describes how required attributes are treated, and requirement R3 states how attributes of symbols in the left part of the production are obtained.

For instance, the Ukrainian equivalent of the English noun phrase “BEAUTIFUL STREET OF THE CITY” is “ГАРНА ВУЛИЦЯ МІСТА”. In this noun phrase, the case, gender, and number of the adjective (ГАРНА) is coordinated by the case, gender, and number of the first noun (ВУЛИЦЯ), and the case of the second noun (МІСТА) should be GENITIVE. Semantical attribute for the whole phrase is taken from the word “STREET”. The template production for this phrase in Ukrainian is

$$(NP, \{D_{GENDER}, D_{NUMBER}, D_{CASE}, D_{SEM}\}, \emptyset) \rightarrow (ADJ, \{D_{GENDER}, D_{NUMBER}, D_{CASE}\}, \emptyset)$$

$$(NP, \{D_{GENDER}, D_{NUMBER}, D_{CASE}, D_{SEM}\}, \emptyset) \setminus (NP, \emptyset, \{a_{GENITIVE}\}),$$

and the English equivalent is

$$(NP, \{D_{NUMBER}, D_{SEM}\}, \emptyset) \rightarrow (ADJ, \emptyset, \emptyset) \times$$

$$\times \{D_{NUMBER}, D_{SEM}\}, \emptyset \setminus (prep, \emptyset, \{a_{OF}\}) \setminus (NP, \emptyset, \emptyset),$$

where NP stands for noun phrase, ADJ stands for adjective, D_{GENDER} , D_{NUMBER} , D_{CASE} , D_{SEM} are domains for gender, number, case, and semantic affixes, respectively.

The Normal Form of Template Productions. The length of the right-hand side of a production is called its rank. Effective parsing of sentences using generative grammars can be achieved when the grammar is in Chomsky normal form (CNF) – the form that ensures that all productions of the grammar have the rank not more than 2. Template productions can also be converted to a form that has at most two symbols in the right part. This conversion is performed by applying simplification steps to all productions that have the rank greater than 2. Every step takes one template production with the rank $m > 2$ and produces two template productions – one with the rank 2 and one with the rank $m - 1$. The process stops when there are no more productions with the rank 3 and above.

The simplification step takes one template production q of the form (1) and produces 2 template productions:

$$q_1 = \left\langle (v_1, D_{inh\ 1}, A_{set\ 1}) \dots (v_k, D_{inh\ k}, A_{set\ k}) \xrightarrow{w} \right.$$

$$\left. \xrightarrow{w} (v'_1, D_{uni\ 1}, A_{req\ 1}) \setminus (v'_{2..m}, D_{uni\ 2..m}, \emptyset) \right\rangle$$

and

$$q_2 = \left\langle (v'_{2..m}, D_{uni\ 2..m}, \emptyset) \xrightarrow{1.0} \right.$$

$$\left. \xrightarrow{1.0} (v'_2, D_{uni\ 2}, A_{req\ 2}) \dots (v'_m, D_{uni\ m}, A_{req\ m}) \right\rangle,$$

where $D_{uni\ 2..m} = D_{uni\ 2} \cup D_{uni\ 3} \cup \dots \cup D_{uni\ m}$, and $v'_{2..m}$ is a new non-terminal symbol.

Theorem 1: The grammar obtained from original grammar G by the replacement of template production q with template productions q_1 and q_2 produces the same language.

In order to prove this, it is sufficient to show that:

1) all regular productions of form (2), which conform to template production (1), can be split into 2 productions p_1 and p_2 that conform to template productions q_1 and q_2 , respectively;

2) all productions that conform to template productions q_1 and q_2 define the same grammar as productions that conform to template production q .

1) The First Part of the Proof: Given that production p conforms to template production q . It should be proven that there exists a split of p into 2 productions p_1 and p_2 such that p_1 conforms to q_1 and p_2 conforms to q_2 .

This split can be found by the assignment

$$p_1 = \left\langle (v_1, A_1) \dots (v_k, A_k) \xrightarrow{w} (v'_1, A'_1) \setminus (v'_{2..m}, A'_{2..m}) \right\rangle,$$

$$p_2 = \left\langle (v'_{2..m}, A_{2..m}) \xrightarrow{1.0} (v'_2, A'_2) \dots (v'_m, A'_m) \right\rangle,$$

$A_{2..m} = A'_{2..m} = A_{uni}(p_2, q_2)$. In this case, production p_2 conforms to production q_2 because

$$A_{uni}(p, q) = (((A'_1 \cup \bar{A}(D_{uni\ 1})) \cap (A_{uni}(p_2, q_2) \cup \cup \bar{A}(D_{uni\ 2..m})))) \cap A(D_{uni\ 1..m}).$$

$$\text{Therefore, } A_{uni}(p, q) \cap A(D_{uni\ 2..m}) \subset A_{uni}(p_2, q_2)$$

what means that if $A_{uni}(p, q)$ satisfies requirement R1, then

$A_{uni}(p_2, q_2)$ also satisfies it. Requirement R2 is satisfied because $A_{req\ 2}, \dots, A_{req\ m}$ and $A'_2, \dots, A'_m$ are taken from productions q and p , respectively, and p conforms to

q by the assumption of the theorem. Requirement R3 is satisfied due to the fact that $A'_{2..m} = \emptyset \cup (A_{uni}(p_2, q_2) \cap A(D_{uni\ 2..m})) = A_{uni}(p_2, q_2)$.

2) The Second Part of the Proof: Given that p_1 conforms to q_1 and p_2 conforms to q_2 , it can be proved that they can be composed into a single production that conforms to q .

First of all, it should be noted that symbol $v'_{2..m}$ is a new non-terminal symbol, and thus it can't be found in any

other production. Productions p_1 and p_2 can be applied sequentially only when $A_{2..m} = A'_{2..m}$. Due to the fact that p_2 conforms to q_2 , requirement R3 ensures that

$$A_{2..m} = \emptyset \cup (A_{uni}(p_2, q_2) \cap A(D_{uni\ 2..m})) = A_{uni}(p_2, q_2).$$

So, $A_{uni}(p_1, q_1)$ can be calculated using the formula

$$\begin{aligned} A_{uni}(p_1, q_1) &= (((A'_1 \cup \bar{A}(D_{uni\ 1}))) \cap \\ &\cap (A_{uni}(p_2, q_2) \cup \bar{A}(D_{uni\ 2..m}))) \cap A(D_{uni\ 1..m}) = \\ &= (A'_1 \cup \bar{A}(D_{uni\ 1})) \cap \left(\bigcap_{i=2}^m (A'_i \cup \bar{A}(D_{uni\ i})) \right) \cap A(D_{uni\ 1..m}) = A_{uni}(p, q). \end{aligned}$$

Therefore, requirements R1 and R3 are satisfied for productions p and q because they are satisfied for p_1 and q_1 ; requirement R2 follows from the fact that p_1 and p_2 conform to q_1 and q_2 , respectively. Thus, production p , that is obtained from p_1 and p_2 , conforms to template production q . This concludes the proof of Theorem 1.

Algorithm for Parsing Sentences. The problem of sentence parsing is formulated as a problem of finding a sequence of productions that has the maximum weight and can be applied sequentially to some starting attributed symbol (S, A_s) to produce a given sequence of terminals $t_1 t_2 \dots t_n$. The weight of the sequence is calculated as a multiplication of weights of all contained productions. If the right part of a production contains only one symbol, the weight of the production should not exceed 1 in order to avoid cyclic productions that can increase weight of non-terminal symbols during the bottom-up parsing procedure.

The developed algorithm for parsing sentences is based mostly on probabilistic CYK algorithm. The main difference is that symbols are compared not only by weight but also by the set of affixes. The algorithm uses the notion of weighted attributed symbol – a 3-tuple (w, v, A_v) that contains weight w , symbol v , and set of affixes $A_v \subset A(D)$. We say that weighted attributed symbol (w_1, v_1, A_1) dominates weighted attributed symbol (w_2, v_2, A_2) if $w_1 \geq w_2$, $v_1 = v_2$, and $A_2 \subset A_1$.

In the worst-case scenario, the computational complexity of the algorithm is $O(n^3 \cdot m_p^3 \cdot m_r)$, where n is the length of input string of terminals, m_p is the maximum number of combinations of symbols and attributes that can produce the same string of terminals (this value can be treated as the ambiguity of the language being parsed), and m_r is the maximum number of productions that have the same starting non-terminal symbol in the right part.

The parsing algorithm can be described by the following pseudocode:

Algorithm *ParseSentence*(s).

Input. String of terminals $s = t_1 t_2 \dots t_n$.

Output. Sequence of productions that produce string s .

¹<https://github.com/mdavydov/UkrParser>

²<https://sourceforge.net/projects/ispell-uk/>

Let $P[1..n, 1..n] = \emptyset$ be an array, each element of which is a set of weighted attributed symbols.

Initialize $P[i, 1] = \{(1, t_i, \emptyset)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$.

for $j = 1, 2, \dots, n$ do // j is a length of substring of terminals

for $k = 1, 2, \dots, n - j + 1$ do // k is a start of substring

for $s = 1, 2, \dots, j - 1$ do // s is a split of the substring

for all $(w_1, v_1, A_1) \in P[k, s]$ do

for all productions of type

$(v, D_{inh}, A_{set}) \xrightarrow{w} (v_1, D_{uni\ 1}, A_{req\ 1}) (v_2, D_{uni\ 2}, A_{req\ 2})$ do

for all $(w_2, v_2, A_2) \in P[k + s, j - s]$ do

if $(A_{req\ 1} \subset A_1 \wedge ((\forall D_i \in D_{uni\ 1}) A_1 \cap A(D_i) \neq \emptyset))$ then

and $((\forall D_i \in (D_{uni\ 1} \cap D_{uni\ 2})) A_1 \cap A_2 \cap A(D_i) \neq \emptyset)$ then

Let

$$t = (w \cdot w_1, v, A_{set} \cup ((A_1 \cup \bar{A}(D_{uni\ 1})) \cap (A_2 \cup \bar{A}(D_{uni\ 2})) \cap A(D_{inh})))$$

if t is not dominated by any element of $P[k, j]$,

then add t to $P[k, j]$ and remove elements dominated by t

Let list $L := \text{allelements of } P[k, j]$

for all $(w_1, v_1, A_1) \in L$ do // process productions of rank 1

for all productions of type $(v, D_{inh}, A_{set}) \xrightarrow{w} (v_1, D_{uni\ 1}, A_{req\ 1})$ do

if $(A_{req\ 1} \subset A_1 \wedge ((\forall D_i \in D_{uni\ 1}) A_1 \cap A(D_i) \neq \emptyset))$ then

let $t = (w \cdot w_1, v, A_{set} \cup (A_1 \cap A(D_{inh})))$

if t is not dominated by any element of L , then append t to L .

Add elements of L to $P[k, j]$.

If $P[1, n]$ doesn't contain any triple (w, S, A_s) , where S is a starting symbol of the grammar, the parsing is impossible. If it does, select a triple with the maximum weight w among them and reconstruct all productions that are required to produce string $t_1 t_2 \dots t_n$.

4 EXPERIMENTS

The algorithm for parsing sentences was implemented in UkrParser¹ open source software project. This project contains classes for morphology analysis and sentence parser. The morphology for Ukrainian language is implemented in com.langproc.UkrainianISpellMorphology and com.langproc.UkrainianGrammarlyMorphology classes. The first class is based on open source project iSpell-uk² by Andriy Rysin and the second is based on Ukrainian morphology database gracefully provided by Mariana Romanyshyn from Grammarly. The algorithm for parsing sentences is implemented in com.langproc.APCFGParser class and productions for parsing Ukrainian sentences are placed in com.langproc.APCFGUkrainian class.

Computational efficiency of the developed algorithm was tested on database of 500 sentences from “Fata Morgana” story by Michael Kotsyubynsky. The average sentence parsing time depending of the sentence length is depicted in Fig. 1. These results were obtained on computer with 2.4 GHz Intel Core i5 CPU. The parsing time grows turned out to be almost linear notwithstanding the worst-case cubic estimate provided in Section 3.

5 RESULTS

The developed approach for mixed semantic and syntactic sentence parsing was used for parsing and translation of the annotated Ukrainian Sign language and the Ukrainian Spoken language [8], where the translation based on the parser that utilized productions generated from ontologies outperforms the parser that utilized only syntactic productions by 25% (90% of correct translations as compared to 65% correct translations obtained when using only syntactical productions).

An example of parsing sentence “Моя донька ходить у дитячий садок” (My daughter attends nursery school) by means of the developed method is shown in Figure 2.

In this example the following rules were added from subject area “Education”:

NG(персона)[=] -> NG(донька)[=];

VP(ходити-відвідувати)[=] -> VP(ходить)[=];

NG(дошкільний-заклад)[=] 1.1-> adj(дитячий)[=]

AN(садок)[=];

DS(ходить-відвідувати)[=] 1.1->

-> NP(персона)[=] VP(ходить-відвідувати)[=]

V DNP(дошкільний-заклад)[c4];

where NG stands for Noun Group, NP – Noun Phrase, VP – Verb Phrase, adj – adjective, AN – annotated noun, DS – Declarative Sentence, V – preposition of place, “=” means default grammar attributes for current phrase, c4 stands for “Casus 4”. The weights of ontology-driven rules are

intentionally made greater than 1 to supersede default syntactical rules.

6 DISCUSSION

The experimental results on database of Ukrainian sentences show significant speed-up in comparison with well-known context-free grammar parsers. This result was achieved by using compact form of production with syntactical and semantical attributes. In comparison with Stanford Parser³ the average sentence parsing time was decreased in about 10 times.

CONCLUSIONS

This article demonstrated an efficient algorithm for parsing sentences by means of weighted affix context-free grammar with semantical attributes. The developed algorithm is based on the normal form of “template productions” that were introduced. The algorithm has worst-case cubic complexity, that turned out to be almost linear in real example.

The obtained sentence parsing trees are more semantically rich than the parsing trees obtained by means of regular syntactic parser. Additional computational cost for that is not very high because only hypernyms of words that are present in the sentence and corresponding expressions are included into the grammar.

The future research will be focused on optimal weight assignment and automatic extraction of productions that are specific for particular subject area.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the state budget scientific research project of Lviv Polytechnic National University and Ministry of Education and Science of Ukraine “Mathematical and algorithmic modeling of translation processes from gestures into text for specialized computer systems” (state registration number 0111U001222).

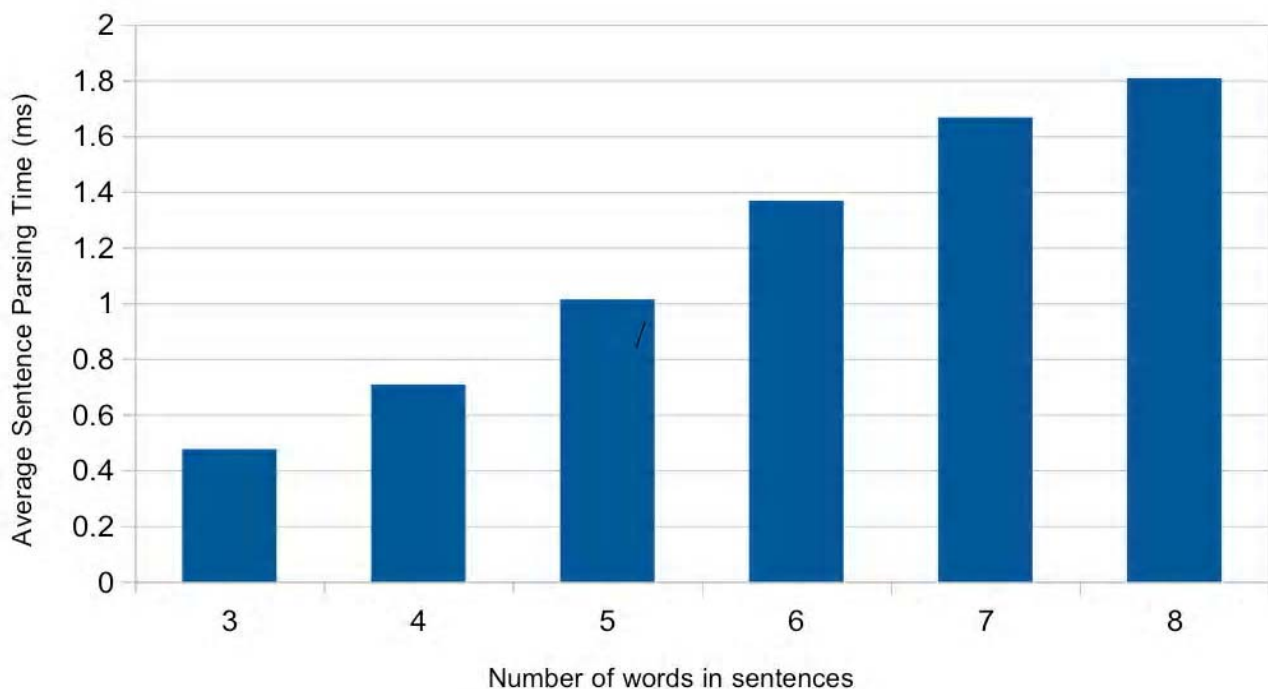


Figure 1 – Average sentence parsing time in milliseconds depending of the sentence length

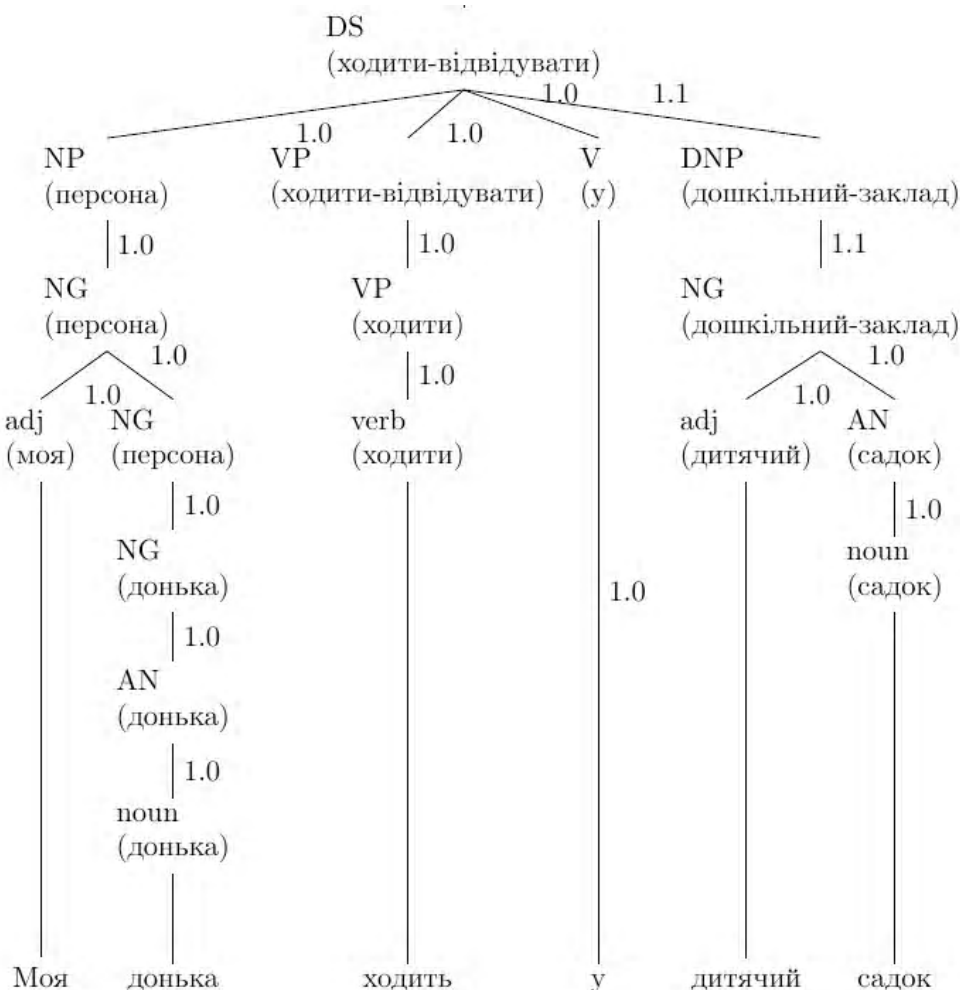


Figure 2 – The result of parsing of the Ukrainian sentence “Моя донька ходить у дитячий садок” (My daughter attends nursery school)

REFERENCES

1. ConceptOnto: An upper ontology based on ConceptNet / [E. Najmi, K. Hashmi, Z. Malik et al.] // Computer Systems and Applications (AICCSA), 2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), November 10–13, Doha, Qatar. – 2014. – P. 366–372. DOI: 10.1109/AICCSA.2014.7073222.
2. Eddy S.R. RNA sequence analysis using covariance models / S. R. Eddy, R Durbin // Nucleic Acids Research. – 1994. – Vol. 22. – № 11. – P. 2079–2088.
3. Koster C.H.A. Affix Grammars for natural languages / C.H.A. Koster // In: Attribute Grammars, Applications and Systems, International Summer School SAGA, Lecture Notes in Computer Science, Prague, Czechoslovakia. – 1991. – Vol. 545. – P. 469–484.
4. Smith N. A. Weighted and Probabilistic Context-Free Grammars Are Equally Expressive / N. A. Smith, M. Johnson // Computational Linguistics. – 2007. – Vol. 33, № 4. – P. 477–491. DOI:10.1162/coli.2007.
5. Chomsky N. Three models for the description of language / N. Chomsky // IRE Transactions on Information Theory – № 2 (3). – 1956. – P. 113–124. DOI:10.1109/TIT.1956.1056813.
6. Oostdijk N. An Extended Affix Grammar for the English Noun Phrase / N. Oostdijk // In: Jan Aarts and Wim Meijs (eds), Corpus Linguistics. Recent Developments in the Use of Computer Corpora in English Language Research, Amsterdam: Rodopi. – 1984.
7. Smith T.C. Probabilistic Unification Grammars / T. C. Smith, J. G. Cleary // In Australasian Natural Language Processing Summer Workshop. – 1997. – P. 25–32.
8. Lozynska O. Information technology for Ukrainian Sign Language translation based on ontologies / O. Lozynska, M. Davydov // ECONTechMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes. – 2015. – Vol. 04, No. 2. – P. 13–18.

Article was submitted 22.09.2017.

After revision 23.10.2017.

Давидов М. В.¹, Лозинська О. В.², Пасічник В. В.³

¹Канд. техн. наук, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Канд. техн. наук, асистент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна

ЕФЕКТИВНИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ СИНТАКСИЧНОГО АНАЛІЗУ РЕЧЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ СЕМАНТИЧНО ПОЗНАЧЕНИХ ЗВАЖЕНИХ АФІКСНИХ КОНТЕКСТНО-ВІЛЬНИХ ГРАМАТИК

Актуальність. Розглядається задача підвищення ефективності афіксних граматик над скінченною ґраткою (AGFL). AGFL – це контекстно-вільна граматика з гнучкими і компактними формами для розбору текстів на природних мовах.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення ефективності розбору речень за допомогою модифікації AGFL, яка додає семантичні атрибути в продукції граматики і вводить нову форму продукцій під назвою «шаблонна продукція». Ця модифікація допомагає зменшити кількість продукцій, необхідних для опису мови, і дозволяє зменшити обчислювальну складність алгоритму синтаксичного аналізу.

Метод. Розроблено математичну модель шаблонної продукції і доведено теорему про те, що існує нормальна форма шаблонних продукцій, а процедура нормалізації породжує еквівалентну граматику. Нормальна форма використовується для підвищення ефективності розбору українських речень. Шаблонні продукції допомагають описувати правила на основі онтології в короткій і обчислювально ефективній формі. Вивчається нормальна форма шаблонних продукцій і пропонується ефективний алгоритм для розбору речень. У

найгіршому випадку обчислювальна складність запропонованого алгоритму становить $O(n^3 \cdot m_p^3 \cdot m_r)$, де n – довжина вхідного рядка терміналів, m_p – максимальне число комбінацій символів і атрибутів, які можуть породжувати один і той самий рядок терміналів, m_r – максимальне число продукцій, які мають той самий стартовий нетермінальний символ в правій частині. Час синтаксичного аналізу виявився майже лінійною функцією від кількості слів у реченні при розборі тестової бази речень української художньої літератури.

Результати. Розроблений метод був реалізований в програмному забезпеченні UkrParser, яке доступне з відкритим вихідним кодом на GitHub.

Висновки. Розроблений алгоритм був протестований на базі даних українських речень і продемонстрував в десять разів більшу швидкість розбору, ніж аналізатор «Stanford Parser». Майбутні дослідження можуть бути сфокусовані на розробці граматично доповнених онтологій для більш широкого набору предметних областей, що має поліпшити результати семантичного аналізу речень.

Ключові слова: зважена афіксна контекстно-вільна граMATика, семантичний розбір, розбір речень з використанням онтологій, шаблонна продукція.

Давыдов М. В.¹, Лозинская О. В.², Пасечник В. В.³

¹Канд. техн. наук, доцент кафедри «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

²Канд. техн. наук, ассистент кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

³Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина

ЕФЕКТИВНИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ СИНТАКСИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРЕДЛОЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕМАНТИЧЕСКИ ОБОЗНАЧЕННЫХ ВЗВЕШЕННЫХ АФФИКСНЫХ КОНТЕКСТНО-СВОБОДНЫХ ГРАММАТИК

Актуальность. Рассматривается задача повышения эффективности аффиксных грамматик над конечной решеткой (AGFL). AGFL – это контекстно-свободная грамматика с гибкой и компактной формой записи продукций для разбора текстов на естественных языках.

Цель работы. Целью работы является повышение эффективности разбора предложений с помощью модификации AGFL, которая добавляет семантические атрибуты в продукции грамматики и вводит новую форму продукций под названием «шаблонная продукция». Эта модификация помогает уменьшить количество продукций, необходимых для описания языка, и позволяет уменьшить вычислительную сложность алгоритма синтаксического анализа.

Метод. Разработана математическая модель шаблонной продукции, и доказана теорема о том, что существует нормальная форма шаблонных продукций, и процедура нормализации порождает эквивалентную грамматику. Нормальная форма используется для повышения эффективности разбора украинских предложений. Шаблонные продукции помогают описывать правила на основе онтологии в краткой и вычислительно эффективной форме. Изучается нормальная форма шаблонных продукций, и предлагается эффективный алгоритм для разбора предложений. В наихудшем случае вычислительная сложность предлагаемого алгоритма составляет

$O(n^3 \cdot m_p^3 \cdot m_r)$, где n – длина входной строки терминалов, m_p – максимальное число комбинаций символов и атрибутов, которые

могут порождать одну и ту же строку терминалов, и m_r – максимальное число продукций, которые имеют тот же стартовый нетерминальный символ в правой части. Время синтаксического анализа оказалось почти линейной функцией от количества слов в предложении при разборе тестовой базы предложений украинской художественной литературы.

Результаты. Разработанный метод был реализован в программном обеспечении UkrParser, которое доступно с открытым исходным кодом на GitHub.

Выводы. Разработанный алгоритм был протестирован на базе данных украинских предложений и продемонстрировал в десять раз большую скорость разбора, чем анализатор «Stanford Parser». Будущие исследования могут быть сфокусированы на разработке грамматически дополненных онтологий для более широкого набора предметных областей, что должно улучшить результаты семантического анализа предложений.

Ключевые слова: взвешенная контекстно-свободная аффиксная грамматика, семантический разбор предложений, разбор предложений на основе онтологий, шаблонная продукция.

REFERENCES

1. Najmi E., Hashmi K., Malik Z., Rezgui A., Khanz H. U. ConceptOnto: An upper ontology based on ConceptNet, *Computer Systems and Applications (AICCSA), 2014 IEEE/ACS 11th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), November 10–13, Doha, Qatar, 2014*, pp. 366–372. DOI: 10.1109/AICCSA.2014.7073222.
2. Eddy S. R., Durbin R. RNA sequence analysis using covariance models, *Nucleic Acids Research*, 1994, Vol. 22, No. 11, pp. 2079–2088.
3. Koster C.H.A. Affix Grammars for natural languages / C.H.A. Koster, In: *Attribute Grammars, Applications and Systems, International Summer School SAGA, Lecture Notes in Computer Science, Prague, Czechoslovakia, 1991*, Vol. 545, pp. 469–484.
4. Smith N. A., Johnson M. Weighted and Probabilistic Context-Free Grammars Are Equally Expressive, *Computational Linguistics*, 2007, Vol. 33, No. 4, pp. 477–491. DOI:10.1162/coli.2007.
5. Chomsky N. Three models for the description of language, *IRE Transactions on Information Theory*, No. 2 (3), 1956, pp. 113–124. DOI:10.1109/TIT.1956.1056813.
6. Oostdijk N. An Extended Affix Grammar for the English Noun Phrase, In: *Jan Aarts and Wim Meijs (eds), Corpus Linguistics. Recent Developments in the Use of Computer Corpora in English Language Research, Amsterdam, Rodopi, 1984*.
7. Smith T. C., Cleary J. G. Probabilistic Unification Grammars, In *Australasian Natural Language Processing Summer Workshop*, 1997, pp. 25–32.
8. Lozynska O., Davydov M. Information technology for Ukrainian Sign Language translation based on ontologies, *ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes*, 2015, Vol. 04, No. 2, pp. 13–18.

УДК: 004.043:519.722

Козуля Т. В.¹, Білова М. О.²

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики Харківського національного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

²Аспірант, асистент кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики Харківського національного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНА СИСТЕМА МЕТОДІВ З КОМПЛЕКСНОЇ ОЦІНКИ СТАНУ СКЛАДНИХ ОБ'ЄКТІВ

Актуальність. Формування інформаційно-методичного і алгоритмічно-програмного забезпечення з оцінки рівня сталого розвитку еколого-соціально-економічних систем різного рівня складності потребує становлення комплексного системного підходу щодо вирішення проблемних науково-практичних задач.

Мета. Формування методичного та інформаційно-програмного забезпечення оцінки відповідності стану і функціональності системного об'єкта вимогам екологічної якості з позицій сталого розвитку, що становить його безпечність для навколишнього природного середовища.

Методи з оцінки якості системних об'єктів різного рівня складності сформовані в комплексну аналітичну систему для послідовного розв'язання задач обробки та оцінки моніторингових даних: головних компонент, компараторної ідентифікації та когнітивного моделювання.

Результати. Надано аналіз системних методів з формування комплексного інформаційно-методичного забезпечення оцінки стану еколого-соціально-економічних систем для автоматизації управління їх безпекою. Обґрунтовано доцільність створення алгоритмічно-програмного комплексу оцінки якості системних утворень, що складаються з об'єкта дослідження і його навколишнього середовища, для визначення об'єктивно зваженого управлінського рішення. Сформовано аналітичну систему методів, послідовне використання яких забезпечує оцінювання рівня безпеки системного об'єкта за результатами дослідження «(система – навколишнє середовище) – процес – рівноважний стан системи». Алгоритмічне забезпечення оцінки якості системних об'єктів і створений для цього програмний продукт на практиці апробовано при вирішенні завдань екологічної безпеки районів і підприємств Харківської області. Визначено перспективи управлінської діяльності за результатами оцінки стану підприємств Харківської області.

Висновки. Наукова новизна полягає у формуванні комплексної методичної інформаційно-програмної підтримки оцінки екологічності та безпеки системних об'єктів еколого-соціально-економічного змісту, введення в методичну основу системного аналізу об'єктів послідовності оцінювання «стан (система – навколишнє середовище) – процес (взаємодія, внутрішнє регулювання, самоорганізація) – стан системи». Практична значущість полягає у розробці інформаційно-методичного та алгоритмічного забезпечення з комплексної оцінки рівня екологічної безпеки складних еколого-соціально-економічних об'єктів; інформаційно-програмного комплексу розв'язання задач оцінки стану рівня безпеки складних об'єктів, невідповідності аналізованих параметрів вимогам збалансованого сталого розвитку систем різного рівня дослідження.

Ключові слова: складна система, оцінка якості, інформаційно-методичне забезпечення, алгоритмічне забезпечення, програмний продукт.

НОМЕНКЛАТУРА

КК – когнітивна карта;
НПС – навколишнє природне середовище;
НС – навколишнє середовище;
СР – сталий розвиток;
 C – множина концептів когнітивної карти;
 E – множина дуг причинно-наслідкового зв'язку між i -м і j -м концептами когнітивної карти;
 G – когнітивна карта (знаковий орієнтований граф);
 l – кількість факторів, що характеризують економічний стан об'єкта X_e ;
 m – кількість факторів, що характеризують екологічний стан об'єкта $X_{ек}$;
 m_j – математичне очікування ознаки X_j ;
 $\max r_j$ – максимальне значення j -го нормованого показника X ;
 $\min r_j$ – мінімальне значення j -го нормованого показника X ;
 $p_j(t)$ – імпульсний сигнал у момент часу t на j -й концепт;

$q(e_{ij})$ – ваговий коефіцієнт дуги e_{ij} , що становить зв'язок (c_i, c_j) ;
 $S(t)$ – стан об'єкта дослідження в момент часу t ;
 $S^*(t)$ – оптимальна траєкторія переходу системи з початкового у рівноважний стан;
 S – кількість факторів, що характеризують екологічний стан об'єкта X_c ;
 (S_k, t_k) – кінцевий стан системи;
 $U(t)$ – управляючий вплив в момент часу t ;
 $U^*(t)$ – програмне управління, яке реалізує $S^*(t)$;
 $U\{S^*(t), t\}$ – управління, яке компенсує відхилення від $S^*(t)$;
 $v_i(t)$ – значення i -го концепту c в момент часу t ;
 w_{ij} – коефіцієнт i -ї головної компоненти j -го показника дослідження;
 x_{ij} – значення j -го показника i -го об'єкта дослідження;

Z_j – максимально досяжні показники якості об'єкта дослідження;

Δ_{ij} – відхилення від норми на одиницю розкиду j -го показника i -го об'єкта дослідження.

ВСТУП

Актуальність теми даного дослідження полягає у необхідності автоматизації вирішення проблемних науково-практичних задач формування інформаційно-методичного і алгоритмічно-програмного забезпечення з оцінки рівня сталого розвитку (СР) еколого-соціально-економічних систем різного рівня складності. Одним із пріоритетних завдань гармонізації стабільного функціонування складних систем є підтримка їх природного екологічного розвитку. Встановлення стійкої рівноваги для системного об'єкта «соціально-економічна система – навколишнє природне середовище (НПС)», що забезпечує необхідний рівень якості екосистем і безпеки для живих організмів і людини, потребує здійснення управлінської діяльності при зверненні до сучасних інформаційних технологій. У теоретичному і практичному плані складність досліджень таких систем визначається відсутністю достатньої бази знань про особливості функціонування об'єктів еколого-соціально-економічної змістовності та процесів природного регулювання їх стану, що ускладнює розробку систем для прийняття зваженого управлінського рішення.

Враховуючи ці проблемні питання, у роботі пропонується алгоритмічно-програмний комплекс послідовної оцінки ступеню безпеки природно-техногенних об'єктів в умовах невизначеності відповідно до аналізу «(система – НС) – процес – стан системи». Об'єктом дослідження є математичні методи і інформаційні системи обробки даних про стан систем різного рівня складності. Предметом дослідження є інформаційно-методичне забезпечення комплексної оцінки якості складних системних об'єктів.

Метою роботи є формування методичного та інформаційно-програмного забезпечення оцінки відповідності стану і функціональності системного об'єкта вимогам екологічної якості, що становить його безпечність для НПС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Поняття складної системи надає цілісний об'єкт, який складається із різнотипних систем, характеризується ієрархічною їх підпорядкованістю і функціональною залежністю при виконанні цільових задач за певних умов, визначається низкою еколого-соціально-економічних параметрів загальною кількістю q : $X = \{X_1, X_2, \dots, X_q\}$. У роботі цілісність об'єкта позначається через кооперативні зв'язки різнорідних за функціональним призначенням систем, що дозволяє зберегти їх природні властивості і встановити для них синергетичні умови розвитку.

Традиційно прийнято визначати рівень складності системи за кількістю в ній елементів і різноманітністю зв'язків між ними. У роботі застосовано поняття змістовної складності за еколого-соціально-економічним призначенням відповідно до концепції СР, вимог екологічності та безпечності.

Прийняття управлінського рішення на основі формування комплексного показника якісного стану екологічних і соціально-економічних систем дозволить підтримувати, відтворювати сталий гармонійний розвиток, забезпечувати необхідний рівень біорізноманіття і продуктивності природного середовища. Якість стану складних систем визначається у двох аспектах: екологічність – відповідність вимогам функціональності природного середовища, безпечність – характеристика умов підтримки життєдіяльності екосистем і суспільства. Отже, екологічність як складова якості об'єкта дослідження відповідає у широкому загалі за стан, а безпечність за взаємодію, вплив і зв'язок, реалізований між системами. Відповідно до вище зазначеного, оцінка якості системних об'єктів різного рівня організації потребує комплексного підходу при наявності великої кількості різнорідних показників, що характеризують їх стан.

Таким чином, задача дослідження полягає у розробці універсального інформаційно-методичного забезпечення обробки даних для послідовного аналізу «(система – НС) – процес – стан системи» при зверненні до інтелектуальних технологій з подальшою її автоматизацією у вигляді алгоритмічно-програмного комплексу.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Питання оцінки якості складних систем відповідно до вимог процесу оцінки інформації з екологічної безпеки розглянуті у роботах А. Б. Качинського [1], Г. О. Харламової [2], С. П. Іванюти [3] та ін. З позицій СР ця проблема досліджена у наукових працях М. З. Згуровського [4], Ю. І. Сохи [5], Д. В. Зеркалова [6], Р. Тарві [7], Й. Дж. Чанга [8] та ін.

Стан системного об'єкта розглядається в еколого-соціально-економічному аспекті як зміна властивостей, складу, структури та взаємозв'язків між системами, які визначені як:

- економіко-екологічні – природокористування та вплив господарської діяльності на природне середовище, наслідки забруднення довкілля відходами виробництва, нерациональне використання природних ресурсів, заходи з його оздоровлення та запобігання екологічних збитків;

- еколого-економічні – вплив НПС на розвиток суспільного виробництва; роль природи в забезпеченні виробництва природними ресурсами;

- соціально-економічні – стан і розвиток трудових ресурсів, винаходи технологій і предметів виробництва;

- еколого-соціальні – середовище життєдіяльності людини, джерело харчування і природних благ, фактор, що визначає умови збереження необхідного рівня здоров'я людей;

- економіко-соціальні – взаємозв'язки людей у сфері виробництва і використання суспільних благ;

- соціально-екологічні – стан НПС як результат взаємодії людини і НПС [9].

Названі вище системні елементи складають основу природно-техногенного об'єкта для будь-якого за масштабістю екологічного дослідження з виявленням вагомих факторів дестабілізації безпеки суспільства і визначенням необхідних регулюючих рішень для забезпечення екологічного розвитку.

Відповідно до інформації Національного інституту стратегічних досліджень України єдиного підходу до комплексної оцінки стану «об'єкт – НС» в умовах зростаючого впливу техногенного розвитку на екосистеми не існує. До цього часу не сформовано універсальної системи показників, що характеризують рівень безпеки та розвитку системних об'єктів різного рівня складності, не надано обґрунтування їх визначення і кількісних оцінок. Поняття безпеки включає в себе велику кількість аспектів, які важко об'єднати у єдиний показник. У світовій практиці запроваджено систему індикаторів для оцінки екологічності досліджуваних систем [10], встановлені правила врахування усіх трьох аспектів СР на основі індексного підходу [1]. При цьому залишаються не врахованими аспекти взаємодії «система – НС», наслідки процесів в межах об'єкта дослідження, викликаних впливом на нього НС.

Відсутність єдиного підходу до оцінки якості системних утворень ускладнює її автоматизацію. Незважаючи на увагу, що приділяється у сучасних дослідженнях розробці програмних комплексів, спрямованих на спрощення формування управлінської стратегії [11–12], наразі відсутній програмний продукт, що дозволяв би надавати аналіз відповідності природно-техногенних об'єктів вимогам якості, формувати множину управлінських аль-

тернатив. У зв'язку з цим, необхідним є створення аналітичної інформаційно-методичної системи оцінки стану та поведінки складних об'єктів.

Прийняття рішення стосовно підвищення якості системних утворень потребує комплексного підходу до аналізу стану складних систем з урахуванням їх взаємодії з оточуючим середовищем для визначення дестабілізуючих факторів екологічності та безпечності об'єкта дослідження. Відповідно до цього, у роботі розглянуті питання щодо удосконалення інформаційно-методичного і алгоритмічно-програмного забезпечення оцінки якості природно-техногенних об'єктів з метою подальшої автоматизації формування управлінської стратегії $U(t)$.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розв'язання задач управління якістю полягає у встановленні відповідності об'єктів умовам забезпечення сталого розвитку. Визначення на кількісному рівні оцінки стану системного об'єкта незалежно від рівня його організації проводиться відповідно до результатів аналізу «(система – НС) – процес – стан системи». Це передбачає послідовне застосування методів системного аналізу з визначенням дестабілізуючих факторів, механізмів самоорганізації систем в межах об'єкта, заходів підтримки рівноважного розвитку тощо (рис. 1).



ПП – пріоритетні показники, ВВ – відповідність вимогам безпеки, ФД – виділення факторів дестабілізації, ПР – формування стратегії, спрямованої на прийняття рішення

Рисунок 1 – Схема інформаційно-методичного забезпечення оцінки стану складних об'єктів

З усього доступного набору даних, необхідних для розв'язання поставленої задачі, встановлюється інформаційне поле для аналізу на основі створення нової системи координат $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ у початковому просторі показників X_n . Отримані результати як вхідна інформація використовується для оцінки відповідності стану об'єкта вимогам якості в залежності від змістовності систем за методом компараторної ідентифікації:

$$\begin{cases} Y_j(X) = w_{ij}(X_j - m_j) + \dots + w_{nj}(X_n - m_n); \\ \sum_{i=1}^n w_{ij}^2 = 1, j = \overline{1, n}; \\ \sum_{i=1}^n w_{ij}w_{ik} = 0, j, k = \overline{1, n}, j \neq k. \end{cases} \quad (2)$$

Визначення максимально досяжних показників Z_j у межах аналізованої системи становить таке:

$$Z_j = \begin{cases} \max(X_j) \text{ для позитивного виміру } j\text{-го показника } X, \\ \min(X_j) \text{ для негативного виміру } j\text{-го показника } X. \end{cases} \quad (3)$$

Нормування множини показників у кожній із виділених груп факторів відповідає таким вимогам:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{Z_j}, \quad \Delta_{ij} = \frac{|r_{ij} - 1|}{\max r_j - \min r_j}. \quad (4)$$

Визначення факторів дестабілізації відбувається шляхом ідентифікації значень Δ_{ij} через компаратор, що має один вхід і один вихід. На виході компаратора отримують значення $\Delta_{ij} = 1$ у випадку покриття інтервалу $[0; 0,2]$ – відповідність прийнятим вимогам якості. В іншому випадку на виході компаратора мають $\Delta_{ij} = 0$. Фактор дестабілізації визначається за такими умовами:

$$I_{ij} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } \Delta_{ij} \notin [0; 0,2]; \\ 1, \text{ якщо } \Delta_{ij} \in [0; 0,2]. \end{cases} \quad (5)$$

Загальна оцінка стану системи та регулюючі механізми для підтримки екологічної рівноваги визначаються за методом когнітивного аналізу. Об'єкт дослідження для оцінки його стану надається у вигляді когнітивної карти (КК):

$$G = \langle C, E \rangle, \quad C = \{c_i\},$$

$$E = \{e_{i,j}\} i = 1, 2 \dots n, j = 1, 2 \dots n, i \neq j. \quad (6)$$

Оцінка стійкості моделі встановлюється відповідно до результатів імпульсного аналізу:

$$\{p_j(t)\} = |v_j(t) - v_j(t-1)| \leq |v_j(t)| + |v_j(t-1)|. \quad (7)$$

Прогнозування поведінки системи визначається на базі когнітивної моделі за імпульсним режимом змін у системі:

$$v_i(t+1) = v_i(t) + \sum_{j=1}^n q(e_{ij}) p_j(t), \quad (8)$$

де $q(e_{ij})$ визначається як:

$$\begin{cases} q(e_{ij}) = 1, \text{ якщо збільшення } v_i \text{ призводить до збільшення } v_j; \\ q(e_{ij}) = -1, \text{ якщо збільшення } v_i \text{ призводить до зменшення } v_j; \\ 0, \text{ якщо дуга } e_{ij} \text{ відсутня.} \end{cases} \quad (9)$$

Формування управлінської стратегії $U(t)$ відповідає вимогам максимального наближення до рівноважного сталого стану у межах складної системи за оптимальною траєкторією змін, що відповідають мінімальним деструктивним змінам:

$$U(t) = U\{S(t), S_k, t\} = U^*(t) + U\{S^*(t), t\}. \quad (10)$$

На основі визначеного інформаційного забезпечення відповідності вимогам якості формується алгоритмічно-програмний комплекс, який у роботі реалізовано для оцінки екологічної безпеки промислових об'єктів (рис. 2).

4 ЕКСПЕРИМЕНТ

Реалізація запропонованого методичного забезпечення апробована при розв'язанні задач визначення рівня екологічної безпеки стану природно-техногенних територій і промислових об'єктів Харківської області [13]. На практиці розглядається ситуація прийняття рішення з регулювання екологічної якості функціонування системного об'єкта еколого-соціально-економічного змісту при обмеженій кількості даних на основі запропонованого

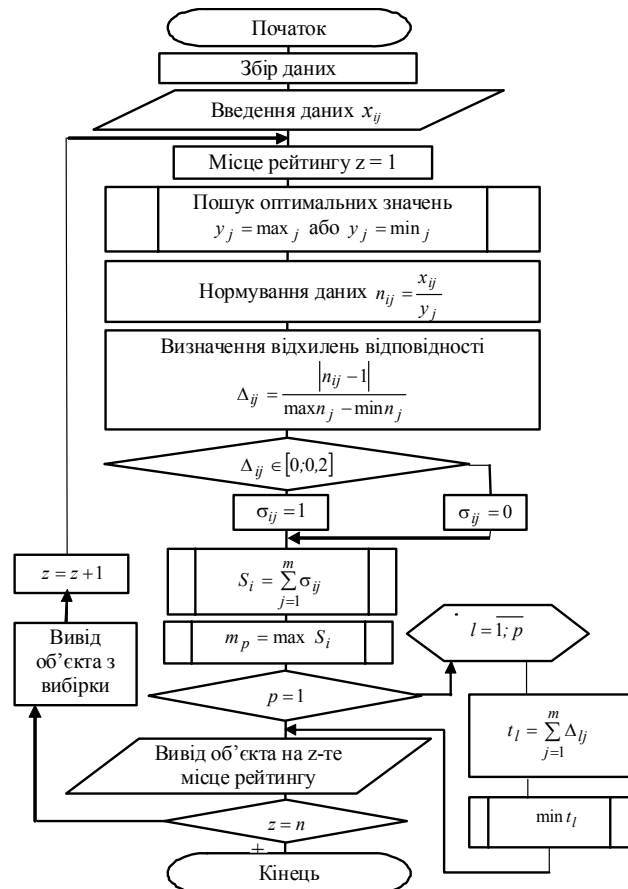


Рисунок 2 – Алгоритмічне забезпечення з оцінки відповідності вимогам екологічної безпеки техногенних систем

підходу з ідентифікації відповідності його вимогам екологічної безпеки.

Згідно із запропонованою комплексною оцінкою екологічної відповідності (1)–(10) (рис. 2) встановлюють рейтинг досліджуваних техногенних джерел навантаження на НПС за рівнем їх безпечності. З метою автоматизації визначеного інформаційно-методичного забезпечення у роботі розроблено програмний продукт мовою С# у середовищі Microsoft Visual Studio 2010 для оцінювання екологічності і безпечності підприємств і районів Харківської області, що складається з головного вікна, яке містить посилання на форми для оцінки стану промислових підприємств (рис. 3) і районів Харківської області (рис. 4). Зчитування даних здійснюється з текстового файлу. Рейтинг об'єктів за їх безпечністю формується після натискання кнопки «Розрахувати».

Для оцінки безпечності промислових об'єктів використано вісім параметрів, кожен з яких позначає кількість викидів в тоннах на рік певної речовини: x_{i1} – метали та

їх сполуки; x_{i2} – речовини у вигляді суспендованих твердих частинок; x_{i3} – сполуки азоту; x_{i4} – діоксид і сполуки сірки; x_{i5} – оксид вуглецю; x_{i6} – неметанові леткі органічні сполуки; x_{i7} – метан; x_{i8} – діоксид вуглецю. Стан НС встановлюється відповідно до оцінки стану районів Харківської області, в яких знаходяться зазначені підприємства, за такими параметрами: викиди, тис. т: x_{i1} – пил, x_{i2} – діоксид сірки, x_{i3} – діоксид азоту, x_{i4} – оксид вуглецю, x_{i5} – всього викидів; наявність на території сміттєзвалищ – x_{i6} , шт.; площі під твердими побутовими відходами – x_{i7} , га; фінансування природоохоронної діяльності – x_{i8} , тис. грн. [14].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами аналізу стану районів Харківської області найбільш небезпечними визначено Зміївський, Балаклійський та Чугуївський райони. Відповідно до оцінки факторів безпеки, саме на їх території знаходяться підприємства – джерела порушення екологічної



Рисунок 3 – Фрагмент програмного розрахунку екологічності роботи підприємств

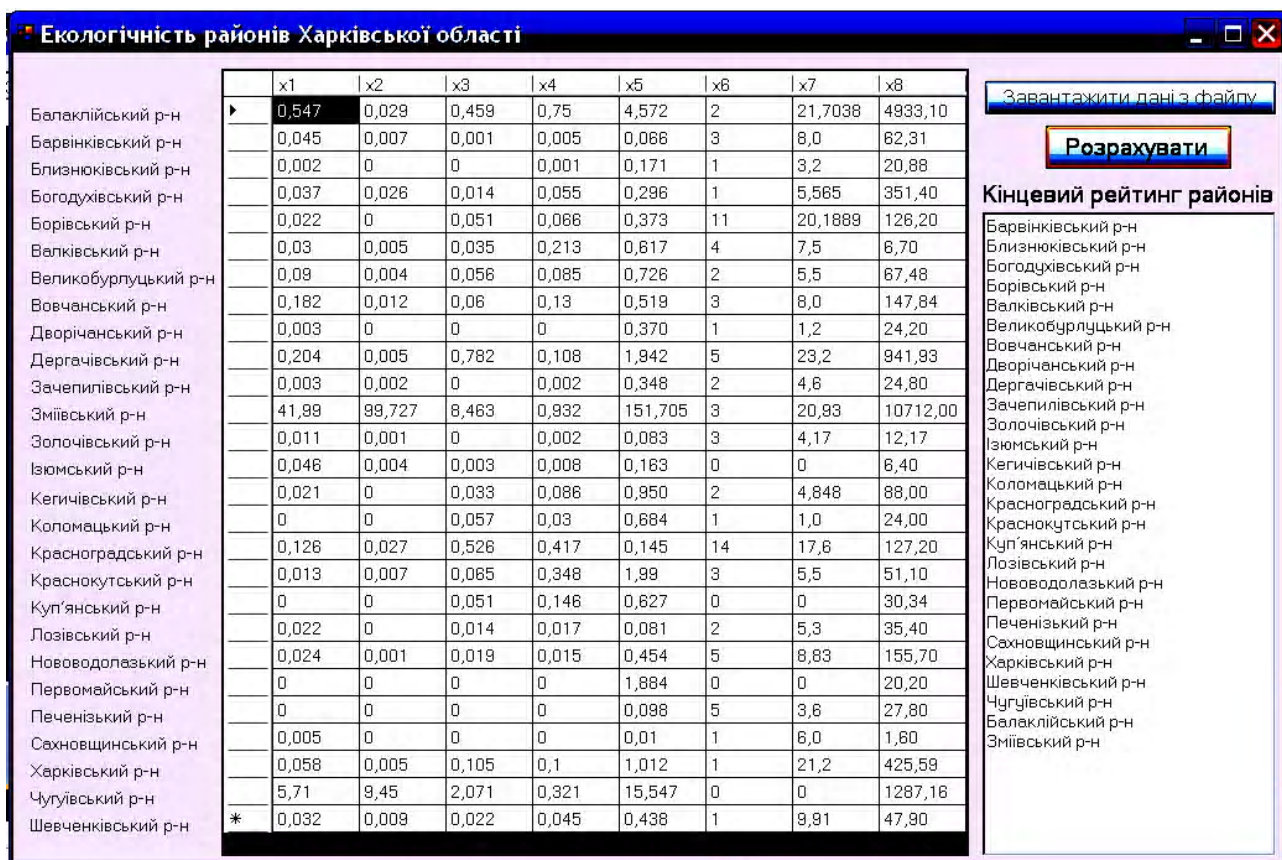


Рисунок 4 – Фрагмент програмного розрахунку оцінки стану

безпеки: у ПАТ «Свроцемент-Україна» – Балаклійський район, ПАТ «Харківська ТЕЦ-5» – Дергачівський район, Філія «Теплоелектроцентрально» ТОВ «ДВ навтогазвидобування» – Чугуївський район, Зміївська ТЕС ПАТ «Центренерго» – Зміївський район. З метою поліпшення екологічної ситуації в районах розроблено КК як модель для прогнозування змін і встановлення ефективного управління якістю НПС (рис. 5а).

Вагомим фактором дестабілізації в районах відповідно до вимог безпеки за результатами аналізу (див. рис. 2) є незадовільний стан атмосферного повітря. За даними проведеного імпульсного режиму прогнозування стану об'єкта визначено перспективи підвищення якості на 10% (рис. 5б). Екологічна ефективність регулювання стану атмосферного повітря для територій визначається відповідним збільшенням екологічно чистих підприємств на 10%, зростанням кількості населення на 40%.

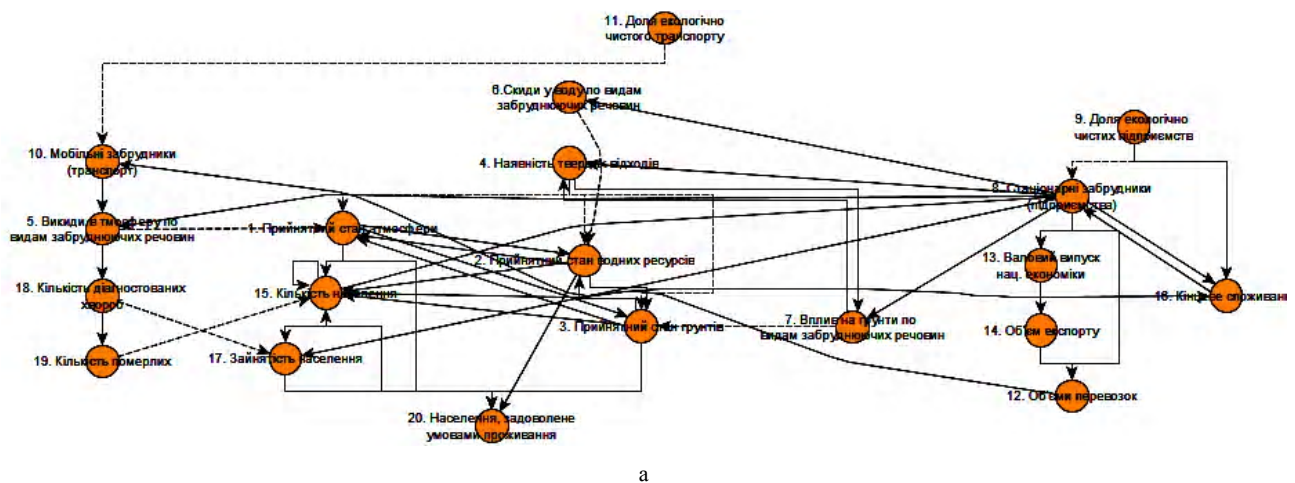
Таким чином, завдяки комплексному дослідженню в межах системного об'єкта (підприємство – НС, підприємства – район) визначено закономірне зростання техногенної напруги як наслідок незадовільного стану НС у результаті небезпечного рівня викидів підприємствами. Об'єктивна всебічна оцінка екологічної якості стану територій районів дозволила встановити основні напрями досягнення безпечного стану за рахунок підвищення якості атмосферного повітря при відповідному рівні екологізації підприємств [15].

6 ОБГОВОРЕННЯ

У роботі розв'язано науково-практичну задачу з формування комплексу системних методів для всебічного дослідження складних об'єктів з визначення об'єктивної оцінки екологічної безпеки в умовах невизначеності взаємодії «об'єкт – НС» завдяки запровадженню аналітичної системи «(об'єкт – НС) – процес – стан об'єкт». У результаті апробації на практиці методичного забезпечення на основі розробленого інформаційно-програмного продукту отримані порівняні результати для різних завдань дослідження стану та функціональності складних систем. Надані висновки щодо оцінки рівня безпеки стану підприємств і районів області загалом відповідають статистичним даним, поданим у Регіональній доповіді про стан НПС у Харківській області [14].

Перевагою запропонованої системи методів з аналізу еколого-соціально-економічних об'єктів є встановлення факторів дестабілізації на основі врахування принципів самоорганізації складних утворень (синергетика), взаємозалежності факторів регулювання відповідно до кооперативних зв'язків в системному об'єкті (когнітивний аналіз).

Недоліком є багатоетапність отримуваних висновків про стан об'єкта, залежність від кількості доданих до аналізу параметрів, що в свою чергу дозволяє підвищити адекватність результатів оцінювання.



а

$$V := (0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$P0 := (0.1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$V0 := V + P0$$

$$V1 := V0^T + A^T \cdot P0^T$$

$$P1 := A^T \cdot P0^T$$

$$V2 := V1 + A^T \cdot P1$$

$$V2^T = \begin{array}{c|cccccccccccccccccccccc} & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 & 18 & 19 & 20 \\ \hline 1 & 1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0.3 \end{array}$$

б

Рисунок 5 – Дослідження поведінки промислового підприємства за прогнозованими змінами

7 ПОДЯКИ

Робота виконувалась на кафедрі комп'ютерного моніторингу і логістики в рамках державних замовлень на науково-технічні праці згідно наукових напрямків Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» у межах планів держбюджетної НДР МОН України: «Розробка математичних моделей і методів розв'язання задач управління виробництвом в нечітких умовах» (ДР №0106U005166).

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу автоматизації прийняття рішення на основі наданого інформаційно-методичного забезпечення оцінки відповідності вимогам безпеки стосовно підвищення якості еколого-соціально-економічних систем у контексті СР на рівні аналізу «(стан системи – навколишнє середовище) – процес – стан системи». У результаті досліджень встановлено:

1) складові елементи системи оцінки якості складних об'єктів відповідно до їх цільового призначення і виконання вимог сталого розвитку (рис. 1);

2) структуру методичного забезпечення комплексного оцінювання якості системних об'єктів за результатами дослідження «(система – НС) – процес – стан» та алгоритмічно-інформаційну підтримку його реалізації (рис. 2, формули (1)–(9));

3) переваги практичного застосування сформованого комплексу системних методів і програмно-інформаційного забезпечення при встановленні об'єктивної оцінки екологічного стану підприємств і районів Харківської області (рис. 3–4).

Наукова новизна роботи полягає у формуванні комплексної методичної інформаційно-програмної підтримки оцінки екологічності та безпеки системних об'єктів еколого-соціально-економічного змісту, введення в методичну основу системного аналізу послідовного оцінювання «стан (система – НС) – процес (взаємодія, внутрішнє регулювання, самоорганізація) – стан системи».

У якості подальшого розвитку роботи передбачається розробка цілісного програмно-інформаційного комплексу з отримання знань про нові особливості поведінки «системний об'єкт природно-техногенний – навколишнє природне середовище».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Качинський А. Б. Екологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення / А. Б. Качинський. – К.: НІСД, 2001. – 312 с.

Козуля Т. В.¹, Белова М. А.²

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

²Аспірант, асистент кафедри комп'ютерного моніторингу і логістики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МЕТОДОВ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Актуальность. Формирование информационно-методического и алгоритмически-программного обеспечения для оценки уровня устойчивого развития эколого-социально-экономических систем различного уровня сложности требует становления комплексного системного подхода в решении проблемных научно-практических задач.

Цель. Формирование методического и информационно-программного обеспечения оценки соответствия состояния и функциональности системного объекта требованиям экологического качества с позиций устойчивого развития, что составляет его безопасность для окружающей среды.

Методы оценки качества системных объектов, имеющих различные уровни сложности, сформированы в комплексную аналитическую систему для последовательного решения задач обработки и оценки мониторинговых данных: главных компонент, компараторной идентификации и когнитивного моделирования.

2. Харламова Г. Индекс экологической безопасности Украины: концепция та оцінка / Г. Харламова, В. Бутковський // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – 2014. – № 7 (160). – С. 92–97.
3. Іванюта С. П. Екологічна безпека регіонів України: порівняльні оцінки / С. П. Іванюта, А. Б. Качинський // Стратегічні пріоритети. – 2013. – №3 (28). – С. 157–164.
4. Аналіз сталого розвитку – глобальний та регіональні контексти. Україна в індикаторах сталого розвитку / [М. З. Згуровський, Г. О. Статюха, С. В. Войтко и др.]. – К.: Політехніка, 2010. – 359 с.
5. Соха Ю. І. Принципи сталого розвитку і проблема природно-техногенної безпеки / Ю. І. Соха // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2011. – № 698. – С. 103–111.
6. Зеркалов Д. В. Проблеми екології сталого розвитку: монографія / Д. В. Зеркалов. – К.: Основа, 2013. – 430 с.
7. Turvey R. Evaluation, Sustainable Development, and the Environment in the South Pacific / R. Turvey // Journal of MultiDisciplinary Evaluation. – 2007. – Vol. 4, №7. – P. 32–48.
8. Chang Y-Z. Evaluation of Sustainable Development of Resources-Based Cities in Shanxi Province Based on Unascertained Measure / Y-Z Chang, S-C Dong // Sustainability. – 2016. – №8(6). – P. 585–603.
9. Циганенко О. В. Стратегії соціо-еколого-економічного розвитку міських територій: дис. к.т.н, СумДУ, 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/45880>
10. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. 3rd Edition. – Department of Economic and Social Affairs. – NY: UN, 2007. – 99 p.
11. Программный комплекс для оценки экологоэкономической устойчивости промышленного предприятия / [А. А. Тайлакова, А. А. Кудрявцев, И. Е. Трофимов, В. Г. Михайлов] // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 6 (100). – P. 121–124.
12. Програмний засіб підтримання прийняття оптимальних еколого-економічних рішень у промисловості / [І. М. Джигирей, О. В. Минько, Р. С. Журавчак, Р. Б. Медведєв] // Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку. – КМХТ-2016: Збірник наукових статей П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. – Київ: НТУУ «КПІ», 2016 – С. 62–65.
13. Козуля Т. В. Розробка оцінки екологічності техногенних об'єктів на основі методу компараторної ідентифікації / Т. В. Козуля, М. О. Білова, М. М. Козуля // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 5/10 (77). – С. 27–34.
14. Доповідь про стан навколишнього природного середовища у Харківській області у 2012 році [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.menr.gov.ua/docs/activity-dopovidi/regionalni/rehionalni-dopovidi-u-2012rotsi/kharkivska_2012.pdf
15. Бухкало С. І. Особливості моделей утилізації різновидів полімерних відходів / С. І. Бухкало // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 19 (1191). – С. 11–17.

Стаття надійшла до редакції 21.02.2017.

Після доробки 13.03.2017.

Результати. Представлен аналіз системних методів для формування комплексного методического забезпечення оцінки стану еколого-соціально-економічних систем для автоматизації управління їх безпекою. Обґрунтована цілесобразність створення алгоритмічно-програмного комплексу оцінки якості системних образів, що складаються з об'єкта дослідження і оточуючої його середовища, для визначення об'єктивного зваженого управлінського рішення. Сформована аналітична система методів, послідовне використання яких забезпечує оцінювання рівня безпеки системного об'єкта за результатами досліджень «(система – оточуюча середовище) – процес – рівноважний стан системи». Алгоритмічне забезпечення оцінки якості системних об'єктів і розроблений для цього програмний продукт апробовані при розв'язанні завдань екологічної безпеки для районів і підприємств Харківської області. Визначені перспективи управлінської діяльності за результатами оцінки стану підприємств Харківської області.

Висновки. Наукова новизна полягає в формуванні комплексної методическої інформаційно-програмної підтримки оцінки екологічності і безпеки системних об'єктів еколого-соціально-економічного вмісту, введення в методическу основу системного аналізу об'єктів послідовності оцінки «стан (система – оточуюча середовище) – процес (взаємодія, внутрішнє регулювання, самоорганізація) – стан системи». Практична значимість полягає в розробці інформаційно-методического і алгоритмічного забезпечення комплексної оцінки рівня екологічної безпеки складних еколого-соціально-економічних об'єктів; інформаційно-програмного комплексу рішення завдань по оцінці стану рівня безпеки складних об'єктів, невідповідності розглянутих параметрів вимогам збалансованого стійкого розвитку систем різного рівня дослідження.

Ключові слова: складна система, оцінка якості, інформаційно-методическе забезпечення, алгоритмічне забезпечення, програмний продукт.

Kozulia T. V.¹, Bilova M. O.²

¹Dr.Sc., Associate professor, Professor of department of computer monitoring and logistics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

²Post graduate student, Assistant of department of computer monitoring and logistics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

INFORMATION-ANALYTICAL SYSTEM ASSESSMENT METHODS OF COMPLEX OBJECTS

Context. Formation of information-methodical, algorithmic and software sustainable development evaluation of ecological-socio-economic different complexity systems requires the formation of an integrated system approach to solving scientific problems.

Objective. Formation of methodological and information software for the evaluation of compliance state and functionality of the system object with the requirements of environmental quality from the standpoint of sustainable development, which makes it safe for the environment.

Methods for evaluation the quality of the system objects with different levels of difficulty are formed into an integrated analytical system for sequential processing solutions of tasks and evaluation of monitoring data: principal component analysis, comparator identification method and cognitive modelling.

Results. The analysis of common approaches to the formation of complex methodical support assessment of ecological and socio-economic systems state for the security management automation is given. The expediency of creating a methodical support system of system units quality estimation in accordance with the principles of sustainable development for decision making is grounded. Mathematical methods that provide system object security level analysis and evaluation of the research results “environment – the process – the equilibrium state of the system” are defined. Algorithmic support of system objects quality estimation and designed software are tested for solution of environmental safety problems at the level of regions and enterprises of Kharkov region. The prospects regarding the state of analyzed Kharkiv region enterprises management are identified.

Conclusions. Scientific novelty is defined by the formation of the complex methodological information and software support evaluation of environmental and safety system objects of ecological and socio-economic content, introduction to the methodological basis of the system analysis of objects estimation sequence “state (the system – environment) – the process (interaction, internal control, self-organization) – state of the system”. The practical significance is to develop an information-methodological and algorithmic support a comprehensive assessment of the environmental safety of complex ecological and socio-economic facilities; informational software solutions-level status assessment of safety problems of complex objects, mismatch parameters under consideration the requirements of a balanced sustainable development of the systems of different levels of study.

Keywords: complex system, quality evaluation, information and methodological support, algorithmic support, software.

REFERENCES

- Kachynskiy A. B. Ekologichna bezpeka Ukrainy: systemnyi analiz perspektiv pokrashchennia. Kiev, NISD, 2001, 312 p.
- Kharlamova H., Butkovskiy V. Indeks ekologichnoi bezpeky Ukrainy: kontsepsiia ta otsinka, *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu imeni Tarasa Shevchenka*, 2014, No. 7(160), pp. 92–97.
- Ivaniuta S. P., Kachynskiy A. B. Ekologichna bezpeka rehioniv Ukrainy: porivnialni otsinky, *Stratehichni priorytety*, 2013, No. 3 (28), pp. 157–164.
- Zghurovskiy M. Z., Statiukha H. O., Voitko S. V., Melnychenko A. A., Boldak A. O., Dzhyhyrei I. M. Analiz staloho rozvytku – hlobalnyi ta rehionalni konteksty. Ukraina v indyktorakh staloho rozvytku. Kiev, Politehnika, 2010, 359 p.
- Sokha Iu. I. Pryntsyipy staloho rozvytku i problema pryrodno-tekhnohennoi bezpeky, *Visn. Nats. un-tu «Lviv. politehnika»*, 2011, No. 698, pp. 103–111.
- Zerkalov D. V. Problemy ekologichnoi staloho rozvytku: Monohrafiia. Kiev, Osnova, 2013, 430 p.
- Turvey R. Evaluation, Sustainable Development, and the Environment in the South Pacific, *Journal of MultiDisciplinary Evaluation*, 2007, Vol. 4, No. 7, pp. 32–48.
- Chang Y-Z, Dong S-C Evaluation of Sustainable Development of Resources-Based Cities in Shanxi Province Based on Unascertained Measure, *Sustainability*, 2016, No. 8(6), pp. 585–603.
- Tsyhanenko O. V. Stratehii sotsio-ekologo-ekonomichnoho rozvytku miskyykh terytorii: dys. k.t.n., SumDU, 2016 [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: <http://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/45880>
- Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies. 3rd Edition. Department of Economic and Social Affairs. NY, UN, 2007, 99 p.
- Tailakova A. A., Kudriavtsev A. A., Trofymov Y. E., Mykhailov V. H. Prohrammnyi kompleks dlia otsenky ekologo-ekonomicheskoi ustoiichyivosti promyshlennoho predpriiatia, *Vestnyk Kuzbasskoho hosudarstvennoho tekhnicheskoho unyversyteta*, 2013, No. 6 (100), pp. 121–124.
- Dzhyhyrei I. M., Mynko O. V., Zhuravchak R. Ie., Medvediev R. B. Prohramnyi zasib pidtrymuvannia pryiniattia optymalnykh ekologo-ekonomichnykh risheh u promyslovosti, *Komp'iuterne modeliuvannia v khimii i tekhnolohiiakh ta systemakh staloho rozvytku KMKhT-2016: Zbirnyk naukovykh statei P'iatoi mizhnar. nauk.-prakt. konf. Kyiv, NTUU «KPI»*, 2016, pp. 62–65.
- Kozulia T. V., Bilova M. O., Kozulia M. M. Rozrobka otsinky ekologichnosti tekhnohennykh ob'iektiv na osnovi metodu komparatornoï identyfikatsii, *Skhidno-leuropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 2015, No. 5/10(77), pp. 27–34.
- Dopovid pro stan navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha u Kharkivskii oblasti u 2012 rotsi [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu: http://www.menr.gov.ua/docs/activity-dopovid/regionalni/rehionalni-dopovidy-u-2012-rotsi/kharkivska_2012.pdf
- Bukhhalo S. I. Osoblyvosti modelei utylizatsii riznovydiv polimernykh vidkhodiv, *Visnyk NTU «KhPI»*, 2016, No. 19 (1191), pp. 11–17.

УДК 004.9

Коробчинський М. В.¹, Чирун Л. Б.², Висоцька В. А.³, Кондратьєв Є. О.⁴

¹Д-р. техн. наук, доцент, професор 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 ФОРМУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ КОНТЕНТУ ІНТЕРНЕТ-ГАЗЕТИ МУЗИЧНИХ НОВИН

Актуальність. Негативні чинники у формуванні контенту ускладнюють процес пошуку необхідних даних при скануванні різних джерел інформації. Збільшення фізичного обсягу та зміна актуальності/динаміки контентних потоків (систематичне та нерегулярне оновлення) призводить до виникнення дублювання, інформаційного шуму та надмірності результатів пошуку контенту. Охоплення та узагальнення великих динамічних потоків контенту, які безперервно генерують в Інтернет-джерелах, вимагає якісно нових методів/підходів пошуку як контент-моніторингу.

Мета. Метою виконання роботи є розроблення методу формування та аналізу контенту Інтернет-газети музичних новин для активного залучення постійних користувачів інформаційного ресурсу новин та збільшення цільової аудиторії. Завданням є розроблення системи для розповсюдження музичних новин з використанням методу контент-моніторингу для формування та аналізу текстового контенту інформаційного ресурсу Інтернет-газети.

Метод. Вхідною інформацією для контент-моніторингу є текст на природній мові як послідовність символів, вихідна інформація – це таблиці розділів, речень і лексем аналізованого тексту. Контент-моніторинг є програмним засобом автоматизації знаходження важливих складових в потоках контенту. Це змістовний аналіз потоків контенту з метою постійного отримання необхідних якісних/кількісних зрізів на протязі не визначеного наперед проміжку часу. Складовою контент-моніторингу є контентний пошук та контент-аналіз тексту. Контент-аналіз призначений для пошуку контенту в масиві даних за змістовими лінгвістичними одиницями. Одиниця рахунку є кількісною мірою одиниці аналізу, що дозволяє реєструвати частоту (регулярність) появи ознаки категорії аналізу в тексті (кількість певних слів або їх поєднань, рядків, друкованих знаків, сторінок, абзаців, авторських аркушів, площа тексту тощо).

Результати. Розв'язано актуальну задачу дослідження і розроблення методів та засобів опрацювання інформаційних ресурсів інтелектуальної інформаційної систем формування контенту із використання розробленої класифікації, математичного та програмного забезпечення та узагальненої архітектури системи. Обґрунтовано необхідність розроблення методів і засобів опрацювання інформаційних ресурсів в інтелектуальних інформаційних систем формування контенту шляхом удосконалення архітектури системи з метою автоматизації процесів формування, управління та реалізації контенту.

Висновки. Використання контент-аналізу в моніторингу джерел даних в Інтернет автоматизує процес пошуку найбільш важливих компонент в потоці змісту, у виборі даних з цих джерел. Це усуває дублювати контенту, інформаційний шум, паразитні результати резервування контенту та багато іншого. Цей метод використовується на наступних етапах аналізу змісту для більш точних результатів для створення унікального контенту, який користується попитом.

Ключові слова: аналіз, контент-аналіз змісту інформаційних ресурсів, контент-аналіз, рейтингова оцінка, система управління контентом.

НОМЕНКЛАТУРА

IS – інформаційна система;

OIP – опрацювання інформаційних ресурсів;

SEKK – система електронної контент-комерції;

X – множина вхідної інформації з Web-сайтів або від модераторів;

Formation – функція формування контенту;

C – множина контенту;

Management – функція управління контентом;

Realization – функція реалізації контенту;

Y – множина вихідної інформації;

Gathering – функція збирання інформації з джерел;

Formatting – форматування інформації, перетворення в множину контенту;

KeyWords – функція функцій виявлення ключових слів, понять;

Categorization – функція автоматичної рубрикації;

Backup – функція виявлення дублювання змісту контенту;

Dissemination – функція вибіркового поширення контенту;

Q – множина запитів;

R – функція формування та подання сторінки;

Edit – функція редагування та модифікації контенту;

Caching – функція формування кешу;

BuInfPortr – множина функцій формування інформаційних портретів;

BuDigest – множина функцій формування дайджестів;

IdThemTop – множина функцій виявлення тематичних сюжетів;

ConCorrTablConc – множина функцій побудови таблиць взаємозв'язку понять;

CalRankConc – множина функцій розрахунку рейтингів понять;

C_p – скінченна множина контенту інформаційних портретів;

C_D – скінченна множина контенту дайджестів;

C_T – скінченна множина контенту тематичних сюжетів;

C_C – скінченна множина контенту таблиць взаємозв'язку понять;

C_R – скінченна множина контенту рейтингів понять.

ВСТУП

Бурхливий розвиток електронної комерції сприяв у виникненні потреби створення шаблону інформаційного ресурсу відповідно до потреб користувача для його задоволення у повній мірі [1]. Наприклад, більшість інформаційних ресурсів з музичних новин світу чи країни є не адаптивними та не зрозумілими для використання кінцевим користувачем, часто нагромаджені надлишковим контентом та рекламою. Більшість з них не володіють адаптивною версткою для різних електронних носіїв. Існуючі та розповсюджені моделі систем або їх шаблони для реалізації СЕKK не вирішують низку проблем ОІР згідно потреб кінцевого користувача або не враховує специфіки діяльності підприємства чи людини, специфіки галузі науки чи промисловості тощо [2]. Тому з'являється попит на вдосконалення процесу ОІР та розроблення загальної архітектури СЕKK з використанням математичної лінгвістики та контент-аналізу текстових масивів даних [3]. Проблема полягає у відсутності загального стандартизованого підходу до проектування і розроблення архітектури СЕKK та процесу ОІР в даній системі [4]. Відсутність загальної класифікації приводить до проблем визначення та формування уніфікованих методів ОІР та реалізації відповідних програмних засобів [5]. Це обґрунтовує мету, актуальність, доцільність та напрям дослідження.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою роботи є розроблення шаблону інформаційного ресурсу з автоматичним наповненням контенту відповідно до вимог користувача для вирішення таких завдань: автоматичне формування комерційного контенту; автоматичне збирання та створення контенту; автоматичне форматування контенту; виявлення ключових слів та понять; рубрикація контенту; виявлення дублювання контенту; формування дайджесту контенту; вибіркове поширення контенту [5]. Формальна модель СЕKK – це шістка

$$S = \langle X, Formation, C, Management, Realization, Y \rangle.$$

Формальна модель формування інформаційних ресурсів це

$$Formation = \langle X, C, Gathering, Formatting, KeyWords, Categorization, Backup, Dissemination \rangle.$$

Моделі управління інформаційними ресурсами.

1. Генерація сторінок за запитом відбувається на основі зв'язки «Модуль редагування → База даних → Модуль представлення». Формальна модель генерації сторінок за запитом –

$$Management_Q = \langle X, C, Q, R, Edit, Y \rangle.$$

2. Генерація сторінок при редагуванні. При внесенні змін до змісту сайту створюють набір статичних сторінок.

При такому способі не враховується інтерактивність між відвідувачем і вмістом сайту. Формальна модель системи генерації сторінок при редагуванні – $Management_E = \langle C, Edit, Y \rangle$. Процес формування сторінок описується функцією $Edit$ вигляду:

$$\vec{y}(t) = Edit(\vec{c}, Weight, t).$$

3. Змішаний тип поєднує в собі переваги перших двох типів. Може бути реалізований шляхом кешування – модуль представлення генерує сторінку один раз, надалі вона в декілька разів швидше підвантажується з кешу. Кеш може оновлюватися як автоматично, по закінченню деякого терміну часу або при внесенні змін до певних розділів сайту, так і уручну по команді адміністратора. Інший підхід – збереження певних інформаційних блоків на етапі редагування сайту і збірка сторінки з цих блоків при запиті відповідної сторінки користувачем. Формальна модель системи змішаного типу – $Management_M = \langle X, C, Q, R, Edit, Caching, Y \rangle$.

Формальна модель реалізації інформаційних ресурсів – це

$$Realization = \langle X, C, BuInfPortr, BuDigest, IdThemTop, ConCorrTablConc, CalRankConc, Y \rangle.$$

Скінченна множина контенту

$$C = \langle C_P, C_D, C_T, C_C, C_R \rangle \text{ є адекватною та повною.}$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Однією з головних особливостей нашого часу є постійне зростання темпів виробництва інформації [3]. Цей процес об'єктивний і в цілому, безумовно, позитивний. Однак на сьогоднішній день людство зустрілося з парадоксальною, на перший погляд, ситуацією: прогрес в області виробництва інформації веде до зниження загальної рівня інформованості [3–5]. Окрім збільшення обсягів інформації до масштабів, які унеможливають її безпосереднє опрацювання, виник цілий ряд специфічних проблем, пов'язаних з швидким розвитком інформаційних технологій [6]. Ситуація різкого зростання темпів виробництва інформації породила ряд проблем: непропорційне зростання інформаційного шуму через слабку структурованість інформації; поява паразитної інформації (одержуваної в якості додатків); невідповідність формально релевантної інформації (тематично відповідної) дійсним потребам її споживачів; багаторазове дублювання інформації (типовий приклад – публікація одного повідомлення в різних виданнях) [7]. Внаслідок перелічених обставин, традиційні інформаційно-пошукові системи поступово стали втрачати свою актуальність. Причина цього криється не стільки в фізичних обсягах інформаційних потоків, скільки в їх динаміці, тобто в постійному систематичному відновленні інформації, яка далеко не завжди має очевидну регулярність. Охоплення та узагальнення великих динамічних інформаційних потоків, які безперервно генеруються в засобах масової інформації, вимагає якісно нових підходів [8]. Вихід може бути знайдений тільки в засобах автоматизації виявлення

найбільш важливих складових в інформаційних потоках [9]. Саме тому в останні роки все частіше стали використовувати системи моніторингу ресурсів [10], які тісно пов'язані з контент-аналізом [11]. Цей перспективний напрямок отримав назву контент-моніторинг [12]. Його поява була викликана, насамперед, завданнями систематичного відстеження тенденцій і процесів в інформаційному середовищі, яке постійно оновлюється. Під контент-моніторингом найчастіше розуміють змістовний аналіз інформаційних потоків з метою отримання необхідних якісних і кількісних зрізів, який ведеться постійно протягом невизначеного заздалегідь проміжку часу [12]. Найважливішою методологічною складовою контент-моніторингу є контент-аналіз та життєвий цикл контенту [13–16].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Складовою контент-моніторингу є контентний пошук та контент-аналіз тексту [17]. Контент-аналіз призначений для пошуку контенту в масиві даних за змістовими лінгвістичними одиницями [18–20]. Одиниця рахунку є кількісною мірою одиниці аналізу, що дозволяє реєструвати частоту (регулярність) появи ознаки категорії аналізу в тексті (кількість певних слів або їх поєднань, рядків, друкованих знаків, сторінок, абзаців, авторських аркушів, площа тексту тощо).

Алгоритм 1. Контент-аналіз текстового комерційного контенту.

Етап. 1. Визначення набору критеріїв для текстового комерційного контенту.

Крок 1. Формування набору критеріїв як тип джерела (форум, електронна пошта, Інтернет-газета, чат, Інтернет-журнал); тип контенту (стаття, електронний лист, банер, коментарі); учасники комунікації (відправник, одержувач, реципієнт).

Крок 2. Визначення розміру (мінімальний обсяг або довжина), частоти появи, способу/місця розповсюдження та час появи контенту.

Крок 3. Фільтрування згідно сформованого набору критеріїв контентного потоку та зберігання ідентифікованого релевантного контенту.

Етап. 2. Контент-аналітичний відбір. Формування вибіркової сукупності контенту за критеріями обмеженої вибірки з більшого масиву.

Етап. 3. Виявлення змістовних одиниць аналізу текстового комерційного контенту (словосполучення, речення, тема, ідея, автор, персонаж, соціальна ситуація, частина тексту, кластеризована за змістом категорії аналізу). Вимоги до вибору лінгвістичної одиниці аналізу: велика для інтерпретації значення; достатньо мала, щоб не інтерпретувати багато значень; легко ідентифікується; кількість одиниць достатньо велика для проведення вибірки.

Етап. 4. Виділення одиниць рахунку аналізу текстового контенту.

Крок 1. Якщо одиниці рахунку збігаються з одиницями аналізу, то знаходять частоту появи виділеної змістовної одиниці, інакше перейти до кроку 2.

Крок 2. Модератор на основі аналізованого контенту висуває одиниці рахунку, наприклад, протяжність текстів;

площа тексту, заповнена змістовними одиницями; кількість рядків (абзаців, знаків тощо); розмір/вид файлу; кількість рисунків з певним змістом тощо.

Етап. 5. Порівняння змістовних одиниць аналізу з одиницями рахунку.

Крок 1. Класифікація за угрупованнями із оцінкою ваги змістовних категорій в загальному обсязі тексту. Класифікатором є загальна таблиця, в яку зведені всі категорії аналізу і одиниці аналізу. Фіксують одиниці виразу категорій.

Крок 2. Статистичні розрахунки зрозумілості та атрактивності контенту.

Етап. 6. Розроблення інструменту контент-аналізу.

Крок 1. Створення закодованого протоколу контенту для компактності подання даних та швидкого порівняння результатів аналізу різного контенту.

Крок 2. Заповнення протоколу контенту властивостями (автор, час, обсяг тощо).

Крок 3. Заповнення протоколу контенту підсумками його аналізу (кількість вживання в ньому певних одиниць аналізу і висновки щодо категорій аналізу). Протокол кожного контенту заповнюється на основі підрахунку даних всіх його реєстраційних карток.

Етап. 7. Розроблення таблиці контент-аналізу. Тип таблиці визначають у вигляді системи скоординованих і субординованих категорій аналізу: кожна категорія (питання) передбачає ряд ознак (відповідей), за якими квантифікується зміст тексту.

Етап. 8. Розроблення кодувальної матриці контент-аналізу.

Крок 1. Якщо обсяг вибірки ≥ 100 одиниць, то аналізується набір матричних листів, інакше виконати крок 2.

Крок 2. Якщо вибірка < 100 одиниць, то проводиться двовимірний аналіз. В цьому випадку для кожного контенту формується кодувальна матриця.

Етап. 9. Проведення аналізу тексту згідно створених кодувальних матриць.

Етап. 10. Інтерпретація результатів. Виявляють і оцінюють характеристики контенту з врахуванням підрахованих коефіцієнтів за певний період часу на визначену категорію.

Застосування контент-аналізу для моніторингу Інтернет-джерел даних дозволяє автоматизувати процес знаходження найбільш важливих складових в потоках контенту при відборі даних з цих джерел шляхом використання частотно-лінгвістичних та евристичних методів, технології Text Mining, а також ідеології Web-сервісів, базуючись при цьому на інформаційних ресурсах, накопичених в WWW першого покоління [10–20]. Це усуває дублювання контенту, інформаційний шум, паразитичний контент, надмірність [21–23].

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Модуль формування контенту забезпечує збирання інформації з різноманітних Web-сайтів та її форматування; виявлення ключових слів і понять контенту; автоматичну рубрикацію контенту; виявлення дублювання змісту контенту; вибіркове поширення контенту. Головне завдання модуля управління контентом: формування,

ротація баз даних і забезпечення доступу до неї; формування оперативних і ретроспективних баз даних; персоналізація роботи користувачів, збереження персональних запитів користувачів і джерел, ведення статистики роботи; забезпечення пошуку в бази даних; генерація вихідних форм; інформаційна взаємодія з іншими базами даними. Існує три моделі управління контентом: генерація сторінок за запитом, генерація сторінок при редагуванні; змішаний тип. Генерація сторінок за запитом відбувається на основі зв'язки: Модуль редагування $\Rightarrow$ База даних $\Rightarrow$ Модуль подання. Генерація сторінок при редагуванні полягає у створенні набору статичних сторінок при внесенні змін до сайту (враховується інтерактивність між відвідувачем і вмістом сайту). Модель реалізації контенту забезпечує формування інформаційних портретів; формування дайджестів; побудова таблиць взаємозв'язку понять та розрахунок їх рейтингів, виявлення нових подій та тематичних сюжетів, їхнє відстеження кластеризація. Процес проектування та створення ІС формування контенту за допомогою Інтернет-маркетингу є інтерактивним і протікає від аналізу, проектування, розроблення плану до створення прототипу і експериментальних випробувань, починаючи з формування специфікацій, верстки, створення шаблону контенту, формування контенту та його подальше розміщення згідно структури сайту (рис. 1).

Завдяки моніторингу продуктивності та успіху користувачів визначають одну із вимог – доступ до даних про конференції або цільову аудиторію. За зворотного реакцією користувачів формують інформаційну архітектуру сайту. Основні класи користувачів сайту визначають дизайн сайту і процес ухвалення рішень. Визначивши важливу інформацію та її зв'язок із основними класами ко-

ристувачів, створюють архітектуру контенту сайту, його ієрархію, способи подання і взаємодії кожного класу користувачів з контентом. На рис. 2 подана типова схема взаємодії модулів, а на рис. 3 – схема модуля управління контентом.

Модуль формування контенту реалізується у вигляді комплексів контент-моніторингу зі збирання контенту з джерел за наперед визначеними методами (рис. 4), і забезпечують створення баз даних відповідно до потреб споживачів. Основні етапи формування контенту: збирання/створення контенту, систематизація контенту та поширення контенту. Аналіз та управління контентом сайту, їхнє моделювання є одним з найбільш інформативних методів кількісного вивчення динаміки окремих тематичних напрямів та проведення технічного аналізу сайту. За зміною величин управління контентом визначають швидкість розвитку окремих тематичних напрямів або всього контентного простору.

При генерації сторінок модуль подання генерує сторінку із змістом при запиті на нього на основі інформації з бази даних (рис. 5a). У режимі діалогового доступу до бази даних забезпечується перегляд, пошук і відображення контенту, надається можливість звертання до оригіналів контенту в Інтернет (рис. 5b). Інформація в базі даних змінюється за допомогою модуля редагування (рис. 5c). Сторінки наново створюються сервером при кожному запиті, збільшує навантаження на ресурси системи (рис. 5d). Навантаження знижується при використанні засобів кешування в сучасних Web-серверах. Задача повнотекстового пошуку у великих масивах контенту є неефективною. Проблему точності вирішує пошук в анотованому контенті. Замість пошуку у повному контенті доцільно вести пошук за анотаціями – пошукових образах контенту.

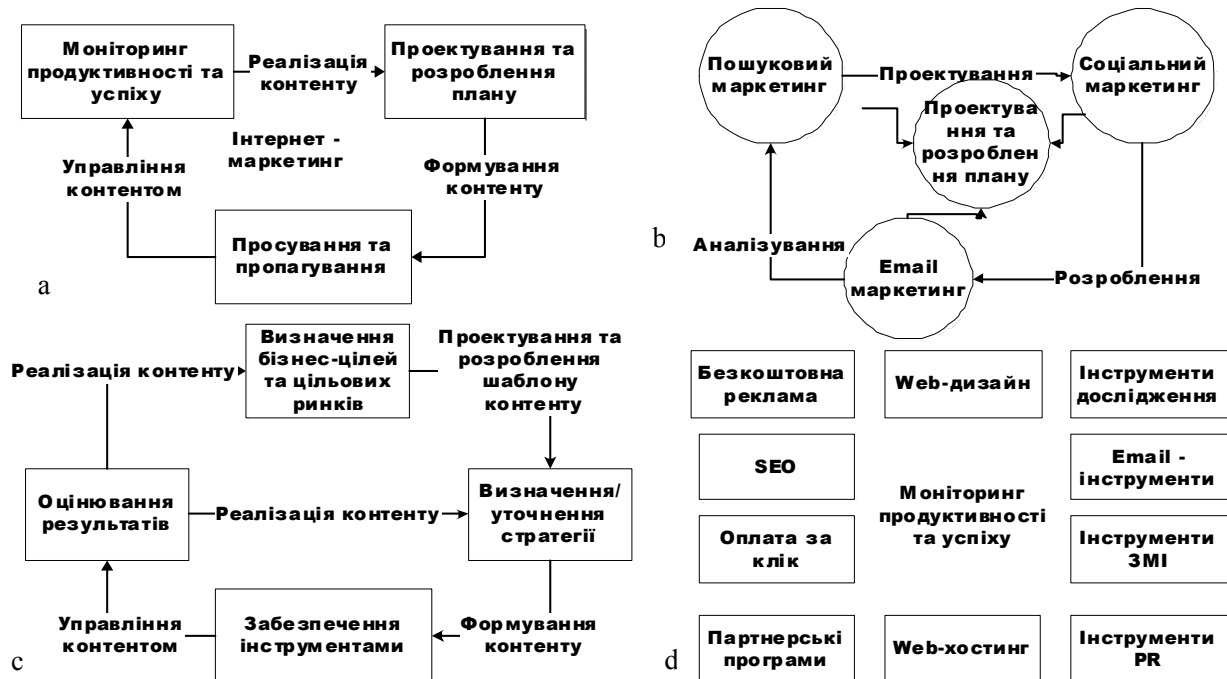


Рисунок 1 – Схема: а – Інтернет-маркетингу, б – проектування плану, с – реалізація контенту, д – моніторингу продуктивності та успіху



Рисунок 2 – Схема взаємодії модулів



Рисунок 3 – Загальна схема модуля управління контентом



Рисунок 4 – Етап збирання та створення контенту

Модуль реалізації контенту – це комплексні процеси аналізу контенту. Актуальність розроблення загальної архітектури модуля реалізації контенту полягає у необхідності отримувати оперативні і об'єктивні оцінювання рівня конкуренції на сегменті фінансового ринку контенту; оцінювати рівень конкурентів та міри їх конкурентоспроможності на ринку. Отримані дані враховуються при створенні або оновленні Web-порталу. Модуль реалізації контенту

виконує процес підвищення рейтингу ІС формування контенту із інтерактивним інтерфейсом та вирішує наступні задачі: збирання маркетингової інформації з поширення контенту; підтримка діалогу з кінцевим споживачем контенту; формування каталогу контенту; інформаційна підтримка кінцевого споживача контенту; реєстрація кінцевого споживача контенту (рис. 6). Модуль реалізації контенту поданий на рис. 7–8 та в табл. 1–3.

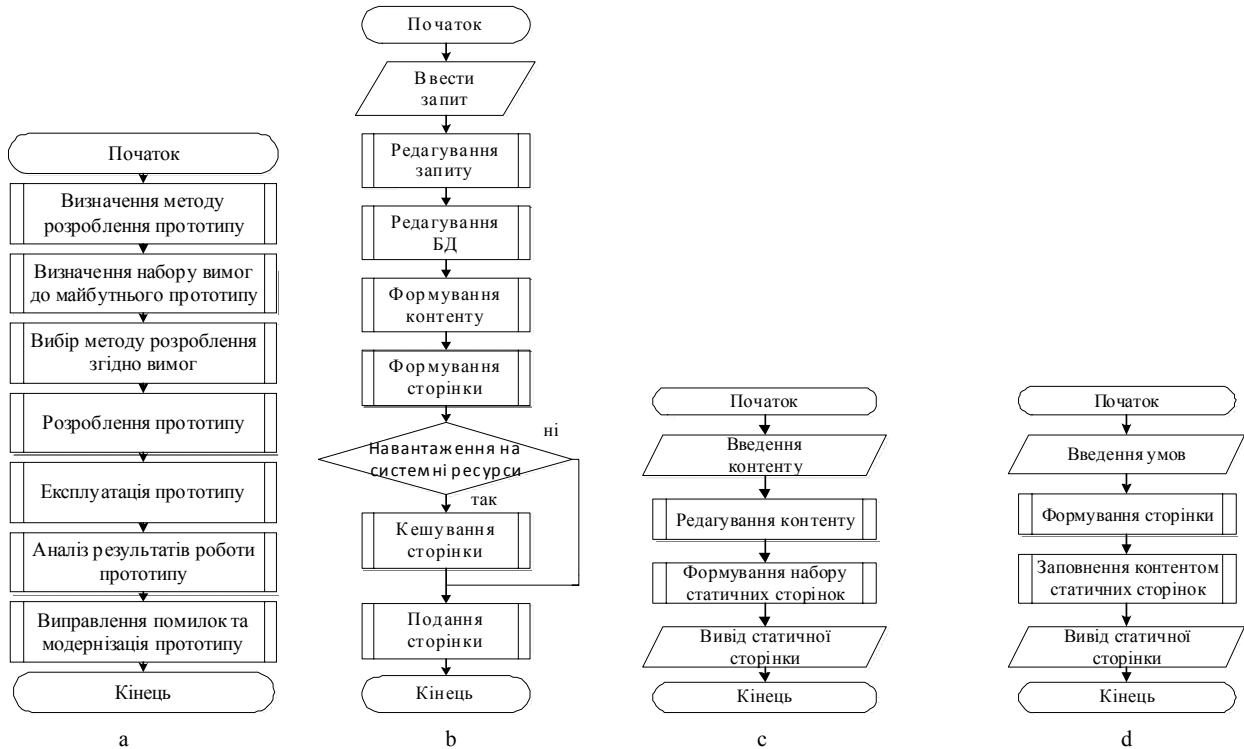


Рисунок 5 – Процес: а – створення прототипу, б – генерації сторінок за запитом, с – генерації та d – заповнення сторінок при редагуванні

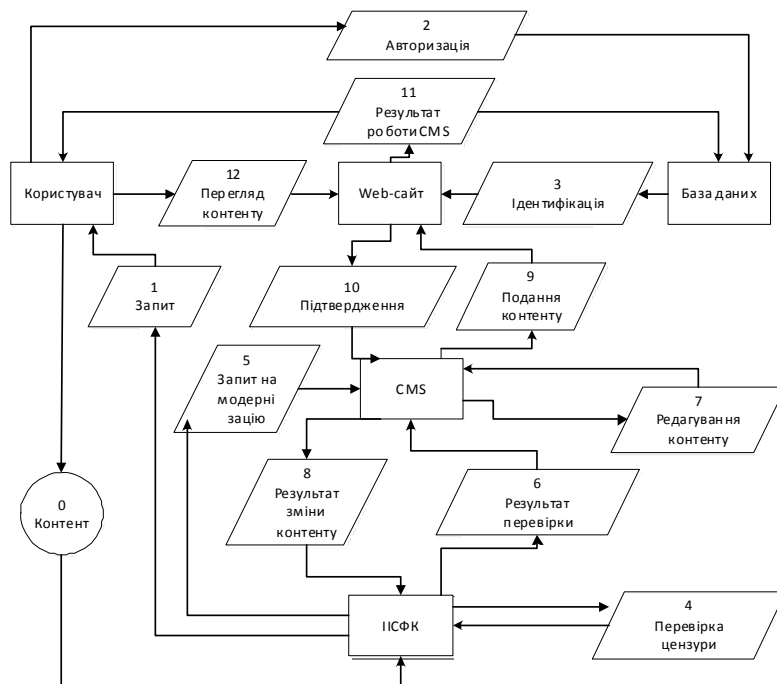


Рисунок 6 – Схема модерзації контенту

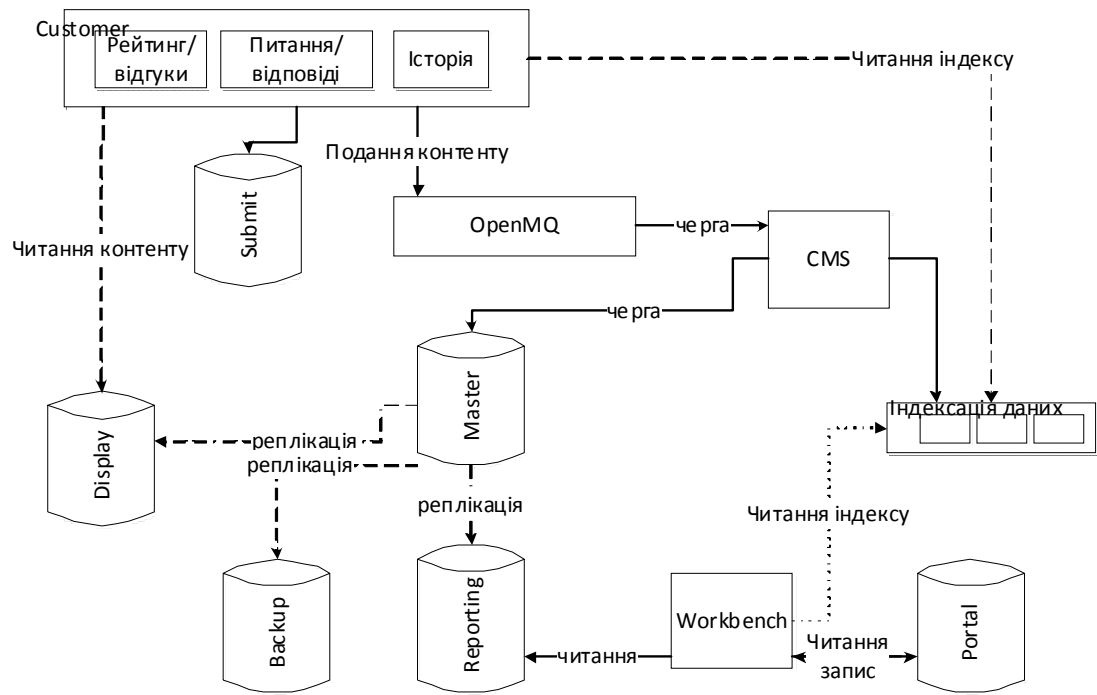


Рисунок 7 – Схема потоків даних в модулі реалізації контенту

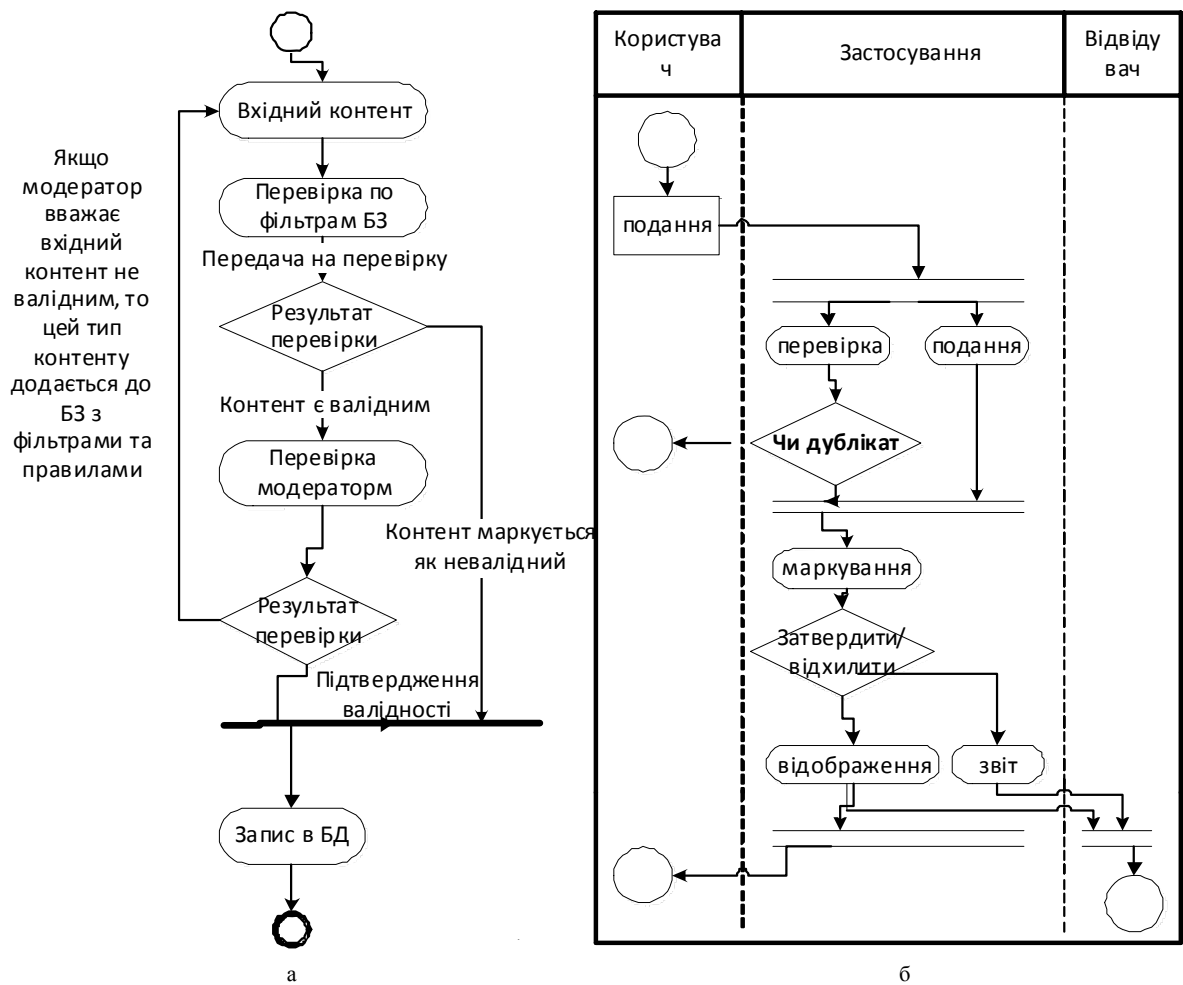


Рисунок 8 – Узагальнення контенту: а – алгоритм та б – процес

Таблиця 1 – Основні компоненти модуля реалізації контенту

Назва	Характеристика
Customer	Потенційний/існуючий клієнт із власним сайтом, де вмонтовується аплікація CMS з метою підняття рейтингу контенту та кращого розуміння потреб кінцевого користувача через аналіз контенту типу питання/відповіді, рейтинги, відгуки, статті тощо.
OpenMQ CMS	Черга типу FIFO. Модуль аплікації фільтрування контенту за наперед визначеними правилами індивідуально для кожного клієнта.
Workbench	Індивідуальний кабінет клієнта з можливістю перегляду контенту та аналізу статистики.
Solar	Модуль індексування для швидкого пошуку контенту.

Таблиця 2 – Бази даних модуля реалізації контенту

Назва	Характеристика
Master	Головна БД, яка є основною ланкою системи і для розподілу навантаження реплікує дані на дочірні бази.
Display	Дочірня БД від Master, з якою працює сайт клієнта на зчитування дозволеного на публікацію контенту.
Submit	Попереджує дублювання інформації на першому етапі.
Reporting	На основі цієї БД формуються статистичні звіти для клієнтів
Backup	Додаткове СД.
Portal	БД призначена для роботи з аплікацією Workbench.

Таблиця 3 – Правила модерації контенту із самонавчанням

Фільтр	Характеристика	Режим роботи
Нецензурної лексики	Перевірка за словником та заборона при TRUE	Напівавтоматичний, при FALSE перевіряє модератор, словник періодично поповнюється модератором.
За кількістю символів	Порівняння кількості символів із лімітом та заборона при FALSE	Автоматичний, ліміт визначає адміністратор або власник сайту.
За URL-посиланнями	Визначення наявності URL, перевірка за списком та заборона при TRUE	Напівавтоматичний, у разі FALSE остаточно перевіряє модератор, список періодично поповнюється модератором.
За «blacklist» списком	Перевірка за списком та заборона при TRUE	Напівавтоматичний, у разі FALSE остаточно перевіряє модератор, список періодично поповнюється автоматично у разі перевищення ліміту.
За посиланням на конкурентів	Перевірка за списком та заборона при TRUE	Напівавтоматичний, у разі FALSE остаточно перевіряє модератор, список періодично поповнюється модератором.
За IP адресами	Перевірка за списком та заборона у разі TRUE	Автоматичний, список періодично поповнюється автоматично при перевищенні ліміту, ліміт визначає адміністратор/власник сайту.
За ID користувачів	Перевірка за списком та заборона у разі TRUE	Автоматичний, список періодично поповнюється автоматично при перевищенні ліміту, ліміт визначає адміністратор/власник сайту.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для повного функціонування інтелектуальної ІС формування контенту інтернет-газет характерна складна система взаємозв'язаних операцій (рис. 9–10), методів, прийомів, які формують технологічний процес формування контенту, який складається із п'яти фаз: ознайомлення з ІС; пошук контенту; отримання інформації про послугу/товар; вибір категорії; доставка контенту е-поштою або в режимі on-line.

Система поширення контенту поділяється на дві підсистеми: з вільним доступом; адміністративна підсистема. Для користувачів існує частина з вільним доступом. В ній реалізовані такі сервіси як вибір контенту за визначений період часу з початку контентного наповнення за допомогою календаря. Зручний рубрикатор дозволяє вибирати контент за певною категорією. За допомогою пошуку здійснюють пошук в бази даних за ключовими словами. Можна в зручному вигляді переглянути анонси на події, які мають відбутись. Адміністрування системи здійснюється в адміністративному модулі інтелектуальної ІС формування контенту інтернет-газет, доступ до якого обмежений і реалізований за допомогою логіна і пароля. Тут вносяться коригування в структуру, додається, редагується або видаляється контент, встановлюється

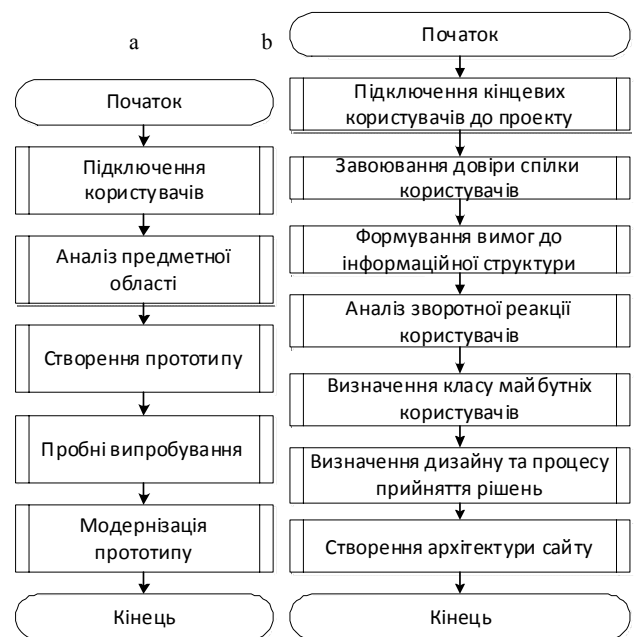


Рисунок 9 – Процес: а – проектування СЕKK; б – підключення користувачів



Рисунок 10 – Процес: а – організації контенту; б – адміністрування сайту; с – створення; д – аналізу архітектури сайту

контент дня. Змінюється зміст статичних сторінок, відбувається розсилка листів з контентом. Реалізується зручна система для додавання нових клієнтів з вибором на певні категорії та встановлення часових має дії доступу, який блокується автоматично після закінчення періоду дії [3]. Структура бази даних з описом полів подана в табл. 4 та наведена на рис. 11.

Структурна схема Інтернет-газети розподілена на три частини: mods, libraries та templates. Опис призначення

скриптів з даних груп подано в табл. 5. Група скриптів libraries (бібліотеки) – це класи призначені для роботи з певними об'єктами. Вони поділяються на три категорії: створені автором, створені іншими розробниками та скрипти на мові JavaScript. Звернення до цих скриптів відбувається з групи скриптів mods.

6 ОГОВОРЕННЯ

В табл. 6 наведені приклади найпопулярніших інтернет-газет. Кожна з яких відрізняється технологіями та підходом побудови ІС. Вони наповнюються контентом через модератора, що збільшує витрати та час на формування нового контенту. В них відсутня ідентифікація постійного користувача, що дозволило б виконувати підбір контенту за вподобанням користувача. Кожен з вище зазначених сайтів не є вузько спеціалізованим, що зменшує можливість пошуку потрібної інформації. На сайтах № 1–4, 7–9 реалізовано систему пошуку інформації по сайту, що значно зменшує витрати часу, на сайтах № 5–6 така система відсутня, що зменшує зручність його використання. На сайтах № 2, 8 реалізовано адаптивну верстку, що є дуже важливим підходом побудови таких сайтів. Сайти № 1–9 наповнюються контентом за допомогою модератора, тобто інформація відображається не вчасно, а значить може бути не актуальною на період перегляду. Автоматичне наповнення контентом сайту значно покращить його інформаційну наповненість. Сайти № 1–6 перенасичені рекламою, що не стосується музичної теми.

ВИСНОВКИ

Розроблена формальна модель ІС формування контенту, що дало змогу розробити життєвий цикл контенту, узагальнену типову архітектуру системи та уніфіковані методи ОІР. Вдосконалено загальну архітектуру ІС формування контенту, відмінну від існуючих наявністю модулів ОІР. Розроблено комплексний метод формування контенту, оперативний метод управління контентом та комплексний метод реалізації контенту для досягнення ефекту від роботи на рівні розробника системи. Розроблено загальні рекомендації з проектування архітектури системи, відмінні від існуючих більшою деталізацією етапів та наявністю модулів ОІР, що дають змогу ефек-

Таблиця 4 – Структура бази даних

Назва	Призначення
clients	зберігаються відомості про клієнта;
deliver	містить коди останніх відправлених новин та номера розсилок;
news	в цій таблиці розташовані всі новини;
option	розміщені опції;
pages	інформація зі статичних сторінок;
statistics	зберігається статична інформація про відвідуваність;
tree	містить структуру у вигляді ієрархічного дерева;
users	інформація про користувачів адміністративної частини;

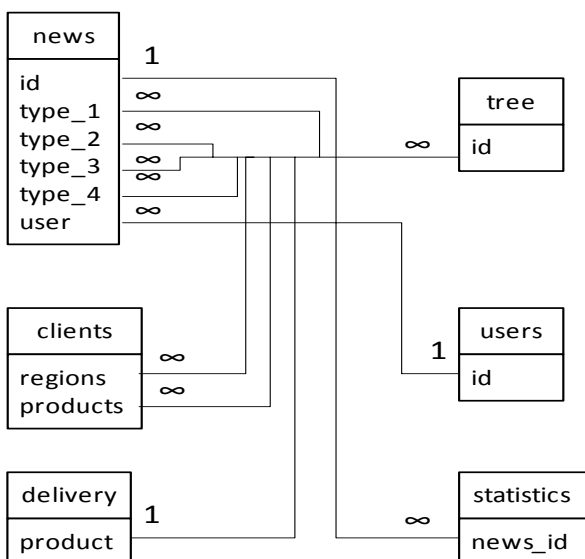


Рисунок 11 – Структура бази даних

Таблиця 5 – Опис призначення з групи

скриптів	Назва	Призначення
mods	mod_index	взаємодія користувача з загальнодоступною інформацією;
	mod_admin	адміністрування;
	mod_admin_news_edit	забезпечує маніпуляції з контентом;
	mod_admin_news_search	забезпечує пошук контенту в архіві за критерієм відбору;
	mod_admin_news_day	дозволяє вибрати контент за період часу;
	mod_admin_delivery	забезпечує розсилку контенту;
	mod_admin_users	забезпечує маніпуляції з даними про адміністрування;
	mod_admin_pages	забезпечує редагування статичних даних;
	mod_admin_test	в цьому модулі відбувається відлагодження нових скриптів.
libraries	class_lib	набір різноманітних допоміжних функцій;
	class_news	клас для маніпуляції над об'єктом «контент»;
	class_clients	клас для маніпуляції над об'єктом «клієнт»;
	class_users	клас для маніпуляції над об'єктом «адміністратор»;
	class_pages	клас для маніпуляції над об'єктом «статичні сторінки»;
	class_tree	клас для маніпуляції над об'єктом «дерево»;
	class_mail	клас для маніпуляції над об'єктом «пошта»;
	class_message	клас для маніпуляції над об'єктом «повідомлення»;
	class_mysql	клас для маніпуляції над об'єктом «БД»;
	class_debug	клас для маніпуляції над об'єктом «відлагодження»;
	class_error	клас для маніпуляції над об'єктом «помилки»;
	jsalendar	календар.
templates	mod_index	шаблон для роботи з загальною частиною;
	mod_admin	шаблон для роботи з адміністративною частиною;
	html	різноманітні шаблони спільні складові.

Таблиця 6 – Інтернет газети музичних новин

№	Назва	Посилання
1.	Mojo	http://www.mojo4music.com
2.	QMAGAZINE	http://www.qthemusic.com
3.	Pitchfork	http://pitchfork.com
4.	SPIN	http://www.spin.com
5.	FACT	http://www.factmag.com
6.	Navsi100.com	http://beta.navsi100.com
7.	POK-OKO	http://www.rock-oko.com
8.	MUZNEWS	http://muzsweet.com
9.	13NOT	http://13notes.info

тивно просто реалізувати ОІР на рівні розробника системи. Розроблено архітектури модулів системи для реалізації життєвого циклу контенту. Розроблено та впроваджено прикладне програмне забезпечення формування, управління та реалізації контенту для досягнення ефекту від роботи на рівні власника та користувача інтелектуальної інформаційної систем формування контенту.

ПОДЯКИ

У статті розв'язана науково-практична формування та аналізу текстового контенту Інтернет-шазети музичних нових для збільшення цільової аудиторії. 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 прискорення процесів формування сучасного інформаційного суспільства», а також Військово-дипломатичної академії імені Євгена Березняка. Наукові дослідження провадилися 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. Джерк Н. Разработка приложений для электронной коммерции / Н. Джерк, Санкт-Петербург : Питер. – 2001 р.
2. Пелешишин А.М. Методи побудови Ефективних Web-систем / А. М. Пелешишин // Інформаційні системи та мережі. Вісник НУЛП. – 2012. – № 464. – С. 240–254.
3. Берко А. Системи електронної контент-комерції : монографія / А. Берко, В. Висоцька, В. Пасічник. – Львів : Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2009. – 612 с.
4. Methods based on ontologies for information resources processing / [V. Lytvyn, V. Vysotska, L. Chyrun, D. Dosyn] // LAP Lambert Academic Publishing, Germany. – 324 p.
5. Висоцька В. А. Методи і засоби опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної контент-комерції : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня к.т.н. : 05.13.06 / В. А. Висоцька; НУ «Львівська політехніка». – Львів, 2014. – 27 с.
6. Ландэ Д. Основы моделирования и оценки электронных информационных потоков / Д. Ландэ, В. Фурашев, С. Брайчевский, О. Григорьев. – К. : Инжиниринг, 2006. – 348 с.
7. Ландэ Д. В. Некоторые методы анализа новостных информационных потоков / Д.В. Ландэ // ИКВТ-2005. – Вып. 93. – Донецк : ДонНТУ, 2005. – С. 277–287.
8. Ландэ Д. В. Сканер системы контент-мониторинга / Д. В. Ландэ // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – Харьков : НАКУ «ХАИ», 2005. – Вып. 28. – С. 53–58.
9. Большакова Е. И. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и компьютерная лингвистика : учеб. пособие / [Е. И. Большакова, Э. С. Клышинский, Д. В. Ландэ и др.] – М. : МИЭМ, 2011. – 272 с.
10. Григорьев А. Н. Адаптивный интерфейс уточнения запросов к системе контент-мониторинга / А. Н. Григорьев, Д. В. Ландэ // XI международная научно-практическая конференция. – К. : УкрИНТЭИ, 2005. – С. 17–20.
11. Иванов В. Ф. Контент-анализ / В. Ф. Иванов. – К., 1994. – 112 с.
12. Математична лінгвістика / [В. Висоцька, В. Пасічник, Ю. Щербина, Т. Шестакевич]. – Львів : Новий Світ-2000, 2012. – 359 с.
13. McGovern G. Content Criticsl / G. McGovern, R. Norton. – NJ : FT Press, 2001. – 256 p.

14. McKeever S. Understanding Web content management systems: evolution, life cycle and market. / S. McKeever // *Industrial Management & Data Systems*, 2003. – 103 (9) – P. 686–692.
 15. Rockley A. Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy. / A. Rockley. – Reading, Mass : New Riders Press, 2002. – 592 p.
 16. Висоцька В. А. Моделювання етапів життєвого циклу комерційного web-контенту / В. А. Висоцька, Л. Б. Чирун, Л. В. Чирун // *Вісник НУЛП*. – 2011. – № 715. – С. 69–87.
 17. Берко А. Ю. Алгоритми опрацювання інформаційних ресурсів в системах електронної комерції / А. Ю. Берко, В. А. Висоцька, Л. В. Чирун // *Комп'ютерні науки та інформаційні технології*. *Вісник НУЛП*. – 2008. – № 616. – С. 128–136.
 18. Бісікало О. В. Застосування методу синтаксичного аналізу речень для визначення ключових слів україномовного тексту / О. В. Бісікало, В. А. Висоцька // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 3(38). – С. 54–65.
 19. Бісікало О. В. Виявлення ключових слів на основі методу контент-моніторингу україномовних текстів / О. В. Бісікало, В. А. Висоцька // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 1(36). – С. 74–83.
 20. Литвин В. Застосування системи алгоритмічних алгебр для граматичного аналізу символічних обчислень виразів логіки висловлювань / В. Литвин, І. Бобик, В. Висоцька // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2016. – № 39. – С. 54–67.
 21. Висоцька В. А. Особливості проектування та впровадження систем електронної комерції / В. А. Висоцька // *Вісник НУЛП*. – 2008. – № 626. – С. 116–125.
 22. Berko A. Features of information resources processing in electronic content commerce / Andriy Berko, Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun // *Applied Computer Science. ACS journal*. – Poland, 2014. – Volume 10, Number 2. – P. 5–19.
 23. Vysotska Victoria. Web Content Processing Method for Electronic Business Systems / Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun // *International Journal of Computers & Technology*. – December 2013. – Vol 12, No. 2. – P. 3211–3220.
- Стаття надійшла до редакції 05.04.2017.
Після доробки 15.05.2017.

Коробчинский М. В.¹, Чирун Л. Б.², Высоцкая В. А.³, Кондратьев Е. 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 ФОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА КОНТЕНТА ИНТЕРНЕТ-ГАЗЕТЫ МУЗЫКАЛЬНЫХ НОВОСТЕЙ

Актуальность. Негативные факторы в формировании контента усложняют процесс поиска необходимых данных при сканировании различных источников информации. Увеличение физического объема и изменение актуальности / динамики контентных потоков (систематическое и нерегулярное обновление) приводит к возникновению дублирования, информационного шума и избыточности результатов поиска контента. Охват и обобщение больших динамических потоков контента, непрерывно генерируют в Интернет-источниках, требует качественно новых методов / подходов поиска как контент-мониторинг.

Цель. Целью выполнения работы является разработка метода формирования и анализ контента Интернет-газеты музыкальных новостей для активного привлечения постоянных пользователей информационного ресурса новостей и увеличение целевой аудитории. Задачей является разработка системы для распространения музыкальных новостей с использованием метода контент-мониторинга для формирования и анализ текстового контента информационного ресурса Интернет-газеты.

Метод. Входной информацией для контент-мониторинга является текст на естественном языке как последовательность символов, исходная информация – это таблицы разделов, предложений и лексем анализируемого текста. Контент-мониторинг является программным средством автоматизации нахождения важных составляющих в потоках контента. Это содержательный анализ потоков контента с целью постоянного получения необходимых качественных / количественных срезов на протяжении не определенного заранее периода времени. Составной контент-мониторинга является контентный поиск и контент-анализ текста. Контент-анализ предназначен для поиска контента в массиве данных по смысловыми лингвистическими единицами. Единица счета является количественной мерой единицы анализа, позволяющая регистрировать частоту (регулярность) появления признака категории анализа в тексте (количество определенных слов или их сочетаний, строк, печатных знаков, страниц, абзацев, авторских листов, площадь текста и т. д.).

Результаты. Решено актуальную задачу исследования и разработки методов и средств обработки информационных ресурсов интеллектуальной информационной системы формирования контента по использованию разработанной классификации, математического и программного обеспечения обобщенной архитектуры системы. Обоснована необходимость разработки методов и средств обработки информационных ресурсов в информационных системах формирования контента путем усовершенствования архитектуры системы с целью автоматизации процессов формирования, управления и реализации контента.

Выводы. Использование контент-анализа в мониторинге источников данных в Интернет автоматизирует процесс поиска наиболее важных компонент в потоке содержания, в выборе данных из этих источников. Это устраняет дубликаты контента, информационный шум, паразитные результаты бронирования контента и другое. Этот метод используется на следующих этапах анализа содержания для более точных результатов создания уникального контента, который пользуется спросом.

Ключевые слова: анализ, контент-анализ содержания информационных ресурсов, контент-анализ, рейтинговая оценка, система управления контентом.

Korobchynskiy M. V.¹, Chyrun L. B.², Vysotska V. A.³, Kondratiev E. O.⁴

¹F.d., Senior Research Fellow of Military-Diplomatic Academy named 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

OF CONTENT FORMATION AND ANALYSIS FEATURES IN ONLINE NEWSPAPER OF MUSIC NEWS

Context. Negative factors in shaping the content complicate necessary data finding process when scanning various sources. Increased volume and variable Relevance / content flow dynamics (regular and non regular updates) leads to duplication and excessive information noise content in search results. Coverage and synthesis of large dynamic flow of content are continuously generating Internet media requires

qualitatively new methods / approaches of search as a content monitoring.

Objective. The work purpose is to develop content forming and analyzing method in online newspaper for the active involvement of regular users of news and information resource increase audytoryi target. The objective is to develop a system to distribute music news using content monitoring method for creation and content analyzing in information resource of online newspaper.

Method. Input information for content-monitoring is a natural language into a sequence of symbols, background information – a partition table, sentences and tokens analyzed text. Content monitoring is a software tool for automation of the important components in the flow of content. This is meaningful analysis of streams of content for the purpose of obtaining the necessary permanent qualitative / quantitative sections within pre-defined period of time not. Content monitoring component is content search and content analysis of the text. Content analysis designed to search for content in an array of data for linguistic semantic units. The unit of account is a quantitative measure of the unit of analysis that allows you to record the frequency (regularity) symbol appears in the text analysis category (number of certain words or combinations of lines, characters, pages, paragraphs, copyright sheets of text area, etc.).

Results. The problem of current research and development of methods and means of processing information resources information systems intellectual formation content with the use of the classification, mathematical and software and the generalized system architecture are solved. The necessity of methods and means development of information resources processing in intelligent information systems forming content by improving the system architecture to automate processes of formation, management and implementation of content.

Conclusions. The content analysis use in monitoring Internet data sources automates the finding process of the most important components in content flow in data selection from these sources. This eliminates duplicate content information noise, parasitic content redundancy results and more. This method is used in subsequent stages of content for more accurate relevant results – create a unique content that is in demand.

Keywords: analysis, content analysis content, information resource, content-analysis, rating evaluation, content management system.

REFERENCES

1. Dzherk N. Razrabotka prilozheniy dlya elektronnoy kommersii. Sankt-Peterburg, Piter, 2001 r.
2. Peleshchyshyn A. M. Metody pobudovy Efektyvnykh Web-system, *Informatsiyni systemy ta merezhi. LPNU Visnyk*, 2012, No. 464, pp. 240–254.
3. Berko A. Y., Vysotska V. A., Pasichnyk V. V. Systemy elektronnoy kontent-komertsii: monohrafiya. Lviv, LPNU Publishing, 2009, 612 p.
4. Lytvyn V., Vysotska V., Chyrun L., Dosyn D. Methods based on ontologies for information resources processing, *LAP Lambert Academic Publishing*, Germany, 324 p.
5. Vysotska V. A. Metody i zasoby opratsyuvannya informatsiynykh resursiv v systemakh elektronnoy kontent-komertsii : avtoreferat dysertatsiyi na здобuttya naukovoho stupenya k.t.n. : 05.13.06. NU «Lvivska politehnika». Lviv, 2014, 27 p.
6. Lande D., Furashev V., Braychevskiy S., Grigoriyev O. Osnovy modelirovaniya i otsenki yelektronnykh informatsionnykh potokov. Kiev, Inzhiniring, 2006, 348 p.
7. Lande D. V. Nekotoriye metody analiza novostnykh informatsionnykh potokov, IKVT-2005, Vol. 93. Donetsk, DonNTU, 2005, pp. 277–287.
8. Lande D. V. Skaner sistemy kontent-monitoringa, Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuterny integrirovannyye tekhnologii. Khar'kov, NAKU «KHA», 2005, Vyp. 28, pp. 53–58.
9. Bolshakova Y. I., Klyshinskiy E. S., Lande D. V., Noskov A. A., Peskova O. V., Yagunova Ye. V. Avtomaticheskaya obrabotka tekstov na yestestvennom yazyke i komp'yuternaya lingvistika: ucheb. Posobiye. Moscow, MIEM, 2011, 272 p.
10. Grigoryev A. N., Lande D. V. Adaptivnyy interfeys utochneniya zaprosov k sisteme kontent-monitoringa, *KHH mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya*. Kiev, UkrINTEI, 2005, pp. 17–20.
11. Ivanov V. F. Kontent-analiz. Kiev, 1994, 112 p.
12. Pasichnyk V., Shcherbyna Y., Vysotska V., Shestakevych T. Matematychna lnhvistyka. Lviv, Novyy svit-2000, 2012, 359 p.
13. McGovern G., Norton R. Content Criticsl. NJ, FT Press, 2001, 256 p.
14. McKeever S. Understanding Web content management systems: evolution, life cycle and market, *Industrial Managemant & Data Systems*, 2003, 103 (9), pp. 686–692.
15. Rockley A. Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy. Reading, Mass, New Riders Press, 2002, 592 p.
16. Vysotska V. Chyrun L., Chyrun L. Modelyuvannya etapiv zhyttyevoho tsyklu komertsijnoho web-kontentu, *LPNU Visnyk*, 2011, No. 715, pp. 69–87.
17. Berko A. Y., Vysotska V. A., Chyrun L. V. Alhorytmy opratsyuvannya informatsiynykh resursiv v systemakh elektronnoy komertsii, *Kompyuterni nauky ta informatsiyni tekhnolohiyi. LPNU Visnyk*, 2008, No. 616, pp. 128–136.
18. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Sentence syntactic analysis application to keywords identification Ukrainian texts, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3(38), pp. 54–65.
19. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Identifying keywords on the basis of content monitoring method in Ukrainian texts, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 1(36), pp. 74–83.
20. Lytvyn V. V., Bobyk I. O., Vysotska V. A. Application of algorithmic algebra system for grammatical analysis of symbolic computation expressions of propositional logic, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 4(39), pp. 54–67.
21. Vysotska V. A. Osoblyvosti proektuvannya ta vprovadzhennya system elektronnoy komertsii, *LPNU Visnyk*, 2008, No. 626, pp. 116–125.
22. Berko A., Vysotska Victoria, Chyrun Lyubomyr Features of information resources processing in electronic content commerce, *Applied Computer Science. ACS journal*, Poland, 2014, Volume 10, Number 2, pp. 5–19.
23. Vysotska Victoria, Chyrun Lyubomyr Web Content Processing Method for Electronic Business Systems, *International Journal of Computers & Technology*, December 2013, Poland, 2014, Volume 10, Number 2, pp. 5–19.

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант докторантури, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

²Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

³Канд. психол. наук, доцент, доцент кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

СТРУКТУРНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Актуальність. В охороні кордону використовується система оптико-електронного спостереження, яка представлена сукупністю веж, на яких встановлені радіолокаційні, тепловізійні та відео засоби спостереження. Ефективність виявлення порушників кордону з використанням даної системи суттєво залежить від її функціональної і структурної будови. Функціональна будова системи оптико-електронного спостереження визначається підбором технічних засобів спостереження з урахуванням їх функціональних можливостей. Структурна будова системи залежить від вибору місць розташування веж спостереження з урахуванням фізико-географічних умов місцевості та характеристик технічних засобів спостереження. Недосконалість науково-методичного апарату в галузі структурної оптимізації побудови системи оптико-електронного спостереження обумовила актуальність дослідження.

Мета. Метою роботи є розробка методу структурної оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження.

Метод. У роботі поставлена задача оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження та запропоновано метод її вирішення, який передбачає максимізацію показника ефективності функціонування системи. Особливістю даного методу є: використання геомоделі з метою зменшення кількості варіантів розміщення веж системи, застосування авторських підходів до вибору кроку дискретизації просторових даних і швидкодійного алгоритму обчислення показника ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження.

Результати. У роботі показані переваги запропонованого методу в порівнянні з раніше запропонованими підходами щодо вибору раціонального розміщення веж на основі кластерного аналізу. Запропоновано програмно-алгоритмічну реалізацію методу структурної оптимізації системи оптико-електронного спостереження. Наведений опис алгоритмічної і програмної реалізації цього методу. З використанням розробленого програмного забезпечення проведена оптимізація розміщення веж системи оптико-електронного спостереження, визначені рекомендації щодо її структурної будови.

Висновки. Використання запропонованого методу дозволяє провести структурну оптимізацію побудови системи оптико-електронного спостереження за рахунок розстановки веж спостереження з максимізацією показника ефективності функціонування цієї системи. Можливим напрямом удосконалення методу є уточнення результатів з використанням більшої роздільної здатності геомоделі.

Ключові слова: система оптико-електронного спостереження, метод оптимальної розстановки, вежа системи, показник ефективності системи, алгоритм.

НОМЕНКЛАТУРА

ДПСУ – Державна прикордонна служба України;

РЛС – радіолокаційна станція;

СОЕС – система оптико-електронного спостереження;

СІТК – система інженерно-технічного контролю;

ТЗС – технічні засоби спостереження;

C_n^k – число сполук без повторень;

$S_m = \{(x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{nsm-1}, y_{nsm-1})\}$ – множина точок смуги перекриття;

nsm – потужність множини точок смуги перекриття;

$P_i(x, y)$ – ймовірність виявлення цілі i -тою вежею;

T_i – множина «мертвих зон» спостереження для i -тої вежі;

$P_1(x, y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою РЛС;

$P_2(x, y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою тепловізійної камери;

$P_3(x, y)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою телевізійної камери;

SRTM – Shuttle radar topographic mission;

R_{ef} – гранична ефективна дальність виявлення цілей;

S_r – множина точок S_m розширена на відстань R_{ef} ;

S_p – множина на якій здійснюється пошук оптимального рішення;

m – потужність множини S_p ;

N – кількість веж спостереження;

W – загальна ефективність спостереження СОЕС;

$R = \{r_{ij}\}$ – множина відстаней між усіма можливими розташуваннями веж;

xv – масив, що містить поточний варіант розстановки веж СОЕС;

r – номер поточної вежі, для якої здійснюється підбір місця розташування;

b – буферна логічна змінна в алгоритмі оптимізації.

ВСТУП

Розвиток України, як суверенної держави, є неможливим без надійної охорони її кордонів. У сучасних умовах ефективна охорона кордонів неможлива без належного інженерного забезпечення, зокрема без системи інженерно-технічного контролю. Побудова СІТК прикордонного відомства передбачає комплексне використання новітніх технічних засобів спостереження (тепловізійного обладнання, сучасних радіолокаційних станцій, відеокamer) і сучасного телекомунікаційного обладнання. Одним з яскравих прикладів такого комплексного використання нових зразків техніки при побудові СІТК є СОЕС. Дана система включає вежі спостереження, на яких встановлені технічні засоби спостереження. Однак

ефективне функціонування даної системи з точки зору виконання основної функції виявлення порушників кордону залежить від досконалості її структурної та функціональної побудови.

У роботі [1] показано, що потенційні можливості СОЕС не реалізовані повною мірою. Основною причиною цього є нераціональне розміщення веж спостереження. Кращі значення показника ефективності прикриття необхідної смуги перекриття державного кордону можна отримати за рахунок оптимізації структурної побудови СОЕС, яка полягає в оптимальній розстановці веж спостереження.

Метою роботи є розробка методу структурної оптимізації СОЕС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для структурної оптимізації існуючої та перспективних СОЕС в охороні кордону необхідно визначити таке розташування веж системи, при якому досягається максимальне значення показника ефективності її функціонування. Однак з урахуванням розмірів ділянки місцевості, на якій проводиться така оптимізація, та роздільної здатності вихідних даних, загальна потужність множини варіантів можливих розташувань веж має шостий порядок. І хоча загальна кількість веж системи може бути порівняно невеликою (2–10), кількість варіантів їх розташувань навіть для двох веж описуватиметься дванадцятизначною величиною. У випадку більшої кількості веж задача значно ускладнюється. Отже, оскільки вежі є однотипними, достатньо розглянути варіанти сполук без

повторень $C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$. Проте для вирішення оптимізаційного завдання з використанням доступних засобів обчислювальної техніки ця величина є також надмірною.

Все це вимагає визначення підходів до суттєвого скорочення кількості ітерацій та вирішення завдання раціональної розстановки веж СОЕС.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Дослідженню раціонального встановлення веж спостереження з урахуванням різноманітних факторів приділяли увагу багато науковців. Більшість з них розглядають цю задачу як задачу покриття. У працях [1–4] розглядались питання раціонального встановлення елементів систем відео-моніторингу. Так, у роботі [1] досліджувалась оптимальність покриття місцевості кругами з різними радіусами. Інший підхід до раціональної розстановки засобів спостереження передбачає проведення покриття кругами однакових радіусів з встановленням їх центрів у вершинах рівносторонніх трикутників [2]. Однак у цих працях розглядались випадки для нескладної форми потрібного району спостереження. Раціональна побудова системи спостереження за лісовим масивом з забороненими областями, який має форму невипуклого багатокутника, розглянута в [3–4]. Однак у цих дослідженнях застосовується евристичний підхід. Необхідний район місцевості покривається рівносторонніми трикутниками або квадратами з подальшим встановленням ТЗС у центри відповідних фігур. У подальшому проводиться

коригування їх розміщення для врахування ділянок, в межах яких спостереження не потрібне. Проте в цих дослідженнях не враховуються специфічні фактори, важливі для СОЕС в сфері охорони державних кордонів.

Ряд інших досліджень дотичних до завдань оптимальної розстановки веж присвячено питанням побудови систем зв'язку. Так, питання радіовидимості в умовах складного техногенного рельєфу в населених пунктах розглядалось у [5]. Дослідження [6] присвячене задачі оптимального розміщення телевізійних веж з урахуванням різних критеріїв оптимальності такого розміщення. Оскільки обчислювальна складність повного перебору для вирішення таких оптимізаційних завдань є надто великою, то в [6] були використані методи циклічного по координатного спуску та динамічного програмування. Однак такі методи в окремих випадках визначають локальний екстремум. Тому оптимальний розв'язок може бути не знайдений. У цьому дослідженні не висвітлено питання врахування рельєфу місцевості, хоча значна увага приділена забезпеченню електромагнітної сумісності. Для СОЕС останній аспект не є актуальним.

Прикордонні аспекти ведення спостереження розглянуті у ряді робіт, зокрема в [7–11]. Дослідження ефективності ведення спостереження прикордонниками з урахуванням рельєфу місцевості та можлива тактика дій контрабандистів проводились в [7–9]. Однак у цих працях основна увага приділена питанням ефективного стиснення інформації про рельєф місцевості. Окрім цього, в цих дослідженнях не враховується комплексне використання різних технічних засобів спостереження. Деякі аспекти застосування таких засобів досліджені в працях [10–11]. У них визначені підходи до оцінки ефективності спостереження з використанням окремих ТЗС. Проте в складі СОЕС комплексно використовуються різні за можливостями ТЗС. Це робить важливою оцінку ефективності їх комплексного функціонування з урахуванням рельєфу місцевості. Така оцінка проведена авторами в [12–13]. Також визначено показник ефективності функціонування СОЕС з точки зору ведення спостереження комплексом веж, що входять до її складу. На основі аналізу результатуючої ефективності для різних варіантів побудови СОЕС авторами визначені можливі підходи до її раціональної структурної побудови на основі кластерного аналізу. Однак ці підходи є евристичними і не забезпечують оптимальної розстановки веж. Все це обумовлює актуальність дослідження методу оптимізації структурної побудови СОЕС.

Враховуючи це, метою даної роботи є формування методу оптимального розміщення веж системи оптико-електронного з максимізацією показника ефективності функціонування даної системи.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

У [12] процес виявлення цілей СОЕС розглянуто як випадковий. Такий підхід дозволив авторам визначити показник ефективності виявлення порушників кордону в межах необхідної смуги перекриття. Приклад цієї смуги для Білгород-Дністровської ділянки кордону наведено на рис.1.

Як випливає з рис. 1, форма смуги перекриття є достатньо складною. У зв'язку з цим, при аналізі її зручно представити не складними геометричними фігурами, а множиною точок S_m , що задаються координатами. Оскільки для вирішення задач з охорони кордону інтерес представляє спостереження в межах цієї смуги, запропонований авторами показник ефективності враховує ймовірності виявлення на множині S_m . Однак попередній алгоритм [13] розрахунку показника ефективності передбачав перебір всіх точок ділянки місцевості (в межах контуру рис. 1) з перевіркою їх належності до S_m і подальшим обчисленням ефективності у випадку позитивного результату такої перевірки. З метою вдосконалення алгоритму пропонується визначення множини S_m і проведення розрахунку показника ефективності лише по її елементах.

При оцінці ефективності функціонування СОЕС у [13] враховується перешкоджаючий вплив для спостереження рельєфу місцевості. Для цього формується множина «мертвих зон», тобто визначаються ділянки місцевості, які невидимі для спостереження [13]. Слід відмітити, що в окремих випадках такий підхід є не цілком коректним. За певних умов окремі ділянки місцевості можуть бути невидимими з веж спостереження в околі їх ефективного виявлення і видимими з веж на значному віддаленні. Дана ділянка місцевості в єдиній множині «мертвих зон» помічається як видима. Це призводить до помилкового вра-

хування ефективного спостереження на цій ділянці і незначної помилки завищення при обчисленні показника ефективності (рис. 2).

У зв'язку з цим, рельєф місцевості ще більшою мірою впливає на зменшення ефективності функціонування СОЕС і потребує врахування при оптимізації розміщення веж спостереження. З цією метою пропонується не використовувати окрему єдину для всієї системи множини «мертвих зон», а враховувати видимість кожної ділянки при обчисленні ефективності ведення спостереження з кожної вежі. Таким чином, з урахуванням вищевикладеного і [13], ефективність спостереження з i -ї вежі можна представити у вигляді:

$$P_i(x, y) = \begin{cases} 1 - \bar{P}_{1i}(x, y) \cdot \bar{P}_{2i}(x, y) \cdot \bar{P}_{3i}(x, y), & (x, y) \notin T_i \\ 0, & (x, y) \in T_i \end{cases} \quad (1)$$

В (1) індексу i вежі спостереження відповідають координати її розміщення. На основі цих координат та координат для всіх точок $(x, y) \in S_m$, можна визначити відстань до вежі i з використанням викладок, що наведені в [12], обчислити ймовірності виявлення цілі різними засобами спостереження. Однак, для обчислення (1) потрібно для i -ї вежі знайти множину «мертвих зон». З метою спрощення обчислювальної складності множину T_i можна шукати, як $T_i \in S_m$, оскільки результуюча ефективність розраховується для $(x, y) \in S_m$. Для її знаходження доцільно використати відповідний швидкий алгоритм [14]. Проте навіть при використанні такого алгоритму і врахуванні обмеження $T_i \in S_m$, обчислювальна складність завдання з використанням оригінальної роздільної здатності по висотах з проекту SRTM може бути надзвичайно високою. У зв'язку з цим, пропонується зменшити роздільну здатність даних про рельєф на основі застосування методу просторово-частотного аналізу місцевості і обґрунтування достатнього кроку дискретизації [15].

Таким чином, визначення оптимального розміщення веж спостереження СОЕС пропонується вирішувати як дискретну оптимізаційну задачу.



Рисунок 1 – Приклад см

помилково видимі ділянки

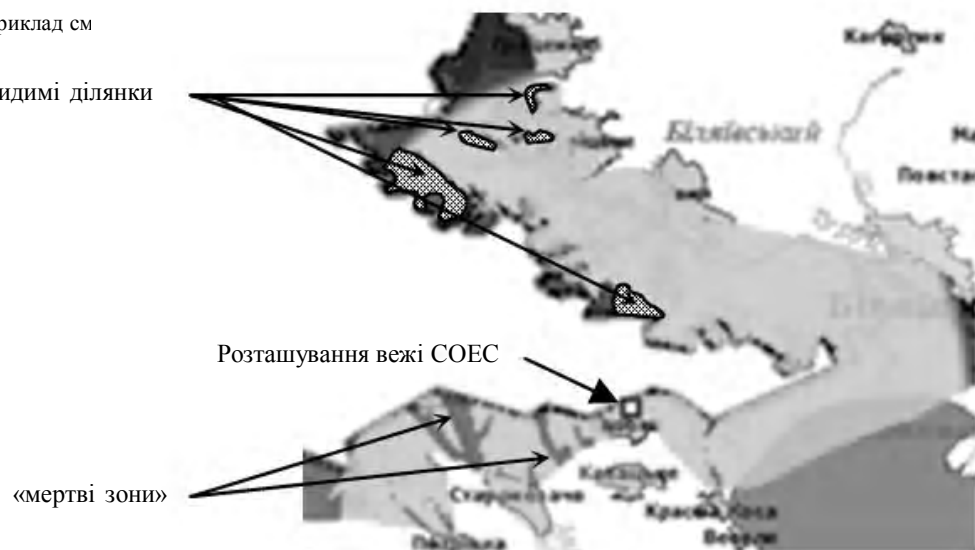


Рисунок 2 – Помилки при використанні єдиної множини «мертвих» зон

Оскільки в певних умовах спостереження ТЗС характеризуються граничною ефективною дальністю R_{ef} , то розглядати розміщення веж спостереження на більшій за R_{ef} відстані видається недоцільним. У зв'язку з цим, з використанням методів геообробки на основі множини S_m шляхом її розширення визначається множина S_r (рис. 3).

Однак, оскільки смуга перекриття знаходиться поряд з лінією державного кордону, множина S_r утворена точками, які знаходяться на відстані не більшій за R_{ef} від будь-якої точки $(x,y) \in S_m$, географічно може виходити за межі держави. На цих ділянках розміщення веж є неможливим. Тому наступним елементом геомоделі (рис. 3) є знаходження перетину множини S_r з множиною точок, що належать території України. Остання операція дещо зменшує потужність остаточної множини S_p , на якій шляхом перебору здійснюється пошук оптимального рішення.

Таким чином, для вирішення оптимізаційного завдання потрібно знайти таке розміщення N веж спостереження СОЕС на множині S_p (рис. 4), щоб максимізувати загальну ефективність W ведення спостереження всією системою:

$$W = \frac{\sum_{(x,y) \in S_m} (1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i(x,y)))}{nsm} \quad (2)$$

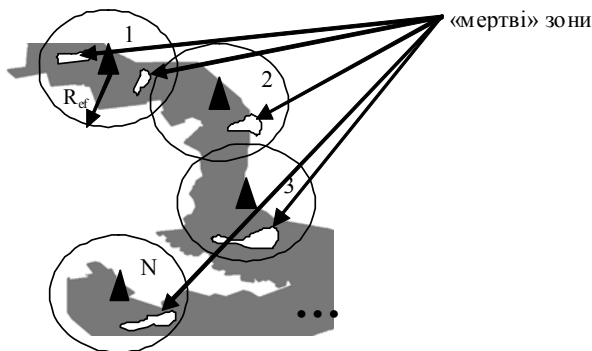


Рисунок 4 – Схематичне представлення оптимізаційного завдання

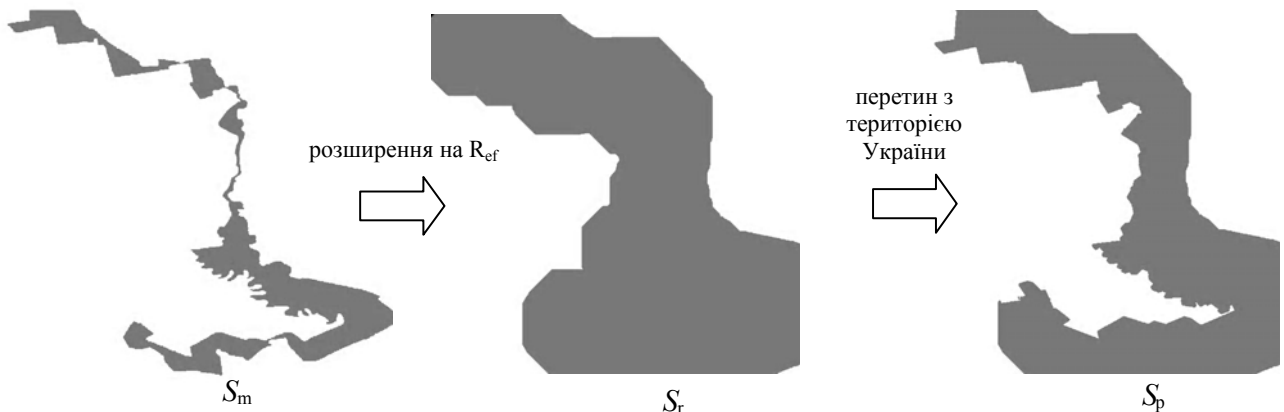


Рисунок 3 – Геомодель визначення множини S_p , на якій проводиться пошук оптимального розміщення веж СОЕС

Слід відмітити, що необхідність урахування «мертвих зон», які специфічні для кожного варіанту розміщення вежі, значно ускладнює завдання.

Оскільки вежі СОЕС є однотипними, то при проведенні перебору такі варіанти розміщення, як наприклад $\{1,237,8\}$ і $\{237,8,1\}$, є тотожними і їх потрібно уникати (у фігурних дужках вказані порядкові номери елементів множини S_p , які представляють собою точки з координатами). Відповідно до цього, варіанти розташувань веж описуються сполуками без повторень. Загальна кількість варіантів розстановки описується виразом для знаходження сполук без повторень:

$$C_N^m = \frac{N!}{m!(N-m)!} \quad (3)$$

Для варіанту району розміщення СОЕС на Білгород-Дністровській ділянці кордону $m=375$. У випадку кількості веж $N=4$, $C_{375}^4 = 810855375$. Для кожного з цих варіантів потрібно обчислити (2) і за критерієм його максимальності визначити найкращий варіант розміщення веж СОЕС. Обчислення (2) потребує визначення «мертвих зон», що, в свою чергу, є складним обчислювальним завданням. Тому для можливості вирішення задачі структурної оптимізації побудови СОЕС з використанням звичайних засобів обчислювальної техніки необхідно максимально спростити обчислювальну складність алгоритму обчислення (2). З цією метою пропонується визначення всіх $P_i(x,y)$ провести попередньо зі збереженням у масиві перед здійсненням перебору варіантів розстановки веж.

Іншим підходом до суттєвого зменшення самого числа варіантів, для яких проводиться обчислення (2), є уникнення наперед малоефективних варіантів розстановки, при яких різні вежі розміщуються на невеликій відстані (співмірній з R_{ef}). Для зменшення обчислювальної складності відстані між всіма варіантами можливих розташувань веж обчислюються завчасно і зберігаються у масиві $R=\{r_{ij}\}$, де r_{ij} – відстань між i -м і j -м елементом S_p (ці елементи представляють можливі розміщення веж спостереження).

Фрагмент основного алгоритму перебору сполук веж без повторень з уникненням їх близького розміщення і використанням рекурсії наведений на рис. 5. Рекурсив-

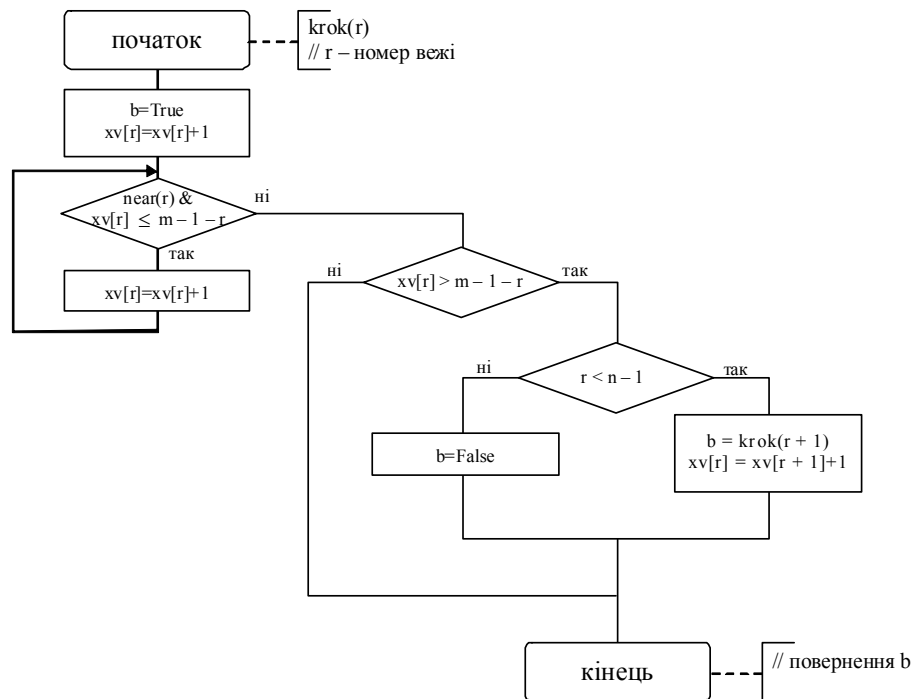


Рисунок 5 – Блок-схема фрагменту алгоритму обчислення ефективності прикриття необхідної смуги перекриття

на функція, представлена на рис. 5, забезпечує визначення наступного варіанту сполук при проведенні перебору. Її аргумент R визначає номер вежі СОЕС, яка потребує зміни місця (номера елементу множини S_p). З основного алгоритму функції передається $r=0$, однак при визначенні наступного варіанту в алгоритмі рис. 5 функція викликає рекурсивно сама себе для старших розрядів, які відповідають іншим вежам спостереження. На початку алгоритму перевіряється умова взаємної близькості веж спостереження. Для цього викликається функція $near(r)$, яка реалізує таку перевірку. З метою збільшення швидкодії у даній функції вибираються відповідні значення з попередньо обчисленого масиву відстаней між всіма парами можливих розташувань веж S_p . У випадку, якщо поточне розташування r -ї вежі є значно меншим за ефективну відстань спостереження, ця функція повертає істинне значення. У цьому випадку положення вежі змінюється на наступне. Так продовжується до стану віддалення поточної вежі на значну відстань від інших, або до досягнення кінцевого для перебору значення. В останньому випадку, який виявляється наступною перевіркою умови, проводиться рекурсивний виклик функції для наступної вежі і ініціалізація нового положення поточної вежі в залежності від положення наступної.

Такий алгоритм забезпечує перебір всіх варіантів сполук без повторень з прорідженням варіантів за рахунок аналізу близькості веж. Слід відмітити, що такий підхід суттєво зменшує загальну кількість ітерацій за рахунок відкидання наперед малоефективних варіантів розташування веж (немає сенсу розміщувати дві вежі поруч). Однак в окремих випадках при невідповідному співвідношенні смуги перекриття, кількості веж і ефективної дальності технічних засобів спостереження можливі випадки, коли таке неефективне близьке розташування веж СОЕС може забезпечити дещо краще значення показни-

ка ефективності. Тому при використанні такої модифікації алгоритму мова має йти не про оптимальне (з точки зору максимальності показника W), а про раціональне розташування веж СОЕС. Якщо потрібен перебір всіх сполук, в алгоритмі рис. 5 прибирається перевірка першої умови (залишається права частина алгоритму).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для реалізації методу оптимізації розстановки веж СОЕС (у тому числі і алгоритму рис. 5) було розроблене відповідне програмне забезпечення. Структурно воно містить дві програми. Перша програма на основі попередньо встановленого кроку дискретизації інформації про рельєф місцевості з використанням просторово-частотного аналізу і множини S_p , представлені у графічному форматі, проводить розрахунок «мертвих зон» для кожного можливого варіанту розташування вежі СОЕС. Ці варіанти зберігаються в визначеному каталозі як сукупність графічних файлів, імена яких відповідають координатам розміщення веж. Оскільки проведення такого розрахунку може бути тривалим, алгоритм першої програми реалізує послідовне продовження розрахунку після попередньої зупинки. Основна оптимізаційна програма, головне вікно якої представлено на рис. 6, реалізує головні функції визначення оптимальної та раціональної розстановки веж СОЕС.

У даній програмі передбачено насамперед читування смуги перекриття, яка задається у графічному форматі. Далі реалізується процедура читування попередньо обчислених «мертвих зон» і здійснення з їх використанням розрахунку показника ефективності для кожного варіанту розташування веж. Для цього застосовується вираз (1). В ході обчислень використовуються вихідні дані, які задаються в нижній частині вікна програми рис. 6. Після розрахунків за формулою (1), стають доступними

кнопки для виклику процедур оптимізації розстановки веж. Оскільки оптимізація може зайняти значний час, алгоритмом передбачене періодичне зберігання поточного стану. Після припинення роботи програми процес розрахунків можливо продовжити з останнього збереженого варіанту.

Програма тестувалась на обчислювальній платформі з центральним процесором Intel Core 2 Duo E6300 (тактова частота 1,86 ГГц) та 3 Гб оперативної пам'яті. У роботі досліджувалась Білгород-Дністровська ділянка кордону, в межах якої розгорнута існуюча СОЕС. Слід відмітити, що попередні дослідження показали низьку ефективність для поточної структурної будови цієї системи.

Потужність множини S_p становила $m=374$. Для випадку оптимальної розстановки двох веж СОЕС загальне число сполук без повторень за виразом (3) становило 69751 варіант. Початковий час обчислень становив близько 10 хвилин, що відповідало приблизно 116 ітераціям (обчислення варіантів сполук і відповідних їм ефективностей СОЕС за (2)).

Після вдосконалення програмної реалізації алгоритму за рахунок переходу до цілочисельного однобайтно-

го представлення ймовірності з її масштабуванням час на оптимізацію було скорочено до 6 хвилин. Це відповідало майже двохста ітераціям за секунду.

Подальше прискорення роботи проведено за рахунок модернізації алгоритму за рахунок виключення з перебору наперед неефективних варіантів поруч розташованих веж. Такий підхід дозволив для двох веж зменшити число ітерацій з 69751 до 52875 для малих цілей (відповідає невеликим значенням R_{θ}) та до 22922 для великих цілей (відповідає великим значенням R_{θ}). Для останнього варіанту скорочення числа варіантів більш ніж у 3 рази дозволило досягнути значного зменшення витрат часу, фактично до менш ніж 2-х хвилин. Слід відмітити, що в усіх випадках при однакових умовах спостереження результат оптимізації був ідентичним. Для малих цілей він представлений на рис. 7. У правій частині рис. 7 представлені результати перевірки отриманого варіанту у програмі для оцінки ефективності функціонування СОЕС, запропонованої авторами раніше. Як випливає з рисунку, числові значення показника в цілому близькі. Однак більша точність розрахунку цього показника потребує більше однієї секунди лише для одного варіанту розміщення веж СОЕС.

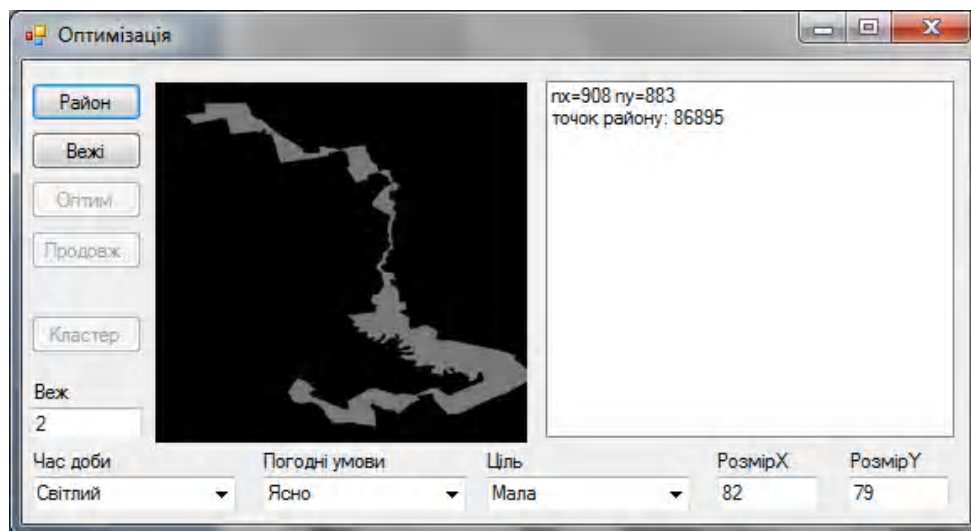


Рисунок 6 – Головне вікно програми для визначення оптимальної та раціональної розстановки веж СОЕС

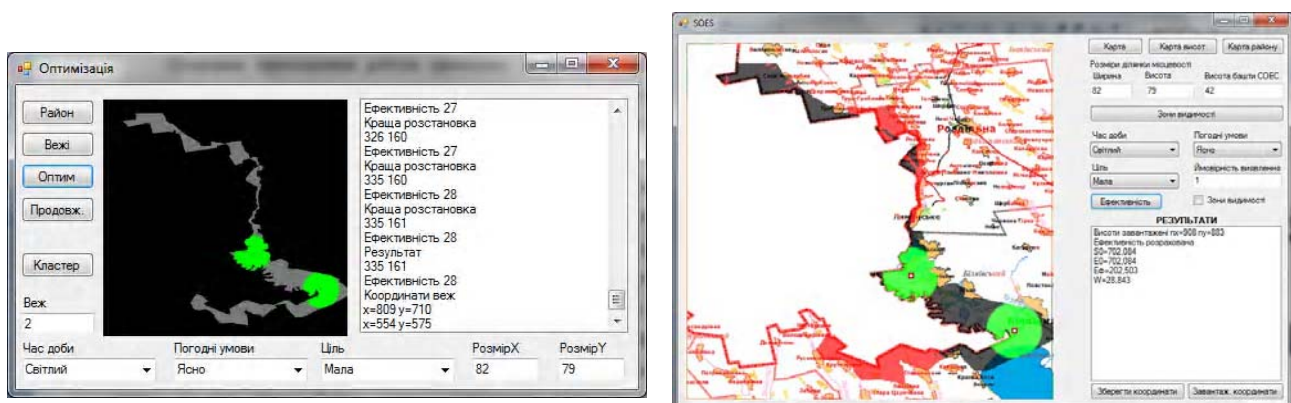


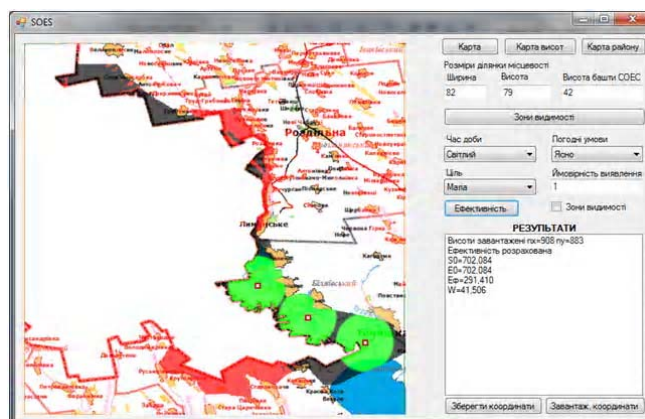
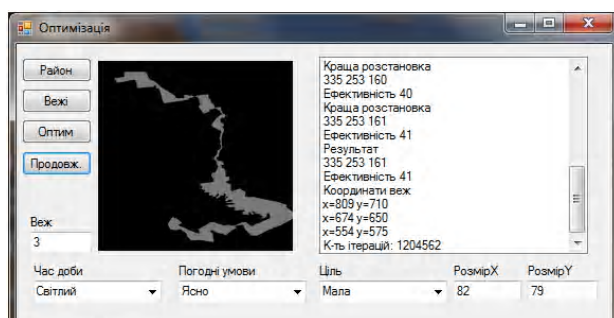
Рисунок 7 – Розстановка двох веж у випадку виявлення малих цілей

Для трьох цілей загальна кількість сполук вже складає 8649124. Для малих цілей використання модифікованого алгоритму дозволило його зменшити до 1204562. На обчислення результату (рис. 8а) при цьому витрачено трохи менше 3-х годин. Однак для великих цілей за рахунок використання алгоритму рис. 5 число ітерацій скоротилось до 490325 (більш ніж у 17 разів). Це дало можливість менш ніж за годину вирішити задачу розста-

новки трьох веж COEC (рис. 8б). Оптимізація без зменшення числа ітерацій потребувала близько однієї доби.

Для 4-х веж обчислювальна складність оптимізаційної задачі значно зростає. У зв'язку з цим, розрахунки проводились лише для випадку великих цілей (з великим R_{ef}) і використанням модифікованого алгоритму перебору сполук. Процес обчислень зайняв майже дві години. Результати розрахунків представлені на рис. 9

а) малі цілі



б) великі цілі

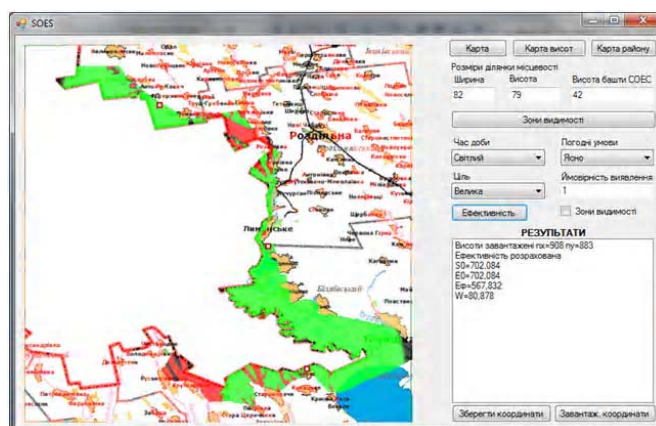
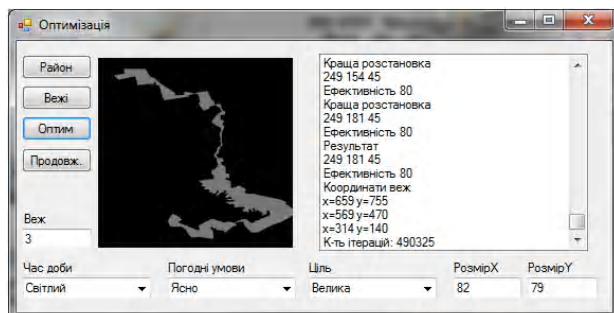


Рисунок 8 – Розстановка 3-х веж COEC

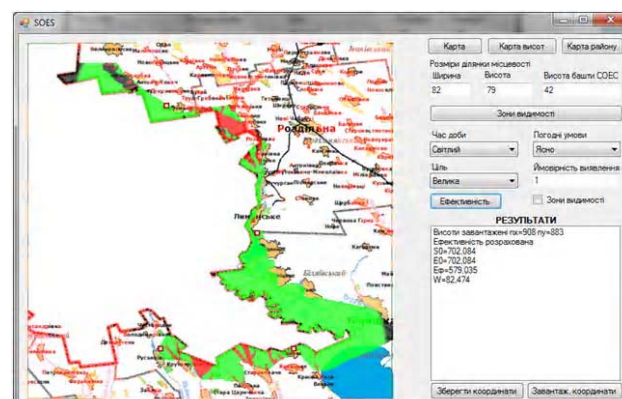
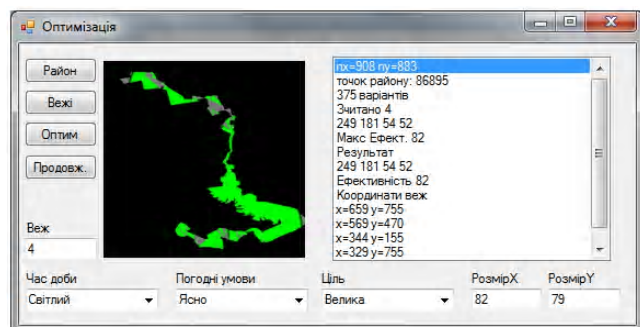


Рисунок 9 – Розстановка 4-х веж COEC при виявленні великих цілей

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Слід відмітити, що авторським колективом за участі авторів даної роботи раніше було запропоновано підхід до раціональної розстановки веж спостереження на основі використання кластерного аналізу. Однак такий підхід є більшою мірою евристичним. І хоча він і забезпечував в цілому непогані результати, про їх оптимальність стверджувати було не можливо. Суть підходу полягала в розбитті множини S_m на задану кількість кластерів з визначенням їх центрів. Для цього використовувався класичний метод кластерного аналізу K-Means. Однак оскільки цей метод використовує випадкову початкову вибірку, окремі результати його застосування можуть дещо відрізнятися. З метою уникнення цього було запропоновано декілька вдосконалених методик, які до вирішення оптимізаційного завдання в даному дослідженні забезпечували найкращі результати.

Порівняння результатів вирішення оптимізаційного завдання з результатами найкращих варіантів раціональної розстановки веж СОЕС, отриманих з використанням методів кластеризації, наведені у табл. 1.

З даних, наведених у табл. 1, випливає, що очікувано кращі результати по результуючому показнику ефективності СОЕС W забезпечує запропонований в даному дослідженні метод. По великих цілях, в умовах невеликої кількості веж для досліджуваної масштабної ділянки, природно забезпечується значно вища ефективність функціонування СОЕС.

При використанні кластеризації з метою раціональної розстановки 4-х веж переважно отримувались результати з значно меншими значеннями W . Однак один з варіантів, обумовлених випадковою початковою розстанов-

кою кластерів, забезпечив ефективність близьку до оптимальної рис. 10.

Слід відмітити, що використання кластеризації є набагато швидшим, ніж перебір всіх можливих варіантів розміщень веж СОЕС. Все це обумовило доцільність поєднання швидкого розрахунку показника W , реалізованому в цьому дослідженні, з методом розстановки веж спостереження на основі методу кластеризації. З цією метою в програмному забезпеченні рис. 6 реалізована додаткова функція кластеризації.

В циклі з використанням кластерного аналізу отримуються варіанти розстановки веж. Ці варіанти перевіряються на предмет можливості їх реалізації існуючими можливими розміщеннями веж СОЕС. У випадку такої можливості проводиться обчислення показника W і за його значенням обирається кращий варіант. У випадку, якщо за певну кількість ітерацій (у програмі цей поріг встановлено на рівні 700) покращення показника ефективності не відбувається, цикл припиняється. Такий підхід дозволяє отримати компромісне рішення, яке у випадку великої кількості веж дозволяє за обмежений час отримати рішення, близьке до оптимального. З використанням цього методу для розстановки 4-х веж СОЕС при спостереженні за великими цілями отримане значення $W=80,9$, що є близьким до оптимального $W=82,5$ (рис. 11).

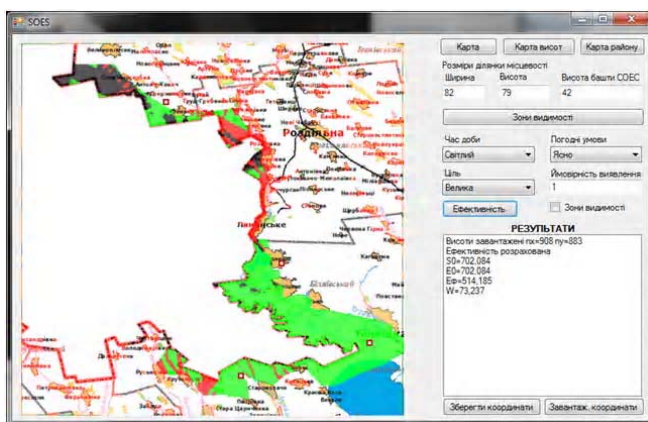
Слід відмітити, що результат рис. 11 отриманий за кілька хвилин обчислень. Модифікований метод розстановки веж на основі кластеризації з вибором найкращого з різних варіантів за критерієм максимізації показника ефективності W дозволяє в короткі строки проводити структурну раціоналізацію побудови СОЕС у випадку більшої кількості веж. На рис. 12 наведений раціональний варіант розстановки 8-ми веж, отриманий за час до 5 хвилин. Перебір всіх варіантів для 8-ми веж навіть з використанням методу рис. 5 зайняв би надзвичайно великий проміжок часу.

6 ОБГОВОРЕННЯ

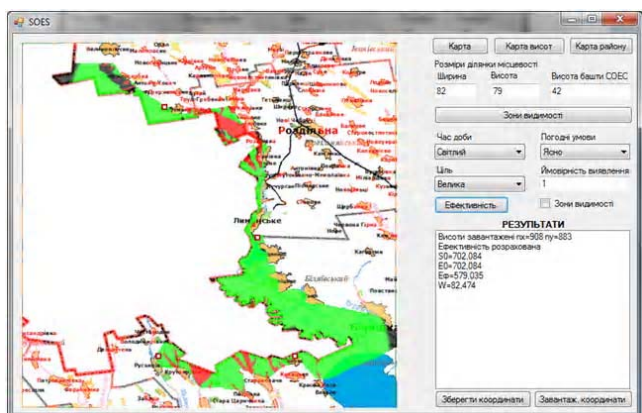
Великі витрати часу пояснюються обчислювальною складністю відповідної задачі. Тому запропонований модифікований метод розстановки веж на основі кластеризації є одним з дієвих методів, що забезпечують вирішен-

Таблиця 1 – Оцінювання ефективності СОЕС

Кількість веж	Ціль	W раціональна, %	W оптимальна, %
2	мала	17,3	28,8
2	велика	53,1	68,5
3	мала	32,5	41,5
3	велика	66,7	80,9
4	велика	73,2	82,5



а



б

Рисунок 10 – Порівняння результатів розстановки 4-х веж СОЕС: а – раціональна розстановка, б – оптимальна розстановка

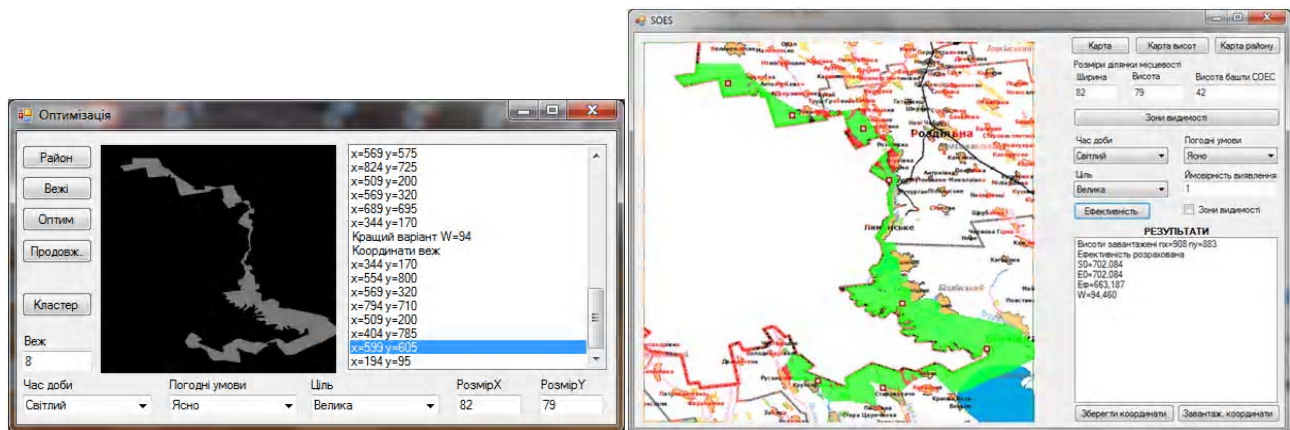


Рисунок 11 – Розстановка 4-х веж COEC з використанням модернізованого методу кластеризації і перевірка її ефективності

ня практичної задачі побудови структури COEC для довільної розмірності задачі за допустимі проміжки часу. Однак у випадку важливості урахування точних значень ефективнісних характеристик функціонування COEC слід застосовувати вище запропонований авторський метод.

ВИСНОВКИ

Таким чином, у роботі поставлена задача оптимізації розміщення веж системи оптико-електронного спостереження та запропоновано методи її вирішення, які можуть застосовуватись в залежності від цільових настанов, і які передбачають максимізацію показника ефективності функціонування системи. Особливістю методу є використання в ньому проміжних результатів геомодельовання.

ПОДЯКИ

У статті визначений науково-методичний апарат структурної оптимізації системи оптико-електронного спостереження. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону і кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії Державної прикордонної служби України. Дослідження здійснювались у рамках науково-дослідних робіт за темами «Опис рельєфу місцевості в задачах статистичної радіофізики з застосуванням геоінформаційних систем» та «Формалізація задач геоінформаційної обробки даних в системі охорони кордону».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Кузнецов В. Ю. Задачи покрытия ортогональных многоугольников с запретными участками / В. Ю. Кузнецов // Вестник УГАТУ. – 2008. – Т. 10, № 2 (27). – С. 177–182.
- Kershner R. The number of circles covering a set / R. Kershner // Amer. J. Mathematics. – 1939. – Vol. 61, № 3. – P. 665–671.
- Бабий С. М. Алгоритм покрытия площади лесного массива кругами видеонаблюдения и контроля / С. М. Бабий, Д. А. Кочкар, В. В. Чмовж // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7 (48). – С. 272–277.
- Кочкар Д. А. Оптимальное размещение вышек наблюдения наземных систем видео-мониторинга лесных пожаров / Д. А. Кочкар, С. Ю. Мединцев, А. А. Орехов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2010. – №7(48). – С. 311–314.
- Рекомендация МСЭ-R P.1411-6 Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования наружных систем радиосвязи малого радиуса действия и локальных радиосетей в диапазоне частот от 300 МГц до 100 ГГц [Электрон. ресурс] / – Режим доступа: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.

- The Decision of Problems of Optimization of Territorial Arrangement of the Radio-Transmitting Stations at Design of Transmission Networks / [G. Ščerbakov, V. Lindval, E. Spirina et al.] // Electronics and Electrical Engineering. – Kaunas : Technologija, 2004. – № 3(52). – P. 47–51.
- Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI / [W. Franklin, M. Inanc, Z. Xie et al.]. // ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings. ACM New York, 2007. – P. 228–236.
- Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain / [M. Tracy, W. Franklin, B. Cutler et al.] // Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference, San Diego, 26–27 August 2007 : proceedings. Bellingham, 2007. – P. 6697–16.
- Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells / [W. Franklin, C. Vogt, A. Riedl et al.] // Progress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006 : proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 845–861.
- Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – Москва : Воениздат, 1979. – 160 с.
- Царьов Ю. О. Засоби візуального спостереження охорони державного кордону / Ю. О. Царьов, Д. А. Купрієнко. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2010. – 164 с.
- Боровик О. В. Методика оцінки ефективності функціонування однієї вежі системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: військові та технічні науки : наукове видання / [гол. ред. Олексієнко Б. М.]. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2016. – № 4(70). – С. 207–226.
- Боровик О. В. Оцінка ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 93–99.
- Рачок Р. В. Алгоритми визначення областей видимості з веж системи оптико-електронного спостереження / Р. В. Рачок // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К. : ВІКНУ, 2017. – Вип. 56. – С. 57–63.
- Рачок Р. В. Вибір кроку дискретизації представлення рельєфу місцевості в задачах визначення областей видимості / Р. В. Рачок // Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації. – Випуск 2. – Київ : ВІПІ, 2017. – С. 85–91.

Стаття надійшла до редакції 16.07.2017.

Після доробки 07.09.2017.

Рачок Р. В.¹, Боровик О. В.², Боровик Л. В.³

¹Канд. техн. наук, доцент, докторант докторантуры, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

²Д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры инженерного обеспечения и технических средств охраны границы, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

³Канд. психол. наук, доцент, доцент кафедры общенаучных и инженерных дисциплин, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

СТРУКТУРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Актуальность. В охране границы используется система оптико-электронного наблюдения, которая представлена совокупностью башен, на которых установлены радиолокационные, тепловизионные и видео средства наблюдения. Эффективность выявления нарушителей границы с использованием данной системы существенно зависит от ее функционального и структурного строения. Функциональное построение системы оптико-электронного наблюдения определяется подбором технических средств наблюдения с учетом их функциональных возможностей. Структурное строение системы зависит от выбора мест расположения башен наблюдения с учетом физико-географических условий местности и характеристик технических средств наблюдения. Несвершенство научно-методического аппарата в области структурной оптимизации построения системы оптико-электронного наблюдения обусловила актуальность исследования.

Цель. Целью работы является разработка метода структурной оптимизации размещения башен системы оптико-электронного наблюдения.

Метод. В работе поставлена задача оптимизации размещения башен системы оптико-электронного наблюдения и предложен метод ее решения, который предусматривает максимизацию показателя эффективности функционирования системы. Особенностью данного метода являются: использование геомодели с целью уменьшения количества вариантов размещения башен системы, применение авторского подхода к выбору шага дискретизации пространственных данных и быстросходящего алгоритма вычисления показателя эффективности функционирования системы оптико-электронного наблюдения.

Результаты. В работе показаны преимущества предлагаемого метода по сравнению с ранее предложенными подходами к выбору рационального размещения башен на основе кластерного анализа. Предложено программно-алгоритмическую реализацию метода структурной оптимизации системы оптико-электронного наблюдения. Приведено описание алгоритмической и программной реализации этого метода. С использованием разработанного программного обеспечения проведена оптимизация размещения башен системы оптико-электронного наблюдения, определены рекомендации по ее структурному построению.

Выводы. Использование предложенного метода позволяет провести структурную оптимизацию построения системы оптико-электронного наблюдения за счет расстановки башен наблюдения с максимизацией показателя эффективности функционирования этой системы. Возможным направлением усовершенствования метода является уточнение результатов с использованием большего разрешения.

Ключевые слова: система оптико-электронного наблюдения, метод оптимальной расстановки, башня системы, показатель эффективности системы, алгоритм.

Rachok R. V.¹, Borovik O. V.², Borovik L. V.³

¹PhD, Associate professor, doctoral candidate of the doctoral studies, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, department of engineering and technical means of border protection, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine

³PhD, Associate professor, department of General scientific and engineering disciplines, the National academy of State border guard service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytsky, Khmelnytsky, Ukraine

STRUCTURAL OPTIMIZATION OF THE SYSTEM OF OPTICAL-ELECTRONIC OBSERVATION

Context. In border security uses a system of optical-electronic observation, which presents a set of towers that have radar, thermal imaging and video surveillance. The efficiency of detecting trespassers with the use of this system significantly depends on its functional and structural construction. The functional structure of system of optical-electronic observation is determined by the selection of technical means of surveillance (TCS) based on their functionality. Structure of the system depends on the choice of the locations of observation towers with the physical and geographical conditions of the terrain and technical characteristics of the TCS. The imperfection of the scientific methodological apparatus in the field of structural optimization of building of system of optical-electronic observation was determined by the relevance of the study.

Objective. The aim of this work is to develop a method of structural optimization of the placement of the system of optical-electronic observation towers.

Method. In work the task of optimizing the placement of the towers of system of optical-electronic observation and the proposed method of its solution, which involves the maximization of efficiency of functioning of the system. The peculiarity of this method is the use of geomodel to reduce the number of accommodation of the towers of the system, the use of the author's approach to sampling of spatial data and high-speed algorithm for calculation of efficiency of functioning of system of optical-electronic observation.

Results. The paper shows the advantages of the proposed method compared to previously proposed approaches for the choice of rational placement of towers on the basis of cluster analysis. In this work the proposed software-algorithmic implementation of the method to structural optimization of the system of optical-electronic observation. The authors describe the description of algorithmic and software implementation of this method. Using the developed software optimized placement of the towers of the system of optical-electronic observation, certain recommendations regarding the structure of this system.

Conclusions. Using the proposed method allows to carry out structural optimization of building of system of optical-electronic observation due to the placement of observation towers with the maximization of efficiency of functioning of this system. A possible direction of improvement of the method is a refinement of the results using a higher resolution geomodel.

Keywords: system of optical-electronic observation, a method for optimal placement, tower systems, system performance indicator, algorithm.

REFERENCES

1. Kuznecov V. Ju. Zadachi pokrytija ortogonal'nyh mnogougol'nikov s zapretnymi uchastkami, *Vestnik UGATU*, 2008, Vol.10, No. 2(27), pp. 177–182.
2. Kershner R. The number of circles covering a set, *Amer. J. Mathematics*, 1939, Vol. 61, No. 3, pp. 665–671.
3. Babij S. M., Kochkar' D. A., Chmovzh V. V. Algoritm pokrytija ploshhadi lesnogo massiva videonabljudenija i kontrolja, *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2010, No. 7(48), pp. 272–277.
4. Kochkar' D. A., Medincev S. Ju., Orehov A. A. Optimal'noe razmeshhenie vyshek nabljudenija nazemnyh sistem videomonitoringa lesnyh pozharov, *Radioelektronni i komp'juterni sistemi*, 2010, No. 7(48), pp. 311–314.
5. Rekomendacija MSJe-R P.1411-6 Dannye o rasprostranenii radiovoln i metody prognozirovaniya dlja planirovaniya naruzhnyh sistem radiosvjazi malogo radiusa dejstvija i lokal'nyh radiosetej v diapazone chastot ot 300 MGc do 100 GGc [Elektron. resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/en>.
6. Ščerbakov G., Lindval V., Spirina E. et al. The Decision of Problems of Optimization of Territorial Arrangement of the Radio-Transmitting Stations at Design of Transmission Networks, *Electronics and Electrical Engineering*. Kaunas, Technologija, 2004, No. 3(52), P. 47–51.
7. Franklin W., Inanc M., Xie Z., Tracy M., Cutler B., Andrade M., Luk F. et al. Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI, *ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings*. ACM New York, 2007, pp. 228–236.
8. Tracy M., Franklin W., Cutler B., Andrade M., Luk F., Inanc M., Xie Z. et al. Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference, San Diego, 26–27 August 2007: proceedings*. Bellingham, 2007, pp. 6697–16.
9. Franklin W., Vogt C., Riedl A., Kainz W., Elmes G. et al. Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells, *Progress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006: proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 845–861.
10. Gorbunov V. A. Jefferktivnost' obnaruzhenija celej. Moscow, Voenizdat, 1979, 160 p.
11. Car'ov Ju. O., Kuprienko D. A. Zasobi vizual'nogo sposterezhenija ohoroni derzhavnogo kordonu. Hmel'nic'kij, Vid-vo NADPSU, 2010, 164 p.
12. Borovik O. V., Rachok R., Darmoroz M. gol. red. Oleksienko B. M. Metodika ocinki efektnosti funkcionuvannja odnič vezhi sistemi optiko-elektronnogo sposterezhenija, *Zbirnik naukovih prac' Nacional'noї akademii Derzhavnoї prikordonnoї sluzhbi Ukraїni. Serija: vijs'kovi ta tehnični nauki : naukovie vidannja*, Vidavnictvo NADPSU, 2016, No. 4(70), pp. 207–226.
13. Borovik O. V., Rachok R. V., Darmoroz M. M. Ocinka efektnosti funkcionuvannja sistemi optiko-elektronnogo sposterezhenija, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2 (41), pp. 93–99.
14. Rachok R. V. Algoritmi viznachennja oblastej vidimosti z vezhi sistemi optiko-elektronnogo sposterezhenija, *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu Kiivs'kogo nacional'nogo universitetu imeni Tarasa Shevchenka*. Kiev, VIKNU, 2017, Vip. No. 56, pp. 57–63.
15. Rachok R. V. Vibir kroku diskretizacii predstavlenija rel'efu miscevosti v zadachah viznachennja oblastej vidimosti, *Zbirnik naukovih prac' Vijs'kovogo institutu telekomunikacij ta informatizacii*. Kiiv, Vipusk 2, VITI, 2017, pp. 85–91.

Табунщик Г. В.¹, Каплиенко Т. И.², Шитикова Е. В.³¹Канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина²Канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств Запорожского национального университета, Запорожье, Украина³Младший научный сотрудник кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

МОДЕЛЬ ВЕРИФИКАЦИИ СИСТЕМ С ОГРАНИЧЕННЫМИ РЕСУРСАМИ

Актуальность. Рассмотрена задача верификации систем с ограниченными ресурсами. Ключевым моментом в разработке мини-компьютерных систем является их ограниченность в системных ресурсах, что приводит к ужесточению требований к конечным продуктам на их основе. Соответственно это ограничивает область их применения в критичных системах реального времени таких как оборонная промышленность или медицинские приложения. Поэтому разработка средств верификации миникомпьютерных систем для подтверждения их стабильного функционирования является актуальной задачей. Объектом исследования являлся процесс моделирования функционирования работы реконфигурируемых систем с ограниченными ресурсами.

Цель работы – повышение надежности функционирования систем с ограниченными ресурсами с реконфигурируемыми компонентами за счет обеспечения целостности данных и автоматизации процесса верификации.

Метод. Получена модель верификации систем с ограниченными ресурсами, основанная на модели верификации веб-ориентированных систем, которая позволяет описать компоненты верифицируемых объектов и способ обмена данными на основе динамической модели передачи данных. Модифицировано понятие «функциональная единица» за счет добавления не только программных, но и аппаратных блоков, что даёт возможность автоматизации тестирования данных элементов. Особенность данной модели заключается в том, что она учитывает результаты верификации устройств, подключенных к миникомпьютерным системам, и описывает оптимальный период считывания архивных файлов, что позволяет обеспечить актуальность и целостность результатов испытаний систем с ограниченными ресурсами. В качестве экспериментального образца была рассмотрена архитектура миникомпьютерной системы на основе Raspberry Pi.

Результаты. Предложенная модель апробирована для удаленной лаборатории изучения надежности встроенных систем (ISRT).

Выводы. В работе предложена модифицированная модель верификации систем с ограниченными ресурсами, которая в отличие от модели верификации веб-ориентированных систем, описывает адаптивную архитектуру встроенных систем и содержит период передачи результатов верификации во внешнее хранилище, что позволяет применять данную модель для различных конфигураций аппаратного обеспечения.

Ключевые слова: верификация, функциональная единица, система с ограниченными ресурсами, Raspberry Pi.

НОМЕНКЛАТУРА

ИС – информационная система;
 ФЕ – функциональная единица;
 c – концепция;
 C – набор понятий (композиционных и атомарных);
 C_A – набор атомарных концепций;
 DB – хранилище данных;
 e – подмножество ресурсов информационной системы;
 E – набор ресурсов информационной системы;
 e_a – элементарная единица *interprototype* информационной системы;
 e_d – элемент информационной системы;
 E_d – набор web-ресурсов информационной системы;
 E_h – набор адаптивных элементов аппаратного обеспечения информационной системы;
 f – функциональная единица системы;
 F – множество функциональных единиц системы;
 f_a – адаптивная функция преобразования между элементами информационной системы и требованиями пользователя;
 I – множество входных данных;
interprototype – множество элементов прототипа интерфейса ВОИС;
 IoT – Internet of things;
 MV – модель для верификации;

O – множество выходных данных;
 O_s – множество эталонных значений;
 p – вариант тестирования;
 P – множество вариантов тестирования;
 P_h – вариант тестирования для верификации аппаратного обеспечения;
 P_h – множество вариантов тестирования для верификации аппаратного обеспечения;
 r_d – связь атомарных концепций и web-ресурсов информационной системы;
 $rm(a)$ – неявные требования пользователя;
 rmv – связь элементов прототипа с web-ресурсами и базой данных информационной системы;
 $rp(a)$ – явные требования (профиль) пользователя;
 $UM(u)$ – неявные требования пользователя;
 $UP(u)$ – явные требования (профиль) пользователя;
 $Vlog$ – зарезервированный объем памяти под результаты верификации;
 $Verr$ – объем аварийного файла;
 $Varch$ – объем архивного файла;
 W_{res} – набор ресурсов информационной системы;
 Y_i – результаты верификации;
 Y_{Log} – лог хода верификации;
 Y_{Res} – результат верификации;
 Y_{resp} – время отклика;
 Y_{err} – информация о найденных ошибках;

η_i' – период передачи архивных файлов из i -го объекта испытаний на хранение в БД;
 τ – прогнозируемое время наработки устройства;
 σ – допустимое количество отказов миникомпьютерных систем;
 v_{net} – средняя скорость передачи данных по сети;
 ω – коэффициент запаса.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие рынка Интернета вещей (IoT) привлекает внимание новых разработчиков и приводит к созданию операционных систем и программных продуктов, являющихся инструментами и средствами для работы с IoT-устройствами. Данная технология направлена на объединение датчиков, сенсоров и других измерительных устройств, физически распределенных в пространстве, с централизованной инфраструктурой для мониторинга и управления физической средой [1]. Данные продукты работают на микроконтроллерах, которые, в свою очередь, работают на различных IoT-устройствах. Для реализации систем управления данными устройствами чаще всего используются микрокомпьютеры, в том числе одноплатные компьютеры такие как Raspberry Pi, Intel Compute Stick, CuBox, MK802 и др. Наибольшую популярность приобрел Raspberry Pi, который при небольшой стоимости способен заменить небольшой персональный компьютер или домашний кинотеатр. Данное устройство позволяет работать не только на Linux, но и на Windows, и используется в основном при создании простых роботов и самодельных систем управления «умного дома» [2]. В совокупности с низкими требованиями открытого программного обеспечения аппаратной части и специально собранным ядром ОС, Raspberry Pi позволяет установить на него до 9 различных операционных систем, а также набор сопутствующего программного обеспечения, которое не требовательно к аппаратным ресурсам.

Ключевым моментом в разработке миникомпьютерных систем является их ограниченность в системных ресурсах [3], что приводит к ужесточению требований к конечным продуктам на их основе, таким как: малый объем потребляемой оперативной памяти и небольшое энергопотребление, модульность, упрощенные инструменты конфигурирования коммуникаций, поддержка широкого спектра беспроводных и сенсорных технологий [4]. Соответственно это ограничивает область их применения в критичных системах реального времени таких как оборонная промышленность или медицинские приложения.

Объектом исследования являлся процесс моделирования функционирования работы реконфигурируемых систем с ограниченными ресурсами.

Предмет исследования – методы и модели верификации миникомпьютерных систем.

Верификация систем с ограниченными ресурсами должна обеспечивать достоверность и логическую целостность данных, что необходимо для функционирования системы в соответствии со стандартами качества [5–6]. Также, учитывая ограниченность объема хранилищ данных, результаты верификации необходимо передавать во внешнее хранилище через определенный период времени [7].

Большинство систем управления на основе миникомпьютера (например, Raspberry Pi [2]) используют веб-интерфейс [5, 8], поэтому целью работы являлось повышение надежности функционирования систем с ограниченными ресурсами с реконфигурируемыми компонентами за счет обеспечения целостности данных и автоматизации процесса верификации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для верификации систем с веб-интерфейсом возьмем модель верификации web-ориентированных систем [9], которая построена на основании понятия концепции:

$$MV = (interprototype, E_d, DB, rmv), \quad (1)$$

$$rmv : interprototype \rightarrow E_d \times DB | \forall e_a, e_a \in \{rp(a),$$

$$rm(a)\}, e_a \rightarrow e, e = \{e_d\}.$$

Однако данная модель (1) описывает лишь структуру веб-интерфейса, не учитывая взаимосвязи системы с аппаратным обеспечением, а также процесс передачи данных между датчиками, периферийными устройствами и миникомпьютером. В существующей модели отсутствует описание структуры системы с ограниченными ресурсами для процесса верификации и взаимосвязь между элементами системы и средствами тестирования.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для определения объекта тестирования в модели верификации web-ориентированных систем выделен элемент e_d – ресурс, или документ, доступный по сети и идентифицируемый уникальным *URI*. e_d определяется функцией [4, 10]:

$$rd : C_A \rightarrow E_d | \forall c \in C_A : e_d = rd(c), e_d \cup E_d. \quad (2)$$

Для верификации в [11] было выделено понятие «функциональной единицы системы» f – элементарной структурной составляющей информационной системы, реализующей законченный функциональный блок, для проверки которого может быть разработан один или больше автоматизированных или автоматических проверочных тестов:

$$F = (E_d, P, r) | \forall e_d, e_d \in E_d, \exists p, p \in P. \quad (3)$$

Функциональная единица разработки выбирается в зависимости от вида ИС. Например, если разрабатываемая ИС требует связи с базой данных либо обращения к удаленному приложению, имеющему другой формат данных, ФЕ является функция обмена информацией с базой данных (удаленным приложением).

Основываясь на модели верификации информационных систем и онтологической модели для адаптивного web-окружения, которые предоставляют основные понятия ИС и позволяют их связать с требованиями к качеству и средствами тестирования, необходимо учесть особенности систем с ограниченными ресурсами для создания соответствующей модели верификации. Также необходимо расширить понятие ФЕ с целью автоматизации процесса тестирования не только программного, но и аппаратного обеспечения и средств передачи данных между элементами системы с ограниченными ресурсами.

Необходимо данную модель модифицировать для использования совместно с динамической моделью верификации для тестирования средств передачи данных между элементами системы с ограниченными ресурсами (Wi-Fi, Bluetooth, Ethernet и пр.).

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Особенность современных встроенных систем заключается в том, что архитектура системы тоже становится адаптивной, для чего определим, что совокупность явных UP(u) и неявных UM(u) требований пользователя включает не только множество элементов прототипа интерфейса, но и множество требований к элементам аппаратного обеспечения. Множество ресурсов примем за E , множество адаптивных элементов аппаратного обеспечения обозначим E_h , тогда для адаптивной встроенной системы будем считать $E = E_d \cup E_h, e \in E$.

Для расширения понятия ФЕ с целью автоматизировать процесс тестирования аппаратного обеспечения и средств передачи данных между элементами системы с ограниченными ресурсами было предложено интегрировать в (3) комплекс тестов по верификации аппаратного обеспечения $P_h = \langle I, O, O_s \rangle$. Цель данного комплекса заключается в тестировании методом «черного ящика» корректности полученных данных (O) от аппаратного обеспечения в ответ на отправленный запрос, содержащий некое множество входных данных (I). Полученное множество ответов O сравнивается с эталонным значением O_s и с коммуникационным протоколом, на основании их соответствия принимается решение относительно корректности функционирования тестируемого аппаратного обеспечения.

В соответствии с вышесказанным, множество ФЕ системы с ограниченными ресурсами примет вид:

$$F = (E_d, E_h, P, P_h, P_c, r) \mid \forall e_d, e_h \in E_d, \exists p, p \in P, \exists p_h, p_h \in P_h. \quad (4)$$

Для вычисления периода передачи данными от i -го миникомпьютерной системы воспользуемся [12]:

$$\eta_i' = (1 + \omega_i) (\tau V \log_i + \sigma V err_i) \left(\frac{\tau}{V arch_i} - \frac{1}{v_{net}} \right). \quad (5)$$

Результаты верификации представим в виде Y_i в виде множества $\langle Y_{Log}, Y_{Res}, Y_{resp}, Y_{err} \rangle$.

Учитывая указанные преимущества, модель для верификации систем с ограниченными ресурсами MV примет вид:

$$MV = (interprototype, E_d, E_h, DB, rmv, Y, \eta), \quad (6)$$

$$rmv : interprototype \rightarrow E_d \times E_h \times DB \mid \forall e_d, e_h \in \{rp(a),$$

$$rm(a)\}, e_a \rightarrow e, e = \{e_d\}.$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения экспериментов, была модифицирована архитектура системы ISRT [13–14], где аппаратное лабораторное обеспечение было распределено между тремя Raspberry Pi (рис. 1), а функциональность была

расширена административной панелью задания функциональных единиц.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты применения предложенной модели верификации представлены в виде разработанной электронной системы для гибкой верификации встроенных систем, которая имеет возможность работать автономно в различных средах, хранить информацию в базах данных, а также учитывать иерархическую структуру встроенных систем и выполнять верификацию систем с веб-интерфейсом.

Решение этой задачи достигается тем, что электронная информационная система для гибкой верификации встроенных систем, имеет центральный системный блок управления базами данных, соединенный в единую сеть по крайней мере с одним информационным сенсорным терминалом (e_h^1), аудиосистемой (e_h^2), микрофоном (e_h^3), видеокамерой (e_h^4), устройством, регистрирует изменение светового потока (e_h^5), модулем беспроводной связи, а также web-камерой (e_h^6), причем в качестве центрального системного блока управления базами данных используется автономный одноплатный компьютер (e_h^7), который дополнительно содержит блок синтеза данных для многослойных встроенных систем и модуль верификации информационных систем с веб-интерфейсом, а в качестве модуля беспроводной связи используется Wi-Fi модуль (e_h^8) и дополнительно содержит GSM модуль (e_h^9). Для каждого из указанных аппаратных устройств существует программное обеспечение, которое отвечает за прием и обработку данных с физических устройств. Для верификации данной системы разработано множество вариантов тестирования P , где $rf : e \rightarrow p, f = \bigcup \{e, p\}, e \in E, f \in F$.

Результаты верификации представлены в таблице 1.

Как видно из результатов верификации, устройство 6 (web-камера e_h^6) не прошло тестирование программного обеспечения, что объясняется конфликтом аппаратно-программного обеспечения e_h^6 и e_h^4 . Устройство 9 (GSM модуль) не прошло тестирование, из-за отказа программного обеспечения.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Известная конструкция устройства для встроенных систем [15] состоит из схемы встроенного контроля и анализатору состояния системы, содержащей приемник с единственным входом, запоминающее устройство, системный индикатор, частотные дискриминаторы и ключи. Недостатком устройства является невозможность удаленного управления и отсутствие средств длительного хранения информации типа баз данных и не позволяет учитывать особенности иерархической организации встроенных систем, и соответственно не позволяет решать задачи гибкой верификации встраиваемых систем.

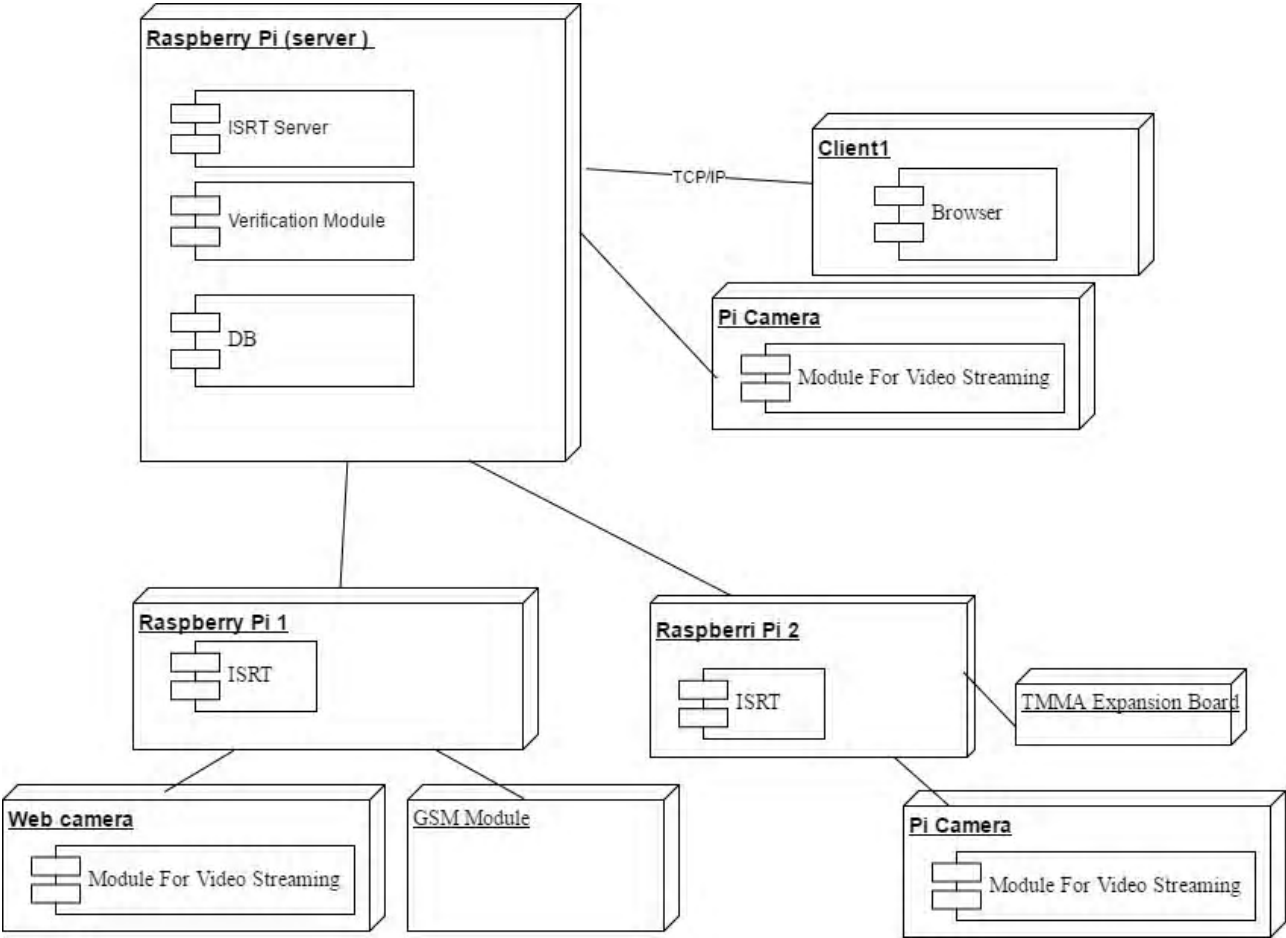


Рисунок 1 – Архітектура ISRT системи

Таблица 1 – Результаты работы электронной информационной системы для гибкой верификации встроенных систем

Номер ресурса информационной системы	Результаты тестирования		
	Аппаратного обеспечения, p_h	Программного обеспечения, p_e	Потеря данных при передаче
1	passed	passed	0%
2	passed	passed	0%
3	passed	passed	0%
4	passed	passed	0%
5	passed	passed	0%
6	passed	failed	0%
7	passed	passed	0%
8	passed	passed	0%
9	failed	failed	100%

Прототипом выбрана электронная информационная система [16], которая содержит центральный пункт управления, имеет центральный системный блок управления базами данных и соединен в единую сеть по крайней мере одним информационным сенсорным терминалом, оборудованным аудиосистемой, микрофоном, видеокamerой, устройством, регистрирует изменение светового потока, а также специализированными периферийными устройствами, такими как сканер штрих-кодов, система охлаждения и источник бесперебойного питания; один локальный пункт управления, содержащий локальный системный блок управления базами данных, оборудован модулем беспроводной связи соединен с персональным компьютером, имеющим устройство для печатания и соединен двунаправленной линией информационного обмена с крайней мере одним информаци-

онным сенсорным терминалом и центральным пунктом управления. Также система-прототип имеет информационный сенсорный терминал дополнительно оснащен модулем беспроводной связи, который соединен с локальным пунктом управления двунаправленной линией беспроводной связи.

Недостатком известной конструкции является наличие персонального компьютера, что не позволяет использовать ее автономно, и требует большие материальные затраты на реализацию электронной системы.

Дальнейшая работа будет проводиться в области автоматизации процесса выбора контрмер по результатам верификации. Также экспериментальный образец содержит лимитированное количество подключенных устройств, и не требовалось передачи данных во внешнее хранилище, поэтому исследование полученного време-

ни отклика от типовых устройств в дальнейшем будет использоваться для моделирования максимально возможной нагрузки на аппаратное обеспечение.

ВЫВОДЫ

В работе описана предложенная авторами модель для верификации систем с ограниченными ресурсами, которая позволяет определить основные концепты для управления встроенной системой, оснащенной различными датчиками, контроллерами и периферийными устройствами, которая основана на модификации модели верификации веб-ориентированных систем.

Авторами модифицировано понятие «функциональная единица» за счет добавления не только программных, но и аппаратных блоков, что даёт возможность автоматизации тестирования данных элементов.

Научной новизной работы является, модифицированная модель верификации систем с ограниченными ресурсами, которая в отличие от модели верификации веб-ориентированных систем, описывает адаптивную архитектуру встроенных систем и содержит период передачи результатов верификации во внешнее хранилище, что позволяет применять данную модель для различных конфигураций аппаратного обеспечения.

Практическая ценность работы заключается в том, что модифицированная модель верификации систем с ограниченными ресурсами, учитывает результаты верификации устройств, подключенных к миникомпьютерным системам, и описывает оптимальный период считывания архивных файлов, что позволяет обеспечить актуальность и целостность результатов испытаний систем с ограниченными ресурсами.

Предложенная модель была апробирована для удаленной лаборатории изучения надежности встроенных систем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Інформаційна система діагностування розподілених мінікомп'ютерних систем в багатоконпонентному зовнішньому середовищі» (номер государственной регистрации 0117U000615) и при поддержке международного проекта Erasmus + Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications ALIOT573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Advances in Intelligent Systems and Computing. How Ontologies Make the Internet of Things Meaningful / [ed. by S. Gaglio, G. Lo Re]. – Switzerland: Springer, 2014. – 349 p. DOI 10.1007/978-3-319-03992-3.
2. Bell Ch. Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi / Ch. Bell. – NY: Apress, 2013. – 372 p. DOI:10.1007/978-1-4302-5825-4.

Табунщик Г. В.¹, Каплиенко Т. І.², Шитикова О. В.³

¹Канд. техн. наук, доцент, професор кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Молодший науковий співробітник кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

МОДЕЛЬ ВЕРИФІКАЦІЇ СИСТЕМ З ОБМЕЖЕНИМИ РЕСУРСАМИ

Актуальність. Розглянуто задачу верифікації систем з обмеженими ресурсами. Ключовим моментом в розробці мінікомп'ютерних систем є їх обмеженість в системних ресурсах, що призводить до посилення вимог до кінцевих продуктів на їх основі. Відповідно це обмежує область їх застосування в критичних системах реального часу таких як оборонна промисловість або медичні програми.

3. Открытые операционные системы для IoT [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.pcweek.ru/iot/article/detail.php?ID=189815>.
4. Warren G. Raspberry Pi Hardware Reference / G. Warren. – NY: Apress, 2014. – 248 p. DOI:10.1007/978-1-4842-0799-4.
5. Knutov E. AH 12 years later: a comprehensive survey of adaptive hypermedia methods and techniques / E. Knutov, P. De Bra, M. Pechenizkiy // New Review of Hypermedia and Multimedia. – 2009. – Vol. 15, No. 1. – P. 5–38.
6. Corno F. Design-time formal verification for smart environments: an exploratory perspective/ F. Corno, M. Sanaullah, J Ambient //Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. – 2014. – Vol. 5, Issue 4. – P. 581–599. DOI: 10.1007/s12652-013-0209-4.
7. Морозов В. П. Сбор и анализ метрик при выполнении проектов программных изделий/[В. П. Морозов, С. Н. Баранов, А. Н. Домарацкий и др.] // Программные продукты и системы. – 1998. – № 4. – Режим доступа: – <http://swsys.ru/index.php?page=article&id=1006>.
8. Balik M. Generic Ontology-based Model for Adaptive Web Environments / M. Balik, I. Jelinek // IEEE 16th International Conference of Computational Science and Engineering. – 2013. – P. 495–500. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSE.2013.80>.
9. Каплиенко Т. І. Інформаційна технологія динамічного планування та моніторингу процесу розроблення web-орієнтованих інформаційних систем: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.06 / Каплиенко Т. І. ; М-во освіти і науки України, Херсонський Національний Технічний Університет. – Херсон, 2015. – 23 с.
10. Function Point Counting Practices Manual, Release 4.2, IFPUG, 2004. [Електрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ifpug.org/>.
11. Віддалений та віртуальний інструментарій в інжинірингу: монографія / [ed. by Karsten Henke]. – Запоріжжя : Дике поле, 2015. – 250 с. ISBN 978-966-2752-74-8.
12. Шитикова Е. В. Динамическая модель передачи данных газотурбинных установок наземного применения / Е. В. Шитикова, Г. В. Табунщик // Наукові праці Донецького національного технічного університету, серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2016. – № 1(22). – С. 132-135.
13. Interactive platform for Embedded Software Development Study / [G. Tabunshchik, D. Van Merode, P. Arras etc] // Proc. of 14th Int. Conf. on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2017) (15–17 March 2017, Columbia University, New York, USA), 2017. – P. 191–197.
14. А.С. № 66615 Система керування контентом для віддалених експериментів з дослідження надійності вбудованих систем / Г. В. Табунщик, В. О. Охмач, опубл. 13.07.2016
15. Пат. 59109 Україна, МПК (2006.01) H03K 19/20, G06F 11/07, G06F 11/30. Пристрій для функціонального діагностування електронних систем / В. П. Карчевський; заявник і патентовласник Українська Інженерно-Педагогічна Академія. – № u201009322; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.05.2011, бюл. № 9.
16. Пат. 30579 Україна, МПК (2006.01) G06F 3/01. Електронна інформаційна система / В. І. Кравченко; заявник і патентовласник Кравченко Валерій Іванович. – № u200800764; заявл. 22.01.2008; опубл. 25.02.2008, бюл. № 4.

Статья поступила в редакцию 03.06.2017.

После доработки 21.08.2017.

Тому розробка засобів верифікації мінікомп'ютерних систем для підтвердження їх стабільного функціонування є актуальним завданням. Об'єктом дослідження був процес моделювання функціонування роботи реконфігурованих систем з обмеженими ресурсами.

Мета роботи – підвищення надійності функціонування систем з обмеженими ресурсами з компонентами, що реконфігуруються, за рахунок забезпечення цілісності даних і автоматизації процесу верифікації.

Метод. Отримано модель верифікації систем з обмеженими ресурсами, заснована на моделі верифікації веб-орієнтованих систем, яка дозволяє описати компоненти об'єктів верифікації і спосіб обміну даними на основі динамічної моделі передання даних. Модифіковано поняття «функціональна одиниця» за рахунок додавання не тільки програмних, але і апаратних блоків, що дозволяє автоматизувати тестування даних елементів. Особливість даної моделі полягає в тому, що вона враховує результати верифікації пристроїв, підключених до мінікомп'ютерних систем, і описує оптимальний період зчитування архівних файлів, що дозволяє забезпечити актуальність і цілісність результатів випробувань систем з обмеженими ресурсами. В якості експериментального зразка була розглянута архітектура мінікомп'ютерної системи на основі Raspberry Pi.

Результати. Запропонована модель апробована для віддаленої лабораторії вивчення надійності вбудованих систем (ISRT).

Висновки. В роботі запропонована модифікована модель верифікації систем з обмеженими ресурсами, яка на відміну від моделі верифікації веб-орієнтованих систем, описує адаптивну архітектуру вбудованих систем і містить період передачі результатів верифікації у зовнішнє сховище, що дозволяє застосовувати дану модель для різних конфігурацій апаратного забезпечення.

Ключові слова: верифікація, функціональна одиниця, система з обмеженими ресурсами, Raspberry Pi.

Tabunshchik G. V.¹, Kapliienko T. I.², Shytikova O. V.³

¹PhD, Associate Professor, Professor of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²PhD, Associate Professor of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³Researcher in Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

VERIFICATION MODEL FOR THE SYSTEMS WITH LIMITED RESOURCES

Context. In the article the task of systems with limited resources verification is considered. One of the challenges for implementation of concurrent minicomputer systems for implementations its in real products is high requirements to the limited hardware. As a result it course additional requirements for them and limited the sphere of their implementation especially in critical real-time systems in medicine or defense industry. That's why development verification tools for minicomputer systems is actual task. The object of the research – the process of modelling of reconfiguring systems with limited resources functionality.

Objective – to improve reliability of systems with limited resources by ensuring of data integrity and automating of the verification process.

Method. The model of systems with limited resources verification based on the verification model of web-oriented systems is obtained, which describes the verified components of objects and the way of data exchange based on the dynamic model of data transmission. The concept of “functional unit” has been modified by adding hardware blocks, which makes it possible to automate the testing of these elements. The advantage of this model is that it collect results of verification of the devices connected to the minicomputers systems and describes the optimal period for reading archive files, which improve the relevance and integrity of test results for systems with limited resources. As a case study, the architecture of a minicomputer system based on Raspberry Pi was considered by the authors.

Results. Developed model was applied for the verification of the remote laboratory for reliability tasks (ISRT).

Conclusions. In the article the modified model for system with limited resources verification is suggested, which in contrast to web-oriented verification model describes adaptive architecture of the embedded systems and use model for data transition into the external storage, which make possible to implement this model for variety of hardware configurations.

Keywords: verification, functional unit, system with limited resources, Raspberry Pi.

REFERENCES

- ed. by S. Gaglio, G. Lo Re Advances in Intelligent Systems and Computing. How Ontologies Make the Internet of Things Meaningful. Switzerland, Springer, 2014, 349 p. DOI 10.1007/978-3-319-03992-3
- Bell Ch. Beginning Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi. NY, Apress, 2013, 372 p. DOI:10.1007/978-1-4302-5825-4
- Otkryitiye operatsionnyye sistemy dlya IoT [Electronic resource]. Access mode: <https://www.pcweek.ru/iot/article/detail.php?ID=189815>
- Warren G. Raspberry Pi Hardware Reference [Text]. NY, Apress, 2014, 248 p. DOI:10.1007/978-1-4842-0799-4
- Knutov E., De Bra P., Pechenizkiy M. AH 12 years later: a comprehensive survey of adaptive hypermedia methods and techniques, *New Review of Hypermedia and Multimedia*, 2009, Vol. 15, No. 1, pp. 5–38.
- Corno F., Sanaullah M., Ambient J. Design-time formal verification for smart environments: an exploratory perspective, *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2014, Vol. 5, Issue 4, pp. 581–599. DOI: 10.1007/s12652-013-0209-4.
- Morozov V. P., Baranov S. N., Domaratskiy A. N. etc Sbor i analiz metrik pri vyipolnenii proektov programmnykh izdeliy [Electronic resource], *Programmnyye produkty i sistemy*, 1998, No. 4. Access mode: <http://swsys.ru/index.php?page=article&id=1006>.
- Balik M., Jelinek I. Generic Ontology-based Model for Adaptive Web Environments, *IEEE 16th International Conference of Computational Science and Engineering*, 2013, pp. 495–500. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSE.2013.80>.
- Kapliienko T. I. Informatsiina tekhnolohiia dynamichnoho planuvannia ta monitorynhu protsesu rozroblennia web-orientovanykh informatsiinykh system: avtoref. dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.13.06; M-vo osvity i nauky Ukrainy, Khersonskiy Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet. Kherson, 2015, 23 p.
- Function Point Counting Practices Manual, Release 4.2, IFPUG, 2004. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ifpug.org/>.
- ed. by Karsten Henke Viddalenyi ta virtualnyi instrumentariy v inzhiniringu: monografiya. Zaporizhzhya, Dike pole, 2015, 250 p. ISBN 978-966-2752-74-8.
- Shytikova E. V., Tabunshchik G. V. Dinamicheskaya model peredachi dannykh gazoturbinnnykh ustanovok nazemnogo primeneniya, *Naukovi pratsi Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu, seriya: «Informatika, kibernetika ta obchisluyvalna tekhnika»*, 2016, No. 1(22), pp. 132–135.
- Tabunshchik G., Van Merode D., Arras P. etc. Interactive platform for Embedded Software Development Study, *Proc. of 14th Int. Conf. on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV2017) (15–17 March 2017, Columbia University, New York, USA)*, 2017, pp. 191–197.
- A. S. № 66615 Sistema keruvannya kontentom dlya viddalenykh eksperimentiv z doslidzhennia nadiynosti vbudovanih sistem / Tabunshchik G.V., Ohmak V.O., opubl. 13.07.2016
- Karčevs'kyj V. P. Pat. 59109 Ukrainy, MPK (2006.01) H03K 19/20, G06F 11/07, G06F 11/30. Prystrij dlja funkcional'noho diahnostuvannja elektronnykh system [Tekst] ; zavavnyk i patentovlasnyk Ukrainy, Inzhenerno-Pedahohichna Akademiya. u201009322; zavavl. 26.07.2010; opubl. 10.05.2011, bjul. № 9.
- Kravchenko V. I. Patent 30579 Ukrainy, MPK (2006.01) G06F 3/01. Elektronna informacijna systema [Tekst] ; zavavnyk i patentovlasnyk Kravchenko Valerij Ivanovykh. u200800764; zavavl. 22.01.2008; opubl. 25.02.2008, bjul. N 4.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

UDC 004.89

Bobyry M. V.¹, Milostnaya N. A.²¹Dr.Sc., Associate Professor, Professor of department of Computer Science, South-West State University, Kursk, Russia²PhD., Lecturer of department of Computer Science, South-West State University, Kursk, Russia

A SOFT FUZZY ALGORITHM OF THE MOBILE ROBOT CONTROL

Context. The task of a mobile robot control on the base of soft algorithm fuzzy inference has been solved.

Objective is the creation of soft algorithm of the fuzzy inference which allows to provide additivity of fuzzy control system.

Method. A soft algorithm of fuzzy inference used to control the mobile robot is suggested. Given algorithm allows to compensate errors inherent to the traditional models of fuzzy inference. Errors include: the curse of dimensionality, the absence of additivity and the fuzzy partition. This soft algorithm of fuzzy inference at the expense of rational allocation of premises and conclusions in a matrix of fuzzy relations, reduces the number of operations of the fuzzy inference. Another distinctive feature of the proposed soft algorithm is that in fuzzy inference to find minima and maxima used soft arithmetic operators. The paper shows that during the work of hard formulas for the implementation of these formulas while controlling the mobile robot the situations will appear when the robot loses control. The article points out that the implementation of the possibility in soft algorithm of fuzzy inference option of changes in parameters of sigmoidal membership functions will minimize the error at fuzzy system output. Dynamics of changing RMSE ratio from the varying parameters of sigmoidal membership functions proves it. The additional simulations presented in the article shows that during varying the parameters of sigmoidal membership function, during in increasing of the parameter a , is being observed decrease in the value of RMSE. The effectiveness of the proposed soft algorithm is confirmed by numerical simulation and experiments in the researching of a mobile robot movement along a line.

Results. The specialized software for microcontroller Arduino Uno is developed and it realizes the proposed soft algorithm which allows to carry out an experimental study of its properties.

Conclusions. The software realizing proposed algorithm has been developed and used in computational experiments investigating the properties of the algorithm. The experiments confirmed the efficiency of the proposed algorithm and software.

Keywords: fuzzy inference system, fuzzy set theory, RMSE, soft computing, mobile robot.

NOMENCLATURE

$RMSE$ is a root mean square error;

MF is a membership functions;

$MISO$ is a multi input single output;

FR is a fuzzy rules;

FIS is a fuzzy inference system;

y is an output parameter;

x_i is an input parameter;

n is a number of input parameters;

X is a vector of the input parameters;

k is a number of fuzzy rules;

m is a number of terms;

l is a number input parameters;

a, b, c are the parameters of the Gaussian membership function;

δ is a softness operator;

γ is an operator of the parameterization;

M is the number of observations in the learning sample.

1 INTRODUCTION

Algorithms of the fuzzy-logic inference are successfully applied in modeling of difficult technological processes of the modern control systems [1, 2, 3]. The algorithms allow increasing accuracy of the control process by balancing outside effects in real-time mode.

However, in practice, implementation of the system based on algorithms of the fuzzy-logic inference has some problems concerning continuous differentiability of MF. They are curse of dimensionality [4, 5, 6]; non-observance of the condition of the partition of unity condition [7] and non-compliance of the condition of additivity [8].

The main purpose in the article is to design a soft algorithm of fuzzy inference that allows to control robotic systems in real time.

2 PROBLEM STATEMENT

Fuzzy inference systems, based on the Zadeh rule, are used for modeling modern systems [12, 13, 14, 15]. For example, when MISO-system with n -input and one output parameter is designated, then dependence between these is defined as

$$y = f(X) = f(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

where y – an output parameter, x_i – input parameters, $i=1 \dots n$, n – number of input parameters.

The vector X of the input parameters is shown on the Cartesian product of the determination of input parameters $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$: $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$. At the same time, the function f shows a condition multiplicity of the output parameter Y in the area of the determination of the input parameters X

$$f: X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow Y.$$

According to the Zadeh rule the fuzzy multiplicity in a MISO-system is determined as

$$Y(y) = \bigvee_{X \in X_1 \times \dots \times X_n} (X_1(x_1) \wedge \dots \wedge X_n(x_n)), \quad (1)$$

where $\vee$ is a symbol, which means the operation of the hard fuzzy maximum; $\wedge$ is a symbol, which means the operation of the hard fuzzy minimum.

At the same time, the membership function of the output parameter takes the form

$$\mu_Y(y) = \bigvee_{y=f(x_1, \dots, x_n)} (\mu_{X_1}(x_1) \wedge \dots \wedge \mu_{X_n}(x_n)). \quad (2)$$

The disadvantage of the MF relation, based on the Zade rule using hard formulas is evident. When the equation (2) $\min(x_1; x_2) = \min(0,7; 0) = 0$, the result at the output is zero. Therefore, a fuzzy system will be non-sensitive to changes of the input parameter x_1 , because its value will depend on the second parameter $x_2=0$; if $x_1 = 0.2$ and the output is 0. Thus, the FIS does not possess additivity. Therefore, values of the RMSE parameter are increasing when modeling. For example, in [16] when modeling a similar system, RMSE (without training) is more than 120.

Another huge disadvantage of ANFIS models, which are created on the Zadeh rule, is existence of empty decisions in conclusions of the fuzzy inference. They increase with the conclusion of input parameters and FR, which are the knowledge base. The growth of the conclusion of FR is so fast, that it causes an error, which is concerned the dimension damnation. In recommendation [17], the conclusion of fuzzy

rules k should be the same as the conclusion of terms m . They describe a fuzzy input parameter. For example, if MISO-system has 2 input parameters and each of them is described by 3 terms, then the amount of FR will be defined as $k=m'=3^2=9$. If the fuzzy MISO-system has 12 input parameters and each of them consists of 3 terms, then the amount of FR will be defined as $k=531441$. The growth of the conclusion of input parameters from 2 to 12 will increase the conclusion of fuzzy rules in 59049 times [18].

To compensate for the above drawbacks is solved the following task: the development of a fuzzy algorithm uses of soft arithmetic operations. A comparison of the proposed method with the traditional models of fuzzy inference is implemented based on the RMSE evaluation.

3 REVIEW OF THE LITERATURE

Currently, there are a large number FIS used as a decision-making system [349]. However, these FIS in the composite rule Zadeh use hard arithmetic operations of finding the minimum and maximum [12, 13, 15, 16]. Typically, such systems are not additive, and are not monotone [8, 15]. Also hard fuzzy inference system may cause such error as the curse of dimensionality [446]. This leads to the fact that in some cases FIS cannot learned. In some cases, FIS do not provide the condition of the partition of unity [7]. To resolve this issue we recommend to use parameterized MF for ensuring the partition of unity condition and continuity through the intersection point of the adjustment linguistic terms which equal 0.5. Also, to overcome the above errors in the studies recommended to use soft arithmetic operations [9, 10, 11, 21].

4 MATERIALS AND METHODS

A soft algorithm of the fuzzy logic inference includes the following steps:

Step 1. Fuzzification of the input parameters. The fuzzy MISO-system $\gamma = f(x_1, x_2)$, which has 2 input and 1 output parameters should be considered. If each input parameter has 3 fuzzy terms (Fig. 1) with a MF then the output parameter has 5 fuzzy terms

$$\mu(y) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x - c}{a} \right)^b}, \quad (3)$$

where a, b, c are the parameters of the MF; x is a quantitative value of the input parameter.

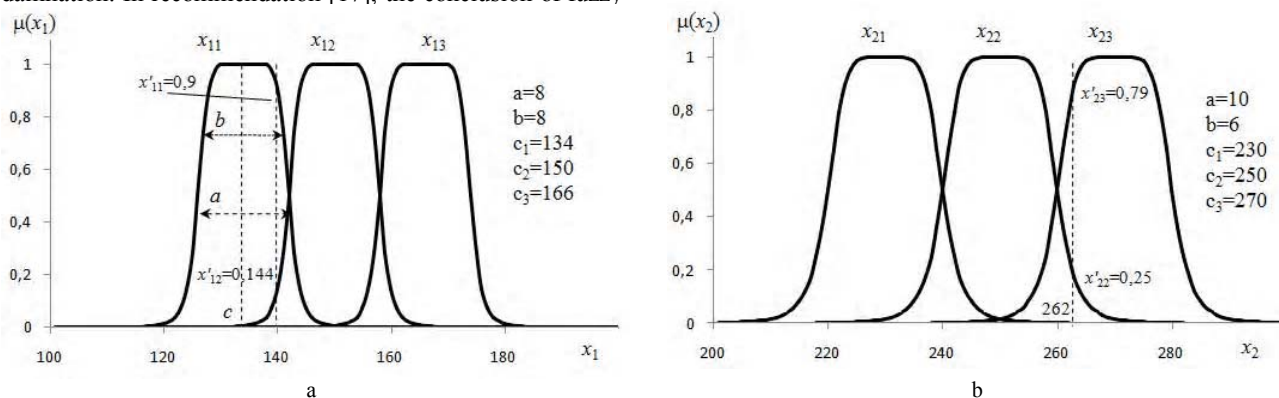


Figure 1 – Graphics of MF: a – the first input parameter x_1 ; b – is the second input parameter x_2

Step 2. Determination of values of MF for every implication of the input parameters, based on the information received from sensors of active control systems, for example (Fig.1), if $x_1=140$ then $x_2=262$:

$$x'_1 = (x'_{11}, x'_{12}, x'_{13}, \dots) = (0,9; 0,144; 0),$$

$$x'_2 = (x'_{21}, x'_{22}, x'_{23}, \dots) = (0; 0,25; 0,79). \quad (4)$$

Step 3. Synthesis of the knowledge base, which contains fuzzy rules of the type «If ... then» (see Table 1) [19].

Step 4. Creation of a fuzzy ratio matrix. Soft arithmetic operations are used while calculating MIN and MAX [8].

The operation of determination the soft MIN is obtained as follows:

$$\min_{\delta}(x_1, x_2) = \frac{x_1 + x_2 + \delta^2 - \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + \delta^2}}{2}, \quad \text{where } \delta = 0.05. \quad (5)$$

The Eq. (5) demonstrates that

$$\min_{\delta}(0,7; 0) = \frac{0,7 + 0 + 0,05^2 - \sqrt{(0,7 - 0)^2 + 0,05^2}}{2} = 0,0076.$$

Therefore, the soft MISO-system, will give the value different from zero and respond to the changing parameter x_1 , if the second parameter is $x_2=0$. In this case the fuzzy system will be additive in the whole range of input parameters.

The equation of parameterized soft maximum capture is obtained as follows

$$\max_{\delta}(x_1, x_2) = \left| \gamma \cdot \max(x_1, x_2) + 0,5(1-\gamma)(x_1 + x_2) \right|, \quad (6)$$

where γ is an operator of the parameterization. If $\gamma=1$, then Eq. (6) will apply operations of hard-MAX. If $\gamma=0$, then Eq. (6) will apply arithmetic operations.

The Eq. (6) can be applied only with 2 operands. If there are more than 2 operands, then it is necessary to apply the soft-MAX operator

$$\text{soft-MAX} = \bigvee_{i=1}^n (\max(x_{1i}, x_{2i})). \quad (7)$$

Taking into consideration the (Eqs. (5), (6), (7)) the fuzzy ratio matrix is given as in Table 2.

The conclusion of conclusions equals to the conclusion of terms of the output parameters, i.e. 5. In a hard model of the fuzzy inference the conclusion of conclusions will be

equal to 9. Therefore, a rational location of elements in the fuzzy ration matrix will be of the curse dimension.

Step 5. Truncation of output parameter terms, according to the equation

$$\mu(y)'_i = \text{soft} - \min_{i=1}^n (y'_i; \mu(y)_i), \quad (8)$$

where $i=1..n$ is the conclusion of the conclusion of the fuzzy logic inference; n is the amount of conclusions of the fuzzy logic inference.

Step 6. Integration of the transformed terms of the output parameters

$$\mu(y)' = \text{soft} - \max_{i=1}^n [\mu'(y)_1; \mu'(y)_2; \mu'(y)_3; \mu'(y)_4; \mu'(y)_5]. \quad (9)$$

Step 7. The obtained result is defuzzification by the weighted average method [20, 21]

$$y'' = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu(y)'_i}{\sum_{i=1}^n \mu(y)'_i}. \quad (10)$$

Therefore (Eqs. (3)-(10)) present a soft algorithm of the fuzzy logic inference.

4 EXPERIMENTS

The task of estimation of the created soft algorithm of the fuzzy logic inference assumes finding an optimal decision where RMSE is MIN [22, 23]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{i=1}^n (y - y'')^2} \rightarrow \min. \quad (11)$$

Experimental data $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ is given in Table 3.

Calculation of RMSE in the hard fuzzy inference system.

The data obtained from the defuzzification of the output result. Table 4 shows applying the hard algorithm of the fuzzy logic inference.

Table 4 demonstrates a non-sensitive zone. The hard fuzzy logic inference model does not react to changes of the input parameters, and it is additive.

Table 1 – Knowledge base with FR

Fuzzy rule	if		then	Fuzzy rule	if		then	Fuzzy rule	if		then
FR 1	x_{11}	x_{21}	y_5	FR 4	x_{12}	x_{21}	y_4	FR 7	x_{13}	x_{21}	y_3
FR 2	x_{11}	x_{22}	y_4	FR 5	x_{12}	x_{22}	y_3	FR 8	x_{13}	x_{22}	y_2
FR 3	x_{11}	x_{23}	y_3	FR 6	x_{12}	x_{23}	y_2	FR 9	x_{13}	x_{23}	y_1

Table 2 – Fuzzy ratio matrix

Output term	Composition			Maximum
y'_5	$b_1 = \text{soft-min}(x_{11}; x_{21})$			b_1
y'_4	$b_2 = \text{soft-min}(x_{11}; x_{22})$	$b_4 = \text{soft-min}(x_{12}; x_{21})$		$\text{soft-max}(b_2, b_4)$
y'_3	$b_3 = \text{soft-min}(x_{11}; x_{23})$	$b_5 = \text{soft-min}(x_{12}; x_{22})$	$b_7 = \text{soft-min}(x_{13}; x_{21})$	$\text{soft-MAX}(b_3, b_5, b_7)$
y'_2	$b_6 = \text{soft-min}(x_{12}; x_{23})$	$b_8 = \text{soft-min}(x_{13}; x_{22})$		$\text{soft-max}(b_6, b_8)$
y'_1	$b_9 = \text{soft-min}(x_{13}; x_{23})$			b_9

Calculation of the RMSE parameter with the use of the experimental data (see Table 3) and the data, obtained from the modeling of the hard fuzzy inference model (see Table 4) is designated as $RMSE_{hr}=247,54$.

Calculation of RMSE in the soft fuzzy inference system.

RMSE of with the appliance of soft arithmetic operations is calculated in (Eqs. (3)-(10)). The obtained data is given in Table 5.

As shown in Table 5 there are no non-sensitive zones. Thus, soft fuzzy model reacts to all changes of the input parameters and becomes additive. It helps to minimize the value of the RMSE parameter.

Calculation of the RMSE parameter with the use of the experimental data (see Table 3) and data, obtained from the modeling of the soft fuzzy inference model (see Table 5) is defined as $RMSE_{sf}=16,19$.

It is shown that the soft model of the fuzzy logic inference is in 15,3 times more corresponded to the experimental selection in Table 3.

A graphic version of the modeling is shown in Fig. 2.

Several numerical experiments are necessary to perform to study the soft algorithm of the fuzzy inference system.

Additional imitation modeling of RMSE calculation.

Some additional experiments, which allow proving effectiveness of the introduced soft algorithm, are to be performed with the random conclusions from 430 to 470. It is necessary to fill values of the output parameter in Table 3 and to calculate RMSE for hard and soft algorithms of the FIS. It is necessary to change only the values of the coefficients a and b of the output MF y if using fuzzy logic modeling Eq. (3). The value of the parameter c is not changed (see Table 6).

MIN RMSE for the soft fuzzy logic inference is obtained in the 3rd experiment: $RMSE=11.14$. MIN RMSE of the hard fuzzy logic inference is obtained in the 4th experiment: $RMSE=244.88$, then $a=40$, then $b=2$ (see Eq. (3)).

A graphic version of the best variants for the RMSE parameter is illustrated in Fig. 3.

The data, which show dynamics of RMSE depend on the parameter a (see Table 7).

Interpretation of the data (see Table 7) is given in Fig. 4.

Table 3 – Experimental selection

x_2	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
x_1	y									
110	457	432	460	440	466	468	440	451	459	444
120	451	446	464	452	452	470	442	443	438	445
130	470	434	456	464	463	452	453	469	434	432
140	470	457	465	448	434	431	442	435	435	467
150	435	455	467	464	468	455	458	464	462	430
160	461	434	442	439	462	439	458	457	466	434
170	435	448	465	442	445	446	443	455	442	447
180	446	436	456	434	452	464	432	445	444	450
190	446	453	463	447	441	455	435	465	446	465
200	461	462	455	444	446	432	452	445	436	463

Table 4 – Defuzzification on the hard fuzzy model

x_2	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
x_1	y									
110	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
120	473.99	472.72	466.44	465.7	459.01	456.76	456.76	450.12	450.05	450.33
130	474.24	481.39	481.14	473.61	465.6	457.94	450.43	450	450	449.96
140	467.64	477.45	478.12	470.24	462.62	454.6	447.54	446.05	443.11	449.96
150	461.85	465.67	465.33	457.85	450.01	442.17	434.69	434.35	438.36	449.96
160	457.04	453.96	452.48	445.42	437.42	429.81	421.93	422.61	432.89	445.25
170	450.1	450	449.58	442.06	434.43	426.45	418.9	418.67	426.32	445.25
180	450.05	449.99	443.44	443.44	441.54	434.87	434.09	427.84	426.54	438.92
190	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Table 5 – Defuzzification on the soft fuzzy model

x_2	210	220	230	240	250	260	270	280	290	300
x_1	y									
110	450.5	450.5	458.87	450.5	450.5	450.5	441.74	450.5	450.5	450.5
120	450.5	473.98	474.22	466.64	464.07	456.85	450.06	450.06	450.5	450.5
130	475.4	481.41	481.16	473.75	465.66	458.11	450.42	450	450.04	458.84
140	469.12	477.63	478.36	470.57	462.89	454.68	447.52	445.98	444.58	454.66
150	464.48	465.67	465.49	458.03	450.01	441.99	434.52	434.27	435.67	448.78
160	455.12	453.91	452.44	445.43	437.15	429.48	421.69	422.44	431.47	438.73
170	450.04	450	449.6	442.07	434.42	426.31	418.88	418.67	425.13	436.08
180	450.5	450.05	450.05	444.11	436.12	433.9	426.31	426.55	450.5	450.5
190	450.5	450.5	458.87	450.5	450.5	450.5	441.74	450.5	450.5	450.5
200	450.5	450.5	458.87	450.5	450.5	450.5	441.74	450.5	450.5	450.5

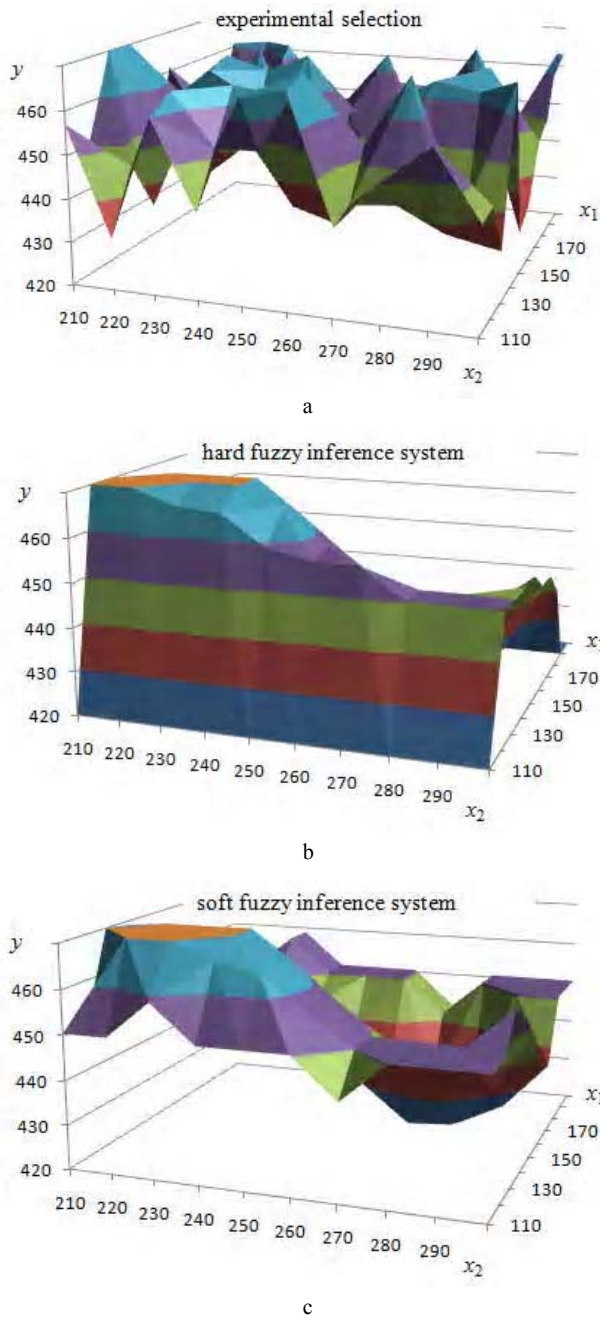


Figure 2 – Modeling: a – experimental selection; b – hard FIS; c – soft FIS

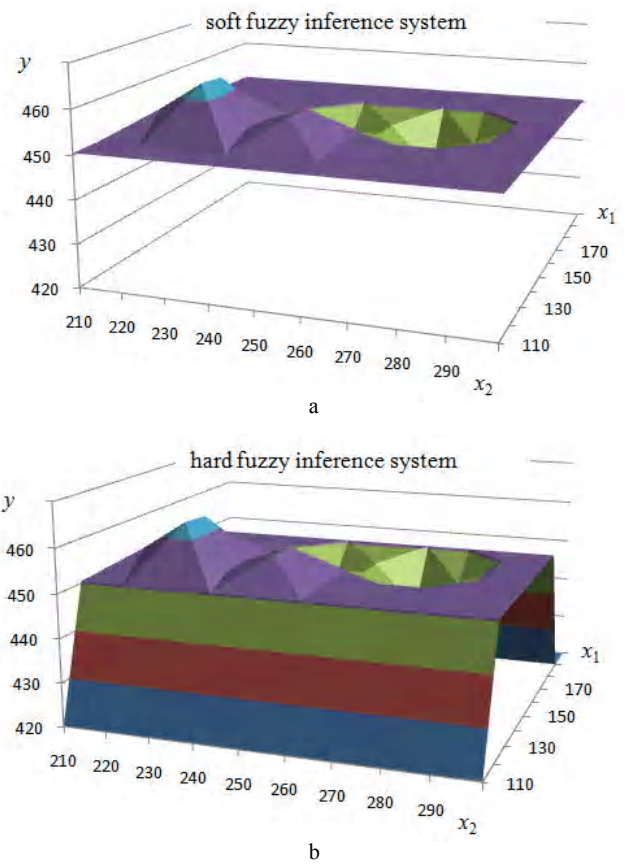


Figure 3 – a – 3rd experiment for the soft FIS; b – 4th for the hard FIS (experiment)

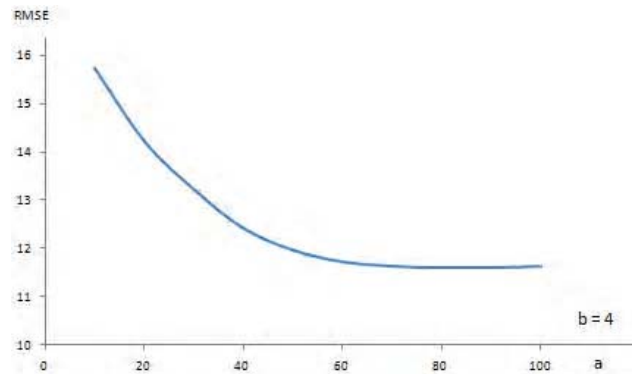


Figure 4 – Dynamics of RMSE when the parameter a is changed

Table 6 – Imitation modeling of RMSE

No. of experiment	RMSE _{hf} Hard-FIS			RMSE _{sf} Soft-FIS		
	$a=8$ $b=4$	$a=20$ $b=4$	$a=40$ $b=2$	$a=8$ $b=4$	$a=20$ $b=4$	$a=40$ $b=2$
1	247.54	247.42	247.3	16.19	14.21	11.99
2	247.55	247.35	247.19	17.95	14.65	11.74
3	247.65	247.46	247.33	17.1	13.8	11.14
4	245.04	244.88	244.69	18.84	15.95	12.6
5	247.43	247.26	247.1	17.07	14.37	11.42
6	247.55	247.39	247.28	17.15	14.12	11.98
7	246.78	246.59	246.45	17.87	14.52	11.9
8	247.23	247.04	246.88	19.22	15.67	12.71
9	247.33	247.2	247.09	16.44	13.73	11.44
10	247.63	247.51	247.37	16.76	14.87	12.38
Average	247.17	247.01	246.87	17.46	14.59	11.93

Table 7 – Dynamics of RMSE when the parameter a is changed

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
RMSE	15.73	14.21	13.22	12.42	11.96	11.72	11.63	11.61	11.61	11.63

5 RESULTS

The process of mobile robot control, which is moving along the line, is illustrated in Fig. 5. The decision of this task is made for 2 lengths: 2 meters and 2.5 meters.

There are a lot of ways to solve the task [27, 28]. A robot based on the two-wheeled platform mini Q, is applied in the experiment.

Scheme and the principle of the mobile robot operation.

Mobile robot includes the following elements: A microcontroller, based on the Arduino Uno scheme, made on ATmega328p processor with 16 MHz CPU speed with 32 Kb memory; A two-wheeled platform mini Q with a disc, 2 wheels 42x19 mm and 2 micro motors with 3–9 V; A Motor Shield card for Arduino Uno, based on L298P driver, which allows controlling two micro motors with 5–24 V voltage; Troyka Shield card connects necessary sensors to the mobile robot; Two digital line sensors. A structural scheme of the mobile robot is shown in Fig. 6.

The line sensors, which determine the colour of the surface under the mobile robot, should be used for the robot moving along the line. The output signal from the sensor is a binary signal: logical 0 or 1 depends on the colour under the mobile robot. 1 means “black”, 0 means “white”.

The use of the Troyka Shield card allows connecting to the Motor Shield. Three different signals are transmitted through the three-wire loopback: G means “ground”; V means “voltage”; S means “signal”. The Motor Shields is

used to control two wheel rotation. Its work is similar to the scheme H-bridge, for example L293d. Two pins are applied to indicate the direction of the wheel rotation. For example, if there is a signal 1:1, then the mobile robot moves straight ahead.

If the signal 1:0, then the mobile robot rotates around its axis. If the signal 0:0, then the mobile robot moves back. The other two pins are used to supply the voltage to the micro motors ranging from 0 to 5 V. The process of control is implemented with the help of pulse-wide modulation. If the pin is under 5V, then the mobile robot moves at the maximum speed. If V=0, then the mobile robot does not move. The Motor Shield card is put on the Arduino Uno.

Fuzzy system of the mobile robot control.

Input parameters for the mobile robot control are linguistic variables: power supply voltage – u (V) and robot's weight – m (gr). It is possible to use the range of values of linguistic variables. If the power voltage is within the range from 6 to 9 V (see Fig. 7, a) then a FM of the linguistic variables of the power voltage is defined as $U = [u_1] + [u_2] + [u_3]$. The weight of the mobile robot depends both on the conclusion of its sensors and a type of the voltage supply. The presented weight is within the range from 180 to 270 grams. FM of the linguistic variables of the mobile robot weight is defined as $M = [m_1] + [m_2] + [m_3]$ (see Fig. 7, b). The MF is designated as Eq. (3).

The MF of the output linguistic variable *Speed*, depends on the ADC precision. Therefore its range is occurred as $[0 \dots 255]$ (see Fig. 7, c). This variable is also defined by the sigmoidal function Eq. (3) $Speed = [s_1] + [s_2] + [s_3] + [s_4] + [s_5]$.

Hard and soft algorithms of the fuzzy logic inference should be used for calculation the variable *Speed*. A matrix should be created for the robot with a FIS applying the (Eqs. (5)–(7)) outlined in Table 8.

Defuzzification uses a method of the center of gravity to determinate the output variable *Speed* outlined in Table 9 and Table 10.

Calculation of the RMSE by the methods presented in Section 4 shows that $RMSE_{sf} = 11.93$ in modeling of the soft model of the fuzzy inference and $RMSE_{hf} = 35.59$ in modeling of the hard model of FIS. The area, which is grey (see Table 10), is an area of non-sensitivity of the mobile robot with a FIS. The output of the MISO system will be the same if the robot's weight is in the range from 180 to 190 grams. It will also influence its work. Therefore, the robot will not move if the variable *Speed* equals 0. The results are illustrated in Fig. 8 and in Table 9 and Tables 10.

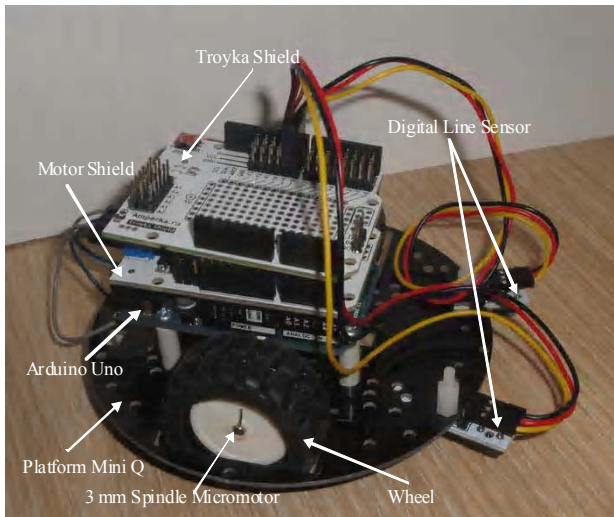


Figure 6 – Structural scheme of the mobile robot

Table 8 – Fuzzy ratio matrix

Output term	Composition			Maximum
s'_5	$b_1 = \text{soft-min}(u_1; m_1)$			b_1
s'_4	$b_2 = \text{soft-min}(u_1; m_2)$	$b_4 = \text{soft-min}(u_2; m_1)$		$\text{soft-max}(b_2, b_4)$
s'_3	$b_3 = \text{soft-min}(u_1; m_3)$	$b_5 = \text{soft-min}(u_2; m_2)$	$b_7 = \text{soft-min}(u_3; m_1)$	$\text{soft-MAX}(b_3, b_5, b_7)$
s'_2	$b_6 = \text{soft-min}(u_2; m_3)$	$b_8 = \text{soft-min}(u_3; m_2)$		$\text{soft-max}(b_6, b_8)$
s'_1	$b_9 = \text{soft-min}(u_3; m_3)$			b_9

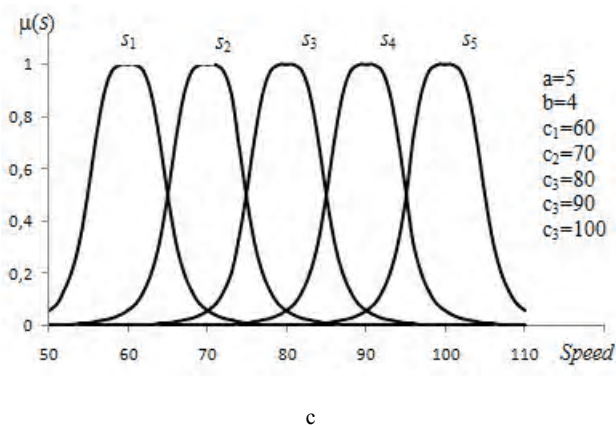
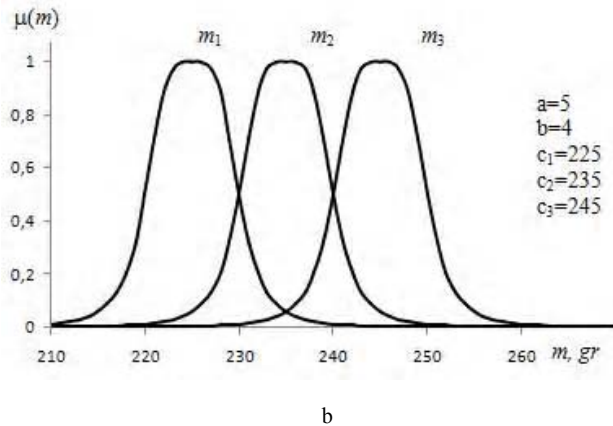
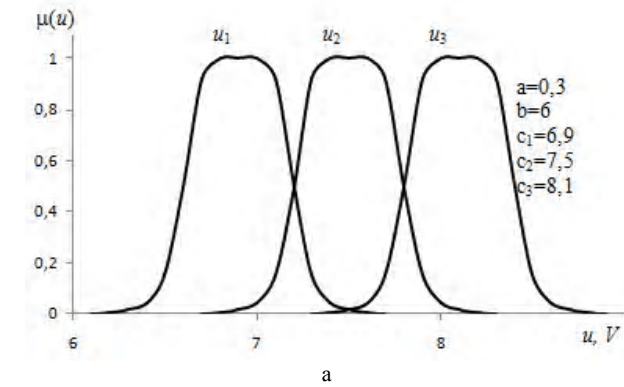


Figure 7 – Input MF: a – power supply voltage u ; b – the robot's weight m ; c – output MF $Speed$

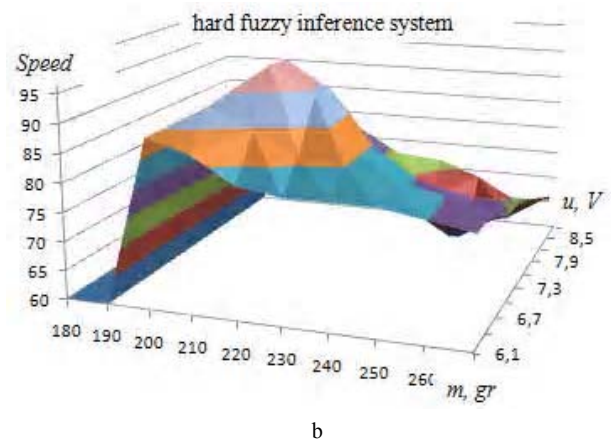
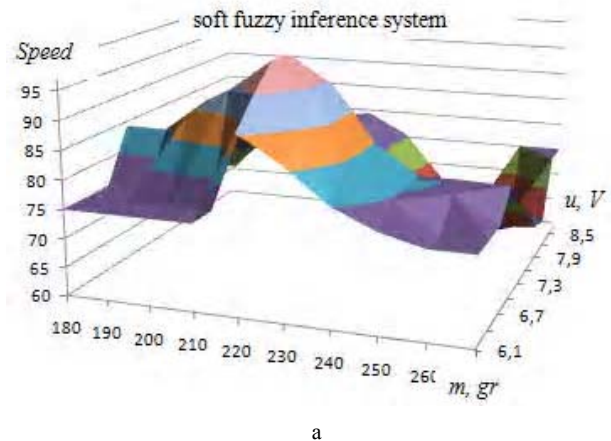


Figure 8 – Modeling: a – soft model; b – hard model

The moving time of the mobile robot along the line t (see Fig. 5) and the amount of successful robot's passes are estimated withing the experiment. The experimental data of the mobile robot when it moves along the first track (see Fig. 5, a) are given in Table 11. The experimental data of the mobile robot when it moves along the second track are given in Fig. 5, b (see Table 12).

The analysis of the experimental results (see Table 11) shows that the mobile robot has not done a move along the track in the experiment no. 1, when using the hard FIS. However, the mobile robot has successfully done all the movements along the track in the all experiments (see Table 11), when using the soft FIS.

Table 9 – Defuzzification variable $Speed$ based on the soft fuzzy inference algorithm

$m \backslash u$	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
	$Speed$									
6.1	75	75	75	75	90.36	85.89	80.14	76.85	75	75
6.4	75	75	75	75	95.15	90.49	84.11	79.68	75	75
6.7	75	75	88.9	93.71	99.17	94.53	85.09	80.28	79.6	75
7	84.2	84.2	89.89	93.29	99.06	94.49	84.79	79.86	79.84	79.56
7.3	75	75	84.51	89.31	94.5	89.8	80.02	75.13	75.14	74.45
7.6	75	75	83.23	87.58	88.72	84.2	74.29	69.34	70.87	71.26
7.9	72.76	72.76	78.4	81.19	82.11	76.93	67.23	62.88	65.12	65.86
8.2	69.88	69.88	77.52	78.91	79.68	74.85	65.22	60.58	62.39	64.69
8.5	75	75	75	79.55	79.37	74.56	65.55	60.87	61.72	75
8.8	75	75	75	75	79.37	75.53	66.9	62.37	75	75

Table 10 – Defuzzification variable *Speed* based on the hard fuzzy inference algorithm

$m \backslash u$	180	190	200	210	220	230	240	250	260	270
	<i>Speed</i>									
6.1	0	0	88.9	86.74	82.39	81.25	81.25	81.25	80.02	78.74
6.4	0	0	88.9	93.09	89.79	86.2	85.02	83.35	80.01	78.74
6.7	0	0	86	92.2	99.09	94.41	84.98	80.27	79.58	77.1
7	0	0	84.39	88.57	98.53	94.02	84.68	79.85	75.29	75
7.3	0	0	81.88	88.06	94.37	89.52	80.01	75.23	75.27	74.91
7.6	0	0	80.03	83.05	88.33	83.83	74.44	69.55	69.21	73.72
7.9	0	0	80.03	82.89	82.16	76.95	67.51	63.1	67.13	71.6
8.2	0	0	80.03	80.81	79.73	74.87	65.46	60.77	65.51	69.97
8.5	0	0	78.84	78.68	79.05	74.4	65.85	61.29	63.15	68.12
8.8	0	0	78.74	77.76	74.48	71.53	71.53	68.71	64.46	65.61

Table 11 – The robot moving along the track no. 1

Experiment no.	Hard fuzzy inference				Soft fuzzy inference			
	u, V	m, gr.	Speed	t, sec.	u, V	m, gr.	Speed	t, sec.
1	6.1	180	0	–	6.1	180	75	11.49
				–				12.46
				–				13.6
	7.5	180	0	–	7.5	180	75	6.97
				–				7.83
				–				7.94
	9	180	0	–	9	180	75	6.19
				–				5.95
2				–				6.54
	6.1	230	81	12.84	6.1	230	86	6.01
				13.81				7.54
				14.13				7.12
	7.5	230	85	5.88	7.5	230	85	5.88
				6.81				6.81
				6.64				6.64
	9	230	75	5.59	9	230	78	5.37
3				6.05				6.52
				6.47				6.07
	6.1	260	80	11.45	6.1	260	75	12.11
				13.81				13.72
				13.49				11.94
	7.5	260	71	7.53	7.5	260	71	7.14
				8.32				7.95
				8.24				8.19
	9	260	63	5.62	8.5	260	62	5.37
				6.17				6.52
				6.27				6.07

Table 12 – The robot moving along the track no. 2

Experiment no.	Hard fuzzy inference				Soft fuzzy inference			
	u, V	m, gr.		u, V	m, gr.		u, V	m, gr.
1	6.1	180	–	–	6.1	180	75	27.61
								26.15
								27.27
2	7.5	210	84	10.29	7.5	210	88	9.93
				10.85				10.45
				10.66				10.42
3	9	250	72	9.31	9	250	64	11.08
				8.81				10.35
				8.9				10.32

The result of the robot moving along the track no.2 are similar to the above mentioned result. Thus, the experiments show that the process of the mobile robot control is unstable.

Analyzing the results given in Table 12 one can conclude that if the power voltage supply of the mobile robot increases then the time of its passing the track decreases (see Fig. 9).

6 DISCUSSION

Different methods are possible to minimize RMSE. For example, ANFIS technology of finding the optimal conclusion of fuzzy rules is described in paper [24, 25, 26]. Nevertheless, the present research proves that it is possible to decrease RMSE at 30 % off if change the parameters a and b of the sigmoidal function Eq. (3). RMSE should be

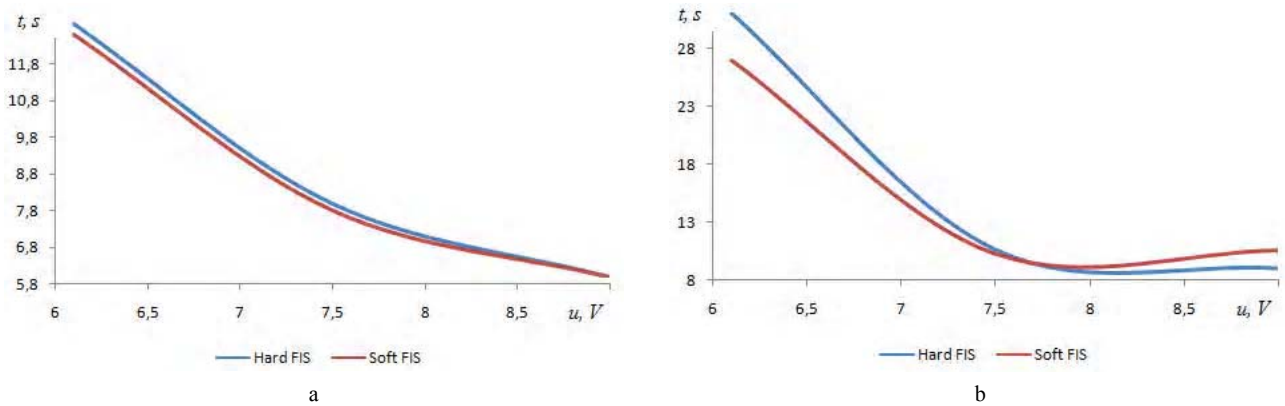


Figure 9 – Dependence of robot's decision time on the power voltage $t=f(u)$: a – track no.1; b – track no. 2

calculated for experimental values (see Table 3), if the parameters a and b of the sigmoidal function are changed (see Eq.(3)). Other parameters (see Table 3) are constant.

According to the results of the experiments, it is possible to conclude that: RMSE is 20,7 times less when using a soft fuzzy algorithm in comparison with a hard one. It is possible to minimize RMSE in 1,46 times if the parameters of the sigmoidal MF are changed. The mobile robot does not always accomplish a task if the hard FIS is used. The decision time for a track is minimized if the power voltage supply is increased. Therefore, a soft fuzzy system of decision-making is recommended to apply for a mobile robot control.

CONCLUSION

The problem of building a soft algorithm of fuzzy inference used to control a mobile robot is solved in the paper.

Scientific novelty of the results obtained in the article is that for the first time proposed soft algorithm, which in fuzzy inference to find minima and maxima uses soft arithmetic operators that provides additive of fuzzy control systems.

The practical significance of these results is that for the movement of the mobile robot along a line the specialized software based on the soft fuzzy algorithm is developed.

Prospects for further research consist in the fact that the improvement of the developed software for control of a mobile robot will allow to study given soft algorithm of fuzzy inference for a wide class tasks to control mobile robots.

REFERENCES

1. Shtovba S. D. Fuzzy classifier learning based on distance between the main competitors / S. D. Shtovba, A. V. Galushchak // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2016. – № 2. – P. 70–76. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-2-9
2. Subbotin S. A. The neuro-fuzzy network synthesis with the ranking and specific encoding of features for the diagnosis and automatic classification on precedents / S. A. Subbotin // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2016. – №1. – P. 50–57. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-6
3. Fateh M. M. A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy / M. M. Fateh, S. Fateh // *International Journal of Automation and Computing*. – 2013. – № 10. – P. 64–72. DOI:10.1007/s11633-013-0697-x
4. High dimensional neurofuzzy systems: overcoming the curse of dimensionality / [M. Brown, K. M. Bossley, D. J. Mills, C. J. Harris] // *Proceedings IEEE International Conference*. – 1995. – №4. – P. 2139–2146. DOI: 10.1109/fuzzy.1995.409976
5. METSK-HDe: A multiobjective evolutionary algorithm to learn accurate TSK-fuzzy systems in high-dimensional and large-scale regression problems / [M. J. Gactoa, M. Galendeb, R. Alcal6c, F. Herrera] // *Information Sciences*. – 2014. – Vol. 276. – P. 63–79. DOI:10.1016/j.ins.2014.02.047
6. Vernieuwea H. Comparison of clustering algorithms in the identification of Takagi–Sugeno models: A hydrological case study / H. Vernieuwea, B. De Baetsa, N. E. C. Verhoest // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2006. – Vol. 157. – P. 2876–2896. DOI:10.1016/j.fss.2006.04.007
7. Bodyanskiy Ye. V. Multilayer adaptive fuzzy probabilistic neural network in classification problems of text documents / Ye. V. Bodyanskiy, N. V. Ryabova, O. V. Zolotukhin // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2015. – № 1. – P. 39–45. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-1-5
8. Piegat A. Fuzzy modelling and control / A. Piegat – Physica-Verlag. Heidelberg, 2001. – 728 p. DOI:10.1007/978-3-7908-1824-6
9. Shin M. Reinforcement learning approach to goal-regulation in a self-evolutionary manufacturing system / M. Shin, K. Ryu, M. Jung // *Expert Systems with Applications*. – 2012. – Vol. 39. – P. 8736–8743. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.207
10. Zadeh L. A. Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems / L. A. Zadeh // *Soft Computing*. – 1998. – №2. – P. 23–25. DOI:10.1007/s005000050030
11. Bobyr M. V. Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference / M. V. Bobyr, N. A. Milostnaya // *Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii*. – 2015. – Vol. 133. – P. 7–15. DOI:10.14489/VKIT.2015.07.PP.007-015
12. Zadeh L. A. Fuzzy sets / L. A. Zadeh // *Information and Control*. – 1965. – № 8. – P. 338–353. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
13. Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility / L. A. Zadeh // *Fuzzy Sets and Systems*. – 1999. – Vol.100. – P. 9–34. doi:10.1016/S0165-0114(99)80004-9
14. Bobyr' M. V. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing / M. V. Bobyr', V. S. Titov, A. A. Nasser // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2015. – Vol. 44. – No. 7. – P. 61–69. DOI: 10.3103/S1052618815070067.
15. Stepnicka M. Implication-based models of monotone fuzzy rule bases / M. Stepnicka, B. De Baets // *Fuzzy Sets and Systems*. – 2013. – Vol. 232, № 1. – P. 134–155. DOI: 10.1016/j.fss.2013.07.019
16. Kumanan S. Application of multiple regression and adaptive neurofuzzy inference system for the prediction of surface roughness / S. Kumanan, C. P. Jesuthanam, R. Ashok Kumar //

- The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2008. – Vol. 35. – P. 778–788. DOI: 10.1007/s00170-006-0755-4
17. Forecasting and Diagnosing Cardiovascular Disease Based on Inverse Fuzzy Models / [I. V. Chernova, S. A. Sumin, M. V. Bobyr et al.] // Biomedical Engineering. – 2016. – Vol. 49. – № 5. – P. 263–267. DOI 10.1007/s10527-016-9545-y.
 18. Driankov D. An introduction to fuzzy control / D. Driankov, H. Hellendoorn, M. Reinfrank – Springer, Berlin. – 1996, 316 p. DOI:10.1007/978-3-662-03284-8
 19. Predication of concrete mix design using adaptive neural fuzzy inference systems and fuzzy inference systems / [M. Neshat, A. Adeli, G. Sepidnam, M. Sargolzaei] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 63. – P. 373–390. DOI:10.1007/s00170-012-3914-9
 20. Greenfielda S. Defuzzification of the discretised generalised type-2 fuzzy set: Experimental evaluation / S. Greenfielda, F. Chiclana // Information Sciences. – 2013. – Vol. 244. – P. 1–25. DOI:10.1016/j.ins.2013.04.032
 21. Bobyr M. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot / M. V. Bobyr, V. S. Titov, A. Belyaev // MATEC Web of Conferences. – 2016. – Vol. 79. – P. 01052 DOI:10.1051/mateconf/20167901052
 22. Palani S. On-line prediction of micro-turning multi-response variables by machine vision system using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) / S. Palani, U. Natarajan, M. Chellamalai // Machine Vision and Applications. – 2013. – Vol. 24. – P. 19–32. DOI: 10.1007/s00138-011-0378-0
 23. Deng X. Incremental learning of dynamic fuzzy neural networks for accurate system modeling / X. Deng, X. Wang // Fuzzy Set and System. – 2009. – Vol. 60. – P. 972–987. DOI:10.1016/j.fss.2008.09.005
 24. Banakara A. Parameter identification of TSK neuro-fuzzy models / A. Banakara, M. F. Azeem // Fuzzy Sets and Systems. – 2011. – Vol. 179. – P. 62–82. DOI: 10.1016/j.fss.2011.05.003
 25. Bobyr M. V. Effect of conclusion rule on training of fuzzy-logic systems / M. V. Bobyr // Vestnik komp'uternykh i informatsionnykh tekhnologii. – 2014. – Vol.125. – P. 28–35. DOI: 10.14489/vkit.2014.11.pp.028-035
 26. Predictive control of drying process using an adaptive neuro-fuzzy and partial least squares approach / [A. Azadeh, N. Neshat, A. Kazemi, M. Saberi] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2012. – Vol. 58. – P. 585–596. DOI: 10.1007/s00170-011-3415-2
 27. Robot navigation in very cluttered environments by preference-based fuzzy behaviors / [M. F. Selekw, D. D. Dunlap, D. Shi, E. G. Collins Jr.] // Robotics and Autonomous Systems. – 2008. – Vol. 56. – P. 231–246. DOI:10.1016/j.robot.2007.07.006
 28. Mo H. Behavior-Based Fuzzy Control for Mobile Robot Navigation / H. Mo, Q. Tang, L. Meng // Mathematical Problems in Engineering. – 2013. – 10 p. DOI: 10.1155/2013/561451

Article was submitted 28.02.2017.
After revision 20.03.2017.

Бобырь М. В.¹, Милостная Н. А.²

¹Д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры вычислительная техника, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

²Канд. техн. наук, преподаватель кафедры вычислительная техника, Юго-Западный государственный университет, Курск, Россия

МЯГКИЙ НЕЧЕТКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

Актуальность. Решена задача управления мобильным роботом на основе мягкого алгоритма нечетко-логического вывода.

Цель работы – создание мягкого алгоритма нечетко-логического вывода, позволяющего обеспечить аддитивность нечеткой системы управления.

Метод. Предложен мягкий алгоритм нечетко-логического вывода, использующийся для управления мобильным роботом. Данный алгоритм позволяет компенсировать ошибки присущие традиционным моделям нечеткого вывода. К ошибкам относятся: проклятие размерности, отсутствия аддитивности и условия разбиения единицы. Данный мягкий алгоритм нечеткого вывода, за счет рационального размещения предпосылок и заключений в матрице нечетких отношений, позволяет сократить число операций необходимых для реализации нечеткого вывода. Другая отличительная особенность предложенного мягкого алгоритма заключается в том, что для нахождения в нечетком выводе минимумов и максимумов используются мягкие арифметические операторы. В статье показано, что при использовании жестких формул для реализации этих же формул в процессе управления мобильным роботом будут возникать ситуации в которых робот потеряет управляемость. В статье указано, что реализация возможности в мягком алгоритме нечеткого вывода опции изменения параметров сигмоидальных функций принадлежности, позволит минимизировать погрешности на его выходе. Об этом свидетельствует динамика изменения коэффициента RMSE от варьирования параметров сигмоидальной функции. Дополнительное имитационное моделирование представленное в статье показывает, что при варьировании коэффициентов сигмоидальной функции принадлежности, в частности при увеличении параметра α наблюдается уменьшение значения RMSE. Эффективность предложенного мягкого алгоритма подтверждают представленное в статье численное моделирование и эксперименты исследования перемещения мобильного робота вдоль линии.

Результаты. Разработано специализированное программное обеспечение для микроконтроллера Arduino Uno, реализующее предложенный алгоритм, и позволяющее осуществить экспериментальное исследование его свойств.

Выводы. Проведенные численные и экспериментальные исследования подтвердили работоспособность предложенного мягкого алгоритма и реализующего его программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для управления мобильными роботами.

Ключевые слова: нечеткая система вывода, нечеткие множества; RMSE; мягкие вычисления; мобильный робот.

Бобырь М. В.¹, Милостная Н. А.²

¹Д-р техн. наук, доцент, професор кафедры обчислювальної техніки, Південно-Західний державний університет, Курськ, Росія

²Канд. техн. наук, викладач кафедри обчислювальної техніки, Південно-Західний державний університет, Курськ, Росія

МЯГКИЙ НЕЧЕТКО АЛГОРИТМ ДЛЯ УПРАВЛІННЯ МОБІЛЬНИМ РОБОТОМ

Актуальність. Вирішено завдання управління мобільним роботом на основі м'якого алгоритму нечітко-логічного виводу.

Мета роботи – створення м'якого алгоритму нечітко-логічного виводу, що дозволяє забезпечити аддитивність нечіткої системи управління.

Метод. Запропонований м'який алгоритм нечітко-логічного виводу, що використовується для управління мобільним роботом. Даний алгоритм дозволяє компенсувати помилки властиві традиційним моделям нечіткого виводу. До помилок відносяться: прокляття розмірності, відсутність аддитивності і умови розбиття одиниці. Даний алгоритм за рахунок раціонального розміщення передумов і висновків в матриці нечітких стосунків, дозволяє скоротити, число операцій необхідних для реалізації нечіткого виводу. Інша відмітна особливість запропонованого м'якого алгоритму полягає в тому, що для знаходження в нечіткому виводі мінімумів і максимумів використовуються м'які арифметичні оператори. У статті показано, що при використанні жорстких формул для реалізації цих же

формул в процесі управління мобільним роботом виникатимуть ситуації в яких робот втратить керованість. Також в статті показано, що реалізація можливості в м'якому алгоритмі нечіткого виведення опції зміна параметрів сигмодальних функцій приналежностей, дозволить мінімізувати погрешності на його виході. Про це свідчить динаміка зміни коефіцієнта RMSE від варіювання параметрів сигмодальної функції. Додаткове імітаційне моделювання представлено в статті показує, що при варіюванні коефіцієнтів сигмодальної функції приналежності, зокрема при збільшенні параметра a спостерігається зменшення значення коефіцієнта RMSE. Ефективність запропонованого м'якого алгоритму підтверджують представлене в статті чисельне моделювання і експерименти дослідження переміщення мобільного робота вздовж лінії.

Результати. Розроблено спеціалізоване програмне забезпечення для мікроконтролера Arduino Uno, що реалізовує запропонований алгоритм, і що дозволяє здійснити експериментальне дослідження його властивостей.

Висновки. Проведені чисельні і експериментальні дослідження підтвердили працездатність запропонованого м'якого алгоритму і реалізованого програмного забезпечення, а також дозволяють рекомендувати їх для вживання на практиці для управління мобільними роботами.

Ключові слова: нечітка система виведення, нечіткі множини; RMSE; м'які обчислення; мобільний робот.

REFERENCES

- Shtovba S. D., Galushchak A. V. Fuzzy classifier learning based on distance between the main competitors, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 2, pp. 70–76. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-2-9
- Subbotin S. A. The neuro-fuzzy network synthesis with the ranking and specific encoding of features for the diagnosis and automatic classification on precedents, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 1, pp. 50–57. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-6
- Fateh M. M., Fateh S. A precise robust fuzzy control of robots using voltage control strategy, *International Journal of Automation and Computing*, 2013, No. 10, pp. 64–72. DOI:10.1007/s11633-013-0697-x
- Brown M., Bossley K. M., Mills D. J., Harris C. J. High dimensional neurofuzzy systems: overcoming the curse of dimensionality, *Proceedings IEEE International Conference*, 1995, No. 4, pp. 2139–2146. DOI: 10.1109/fuzzy.1995.409976
- Gactoa M. J., Galende M., Alcalá R., Herrera F. METSK-HDe: A multiobjective evolutionary algorithm to learn accurate TSK-fuzzy systems in high-dimensional and large-scale regression problems, *Information Sciences*, 2014, Vol. 276, pp. 63–79. DOI:10.1016/j.ins.2014.02.047
- Vernieuwe H., De Baets B., Verhoest N.E.C. Comparison of clustering algorithms in the identification of Takagi-Sugeno models: A hydrological case study, *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, Vol. 157, pp. 2876–2896. DOI:10.1016/j.fss.2006.04.007
- Bodyanskiy Ye. V., Ryabova N. V., Zolotukhin O. V. Multilayer adaptive fuzzy probabilistic neural network in classification problems of text documents, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, No. 1, pp. 39–45. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-1-5
- Piegat A. Fuzzy modelling and control. Physica-Verlag, Heidelberg, 2001, 728 p. DOI:10.1007/978-3-7908-1824-6
- Shin M., Ryu K., Jung M. Reinforcement learning approach to goal-regulation in a self-evolutionary manufacturing system, *Expert Systems with Applications*, 2012, Vol.39, pp. 8736–8743. DOI: 10.1016/j.eswa.2012.01.207
- Zadeh L. A. Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems, *Soft Computing*, 1998, No. 2, pp. 23–25. DOI:10.1007/s005000050030
- Bobyry M. V., Milostnaya N. A. Analysis of the use of soft arithmetic operations in the structure of fuzzy logic inference, *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2015, Vol. 133, pp. 7–15. DOI:10.14489/VKIT.2015.07.PP.007-015
- Zadeh L. A. Fuzzy sets, *Information and Control*, 1965, No. 8, pp. 338–353. DOI:10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- Zadeh L. A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility, *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, Vol.100, pp. 9–34. DOI: 10.1016/S0165-0114(99)80004-9
- Bobyry M. V., Titov V. S., Nasser A. A. Automation of the cutting-speed control process based on soft fuzzy logic computing, *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, Vol. 44, No.7, pp. 61–69. DOI: 10.3103/S1052618815070067.
- Stepnicka M., De Baets B. Implication-based models of monotone fuzzy rule bases, *Fuzzy Sets and Systems*, 2013, Vol. 232, No.1, pp. 134–155. DOI: 10.1016/j.fss.2013.07.019
- Kumanan S., Jesuthanam C. P., Ashok R. Kumar Application of multiple regression and adaptive neurofuzzy inference system for the prediction of surface roughness, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2008, Vol. 35, pp. 778–788. DOI: 10.1007/s00170-006-0755-4
- Chernova I. V., Sumin S. A., Bobyr M. V., Seregin S. P. Forecasting and Diagnosing Cardiovascular Disease Based on Inverse Fuzzy Models, *Biomedical Engineering*, 2016, Vol. 49, No. 5, pp. 263–267. DOI 10.1007/s10527-016-9545-y.
- Driankov D., Hellendoorn H., Reinfrank M. An introduction to fuzzy control. Springer, Berlin, 1996, 316 p. DOI:10.1007/978-3-662-03284-8
- Neshat M., Adeli A., Sepidnam G., Sargolzaei M. Predication of concrete mix design using adaptive neural fuzzy inference systems and fuzzy inference systems, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, Vol.63, pp. 373–390. DOI:10.1007/s00170-012-3914-9
- Greenfield S., Chiclana F. Defuzzification of the discretised generalised type-2 fuzzy set: Experimental evaluation, *Information Sciences*, 2013, Vol. 244, pp. 1–25. DOI:10.1016/j.ins.2013.04.032
- Bobyry M., Titov V. S., Belyaev A. Fuzzy System of Distribution of Braking Forces on the Engines of a Mobile Robot, *MATEC Web of Conferences*, 2016, Vol.79, pp. 01052 DOI:10.1051/mateconf/20167901052
- Palani S., Natarajan U., Chellamalai M. On-line prediction of micro-turning multi-response variables by machine vision system using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), *Machine Vision and Applications*, 2013, Vol.24, pp. 19–32. DOI: 10.1007/s00138-011-0378-0
- Deng X., Wang X. Incremental learning of dynamic fuzzy neural networks for accurate system modeling, *Fuzzy Set and System*, 2009, Vol. 60, pp. 972–987. DOI:10.1016/j.fss.2008.09.005
- Banakara A., Azeem M. F. Parameter identification of TSK neuro-fuzzy models, *Fuzzy Sets and Systems*, 2011, Vol. 179, pp. 62–82. DOI: 10.1016/j.fss.2011.05.003
- Bobyry M. V. Effect of conclusion rule on training of fuzzy-logic systems, *Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologii*, 2014, Vol. 125, pp. 28–35. DOI: 10.14489/vkit.2014.11.pp.028-035
- Azadeh A., Neshat N., Kazemi A., Saberi M. // Predictive control of drying process using an adaptive neuro-fuzzy and partial least squares approach, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, Vol.58, pp. 585–596. DOI: 10.1007/s00170-011-3415-2
- Selekwa M. F., Dunlap D. D., Shi D., Collins Jr. E. G. Robot navigation in very cluttered environments by preference-based fuzzy behaviors, *Robotics and Autonomous Systems*, 2008, Vol. 56, pp. 231–246. DOI:10.1016/j.robot.2007.07.006
- Mo H., Tang Q., Meng L. Behavior-Based Fuzzy Control for Mobile Robot Navigation, *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 10 p. DOI: 10.1155/2013/561451

Гусєва Ю. Ю.¹, Мартиненко О. С.², Кадикова І. М.³, Чумаченко І. В.⁴

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

²Аспірант кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

³Канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

⁴Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри управління проектами в міському господарстві і будівництві, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, Харків, Україна

МЕТРИКИ ПРОЦЕСІВ УПРАВЛІННЯ ТА КОНТРОЛЮ ВИМОГ У ПРОЕКТАХ

Актуальність. Процеси управління вимогами є одним з ключових чинників успіху або невдачі проекту. Дослідження у галузі проектного менеджменту вказують, що саме ці процеси є недостатньо формалізованими. Отже, є необхідність розробки та формалізації методів управління і контролю вимог, зокрема, для проектів, управління яких здійснюється за традиційними або комбінованими методологіями.

Мета роботи – формалізація метрик процесів управління вимогами у проектах. Об'єктом дослідження є процеси управління та контролю вимог у проектах, предметом дослідження – метрики, які характеризують вимоги у проекті.

Метод. Використано методи аналізу та синтезу, методи нечітких множин та операції над матрицями. Запропоновано використання моделі, яка встановлює зв'язки між окремими характеристиками проекту (ризиків, роботи, ресурси, вимоги, стейкхолдери та відповідальні особи проекту) за допомогою ієрархічної структури робіт. Запропоновано формалізацію метрик моделі, що дозволить відстежувати динаміку виконання проекту та ідентифікувати зацікавлені сторони проекту за визначеними напрямками.

Результати. На основі співставлення ієрархічної структури робіт з ієрархічними структурами вимог, ризиків, ресурсів та організаційною структурою проекту розроблено метод формалізації метрик управління вимогами проекту. Запропонований метод дозволяє відстежувати виконання вимог зацікавлених сторін проекту у часі у відповідності до обсягу фактично витрачених ресурсів по аналогії з методом освоєного обсягу. Адаптивність методу до традиційних процесів менеджменту проектів дає змогу використовувати вихідні дані – вже сформовані активи проекту та стандартне програмне забезпечення (зокрема, MS Project, Open-Proj) для практичної реалізації методу.

Висновки. Запропонований метод формалізує процеси управління вимогами у проекті, дозволяє визначати ресурсне та ризикове навантаження вимог, що доповнює існуючі моделі класифікації вимог даними метриками. Метод формалізації метрик управління вимогами проекту дозволяє також отримати інструменти для оцінювання ефективності команди проекту та класифікації зацікавлених сторін проекту. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його використання на практиці при прийнятті проектних рішень щодо управління змінами та вимогами стейкхолдерів проекту. Перспективи подальших досліджень можуть полягати у розробці програмного забезпечення, що реалізує запропонований метод.

Ключові слова: управління вимогами, проект, метрика, ресурси, стейкхолдери, ризики.

НОМЕНКЛАТУРА

PMI – Project Management Institute;

WBS – Work Breakdown Structure (ієрархічна структура робіт проекту);

F – функція, що описує взаємозв'язок між двома елементами моделі у чіткій формі;

$M_{i,i-1}$ – матриця взаємозв'язків робіт рівнів i та $i-1$ ієрархічної структури робіт проекту;

$Recourse_i$ – матриця розподілу ресурсів за i -м рівнем ієрархічної структури робіт проекту;

$recourse_k$ – k -й ресурс проекту;

$R(resource)BS$ – ієрархічна структура ресурсів проекту;

$Requirement_i$ – матриця розподілу вимог за i -м рівнем ієрархічної структури робіт проекту;

$requirement_l$ – l -та вимога проекту;

$R(requirement)BS$ – ієрархічна структура вимог проекту;

$Responsibility_i$ – матриця розподілу відповідальних осіб за i -м рівнем ієрархічної структури робіт проекту;

$responsibility_z$ – z -та відповідальна особа проекту;

$R(responsibility)BS$ – організаційна структура проекту;

$Risk_i$ – матриця розподілу ризиків за i -м рівнем ієрархічної структури робіт проекту;

$risk_v$ – v -й ризик проекту;

$R(isk)BS$ – ієрархічна структура ризиків проекту;

$RRec$ – матриця взаємозв'язку вимог і ресурсів, необхідних для їх виконання;

$RRes$ – матриця взаємозв'язку вимог і осіб, відповідальних за їх виконання;

$RRis$ – матриця взаємозв'язку вимог і ризиків, що виникають при їх виконанні;

S – матриця розподілу вимог між стейкхолдерами проекту;

$stakeholder_u$ – u -й стейкхолдер проекту;

$w_{i,j}$ – j -та робота i -го рівня ієрархічної структури робіт проекту;

Φ – функція, що описує взаємозв'язок між двома елементами моделі у нечіткій формі.

ВСТУП

Управління вимогами на сьогодні є одним з ключових процесів для досягнення успішних результатів проектів та програм. Дослідження у галузі проектного уп-

равління Project Management Institute [1, 2] за останні роки вказують, що проблеми у роботі з вимогами посідають друге-третє місце серед чинників, які викликають провали проєктів. Доля респондентів, яка вказує саме таку причину невдачі проєкту стабільно складає 37-38%. До того ж відповідно [3] лише 49% респондентів відокремлюють ресурси для здійснення процесів управління вимогами у проєкті, а 47% – не здатні формалізувати процеси для об'єктивної валідації вимог. Отже, є необхідність у створенні методичного забезпечення процесів управління вимогами у проєктах і програмах.

У роботах [4, 5] пропонується використовувати співставлення ієрархічної структури робіт проєкту з наступними ієрархічними структурами:

- *R(requirement)BS* – ієрархічна структура вимог проєкту;
- *R(risk)BS* – ієрархічна структура ризиків проєкту;
- *R(resource)BS* – ієрархічна структура ресурсів проєкту;
- *R(responsibility)BS* – організаційна структура проєкту.

Таким чином, встановлюються відповідності «робота-вимога», «робота-ресурс», «робота-відповідальний», «робота-ризик» («work-requirement», «work-resource», «work-responsibility», «work-risk»). Графічно модель взаємозв'язків між елементами ієрархічних структур проєкту можна представити у вигляді кубу, гранями якого є ризики, роботи, ресурси, вимоги, стейкхолдери та відповідальні особи проєкту (risk, resource, requirement, responsibility, work, stakeholders – 4R & WS).

Метою даної статті є формалізація метрик процесів управління вимогами у проєктах. Об'єктом дослідження є процеси управління та контролю вимог у проєктах і програмах, предметом дослідження – метрики, які характеризують вимоги у проєкті.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Вхідними даними для аналізу є ієрархічна структура робіт проєкту. В ході дослідження вона доповнюється інформацією щодо розподілу ресурсів та відповідальних осіб за окремими роботами (ці зв'язки наявні при плануванні проєкту в чіткому виді), та даними щодо розподілення вимог та ризиків за роботами проєкту (дані такого роду зазвичай відсутні у чіткій формі, тому пропонується моделювати відповідні зв'язки за допомогою методів нечітких множин).

При формуванні вихідних даних необхідно враховувати існування різних типів вимог у проєкті: взаємовиключних (дві або більше вимог, які не можуть бути виконані одночасно в проєкті); підтримуючих (виконання однієї вимоги сприяє виконанню іншої); незалежних (виконання однієї вимоги не впливає на виконання іншої); обов'язкових (вимог, які повинні бути виконаними, наприклад, у відповідності до чинного законодавства) [6].

Результатом розробки методу буде встановлення формальних зв'язків між окремими елементами моделі 4R & WS. Зокрема, використання методу надасть змогу визначити ресурсо- та ризиконавантаженість певної вимоги, що, в свою чергу, забезпечить відповідними метриками процеси управління та контролю вимог у проєкті.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз і управління вимогами у проєктах здійснюється дослідниками за трьома основними напрямками:

– у межах бізнес-аналізу. Так, BABOK (A Guide To The Business Analysis Body Of Knowledge, [7]) має дві окремі галузі знань, які описують задачі управління вимогами: Requirements Life Cycle Management та Requirements Analysis and Design Definition.

– у межах традиційного проєктного менеджменту. Одним з найпоширеніших стандартів проєктного менеджменту є A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – стандарт, виданий PMI. У 2013 р. у п'ятому виданні цього стандарту [8] з'явилась нова галузь знань – управління зацікавленими сторонами проєкту, де, зокрема, розглядаються і питання аналізу вимог. З 2014 р. за результатами видання стандарту Business Analysis for Practitioners: A practice Guide [9] PMI стандартизує термін «бізнес-аналіз» як критичну компетенцію проєктного управління і з цього часу розглядає «управління вимогами» як компоненту бізнес аналізу. У 2016 р. PMI видає окремий стандарт з управління вимогами – Requirements Management: A Practice Guide [3], який розглядається як елемент, що пов'язує [8] і [9].

– у сфері інформаційних технологій. На цей час більшість досліджень, які присвячено питанням аналізу вимог (Requirements Engineering), стосуються розробки програмного забезпечення та інформаційних систем. Requirements Engineering описує процеси визначення, документування та виконання вимог і є складовою частиною системної та комп'ютерної інженерії. На цей час окрім «нишевих» методів аналізу та управління вимогами [10] існує стандарт, який пов'язує гнучкі методології розробки програмного забезпечення і методи бізнес-аналізу – Agile Extension to the BABOK Guide [11].

Слід зазначити, що, хоча стандарти [3, 7–9, 11] сформовані на основі «кращих практик», вони містять лише рекомендації щодо використання певних методів роботи з вимогами, без докладного опису методів та вказівок щодо їх адаптації до тієї або іншої галузі. При цьому значна частина методів є спільними для усіх стандартів, наприклад, це аналіз беклогу, використання функціонального моделювання, пріоритезація вимог, використання UML, тощо. Щодо практичного їх впровадження, більшість відповідних досліджень існує в сфері ІТ: визначення пріоритетів за допомогою методу MoSCoW та time-boxing [12], Quality Analyzer of Requirements Specification, Vienna development method (VDM) [13], Z notation [14].

У той же час у галузі традиційного проєктного менеджменту дослідники переважно приділяють увагу питанням управління стейкхолдерами проєктів, а не їх вимогами: відокремлюються такі не вирішені завдання, як відсутність сформульованого переліку факторів визначення якості управління стейкхолдерами; необхідність подальшого розвитку стандартів стейкхолдер-менеджменту; нестача практичних підходів до управління; відсутність аналізу зв'язку між діями з управління стейкхолдерами та успішністю проєкту [15]; обґрунтовується актуальність створення механізмів багатомірного аналізу стейкхолдерів. Наявні праці мають описи алгоритму аналізу, але не містять математичного підґрунтя для його

проведення [16]; приділяється увага створенню програмного забезпечення для проведення стейкхолдер-аналізу. Наявні розробки засновані на використанні існуючих методів аналізу стейкхолдерів, отже, наслідують їх недоліки, зокрема, використання невеликої кількості факторів для аналізу, використання експертного оцінювання без процедури його верифікації [17]. Вітчизняні вчені, які займаються питаннями класифікації стейкхолдерів приділяють увагу переважно економічним, а не управлінським аспектам [18]. Однак необхідно зазначити, що питання управління зацікавленими сторонами проектів вже розглядається як стратегічне завдання [19], що корелює з позицією PMI.

Отже, є об'єктивна необхідність у розробці та формалізації методів управління і контролю вимог у проектах поза межами IT-галузі, зокрема, для проектів, управління яких здійснюється за традиційними або комбінованими методологіями.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Зв'язки між роботами різних рівнів WBS можуть бути представлені у вигляді матриці (1), елементи якої вказу-

ють на наявність або відсутність зв'язку між роботами i -го та $(i-1)$ -го рівнів: $F=1$, якщо зв'язок є, і $F=0$ за відсутністю зв'язку:

$$M_{i,i-1} = \begin{matrix} & w_{i-1,1} & w_{i-1,2} & \dots & w_{i-1,m} \\ \begin{matrix} w_{i,1} \\ F(w_{i,1}, w_{i-1,1}) \\ F(w_{i,2}, w_{i-1,1}) \\ \dots \\ F(w_{i,n}, w_{i-1,1}) \end{matrix} & \begin{matrix} F(w_{i,1}, w_{i-1,2}) \\ F(w_{i,2}, w_{i-1,2}) \\ \dots \\ F(w_{i,n}, w_{i-1,2}) \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} F(w_{i,1}, w_{i-1,m}) \\ F(w_{i,2}, w_{i-1,m}) \\ \dots \\ F(w_{i,n}, w_{i-1,m}) \end{matrix} \end{matrix} \quad (1)$$

У свою чергу, кожна з елементарних робіт проекту може бути асоційована з певним ресурсним навантаженням, вимогами стейкхолдерів, виконання яких підтримує дана робота, відповідальними виконавцями та ризиками, які пов'язані з роботою [4]. Ці зв'язки також можуть бути задані у матричній формі:

– взаємозв'язок ресурсів та робіт i -го рівня. Кожен з елементів матриці визначається як доля від загального обсягу певного ресурсу, що використовується при виконанні роботи,

$$Recourse_i = \begin{matrix} & w_{i,1} & w_{i,2} & \dots & w_{i,n} \\ \begin{matrix} recourse_1 \\ F(recourse_1, w_{i,1}) \\ F(recourse_2, w_{i,1}) \\ \dots \\ F(recourse_k, w_{i,1}) \end{matrix} & \begin{matrix} F(recourse_1, w_{i,2}) \\ F(recourse_2, w_{i,2}) \\ \dots \\ F(recourse_k, w_{i,2}) \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} F(recourse_1, w_{i,n}) \\ F(recourse_2, w_{i,n}) \\ \dots \\ F(recourse_k, w_{i,n}) \end{matrix} \end{matrix} \quad (2)$$

– взаємозв'язок відповідальних осіб та робіт i -го рівня. Елемент матриці дорівнює 1, якщо певна особа відповідає за виконання роботи, або 0 у іншому випадку,

$$Responsibility_i = \begin{matrix} & w_{i,1} & \dots & w_{i,n} \\ \begin{matrix} responsibility_1 \\ F(responsibility_1, w_{i,1}) \\ F(responsibility_2, w_{i,1}) \\ \dots \\ F(responsibility_z, w_{i,1}) \end{matrix} & \begin{matrix} F(responsibility_1, w_{i,2}) \\ F(responsibility_2, w_{i,2}) \\ \dots \\ F(responsibility_z, w_{i,2}) \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} F(responsibility_1, w_{i,n}) \\ F(responsibility_2, w_{i,n}) \\ \dots \\ F(responsibility_z, w_{i,n}) \end{matrix} \end{matrix} \quad (3)$$

– взаємозв'язок вимог стейкхолдерів проекту та робіт i -го рівня. Цей зв'язок може бути заданий у нечіткій формі. Нехай $\Phi(requirement_l, w_{i,j}) : requirement_l \times w_{i,j} \rightarrow [0;1]$ є функція приналежності нечіткого бінарного відношення (4). Для всіх $requirement_l \in requirement$ та $w_{i,j} \in w_i$ функція $\Phi(requirement_l, w_{i,j})$ – це ступінь, у якому виконання j -ї роботи i -го рівня зумовлює виконання вимоги l . Відношення можна представити у матричній формі

$$Requirement_i = \begin{matrix} & w_{i,1} & \dots & w_{i,n} \\ \begin{matrix} requirement_1 \\ \Phi(requirement_1, w_{i,1}) \\ \Phi(requirement_2, w_{i,1}) \\ \dots \\ \Phi(requirement_l, w_{i,1}) \end{matrix} & \begin{matrix} \Phi(requirement_1, w_{i,2}) \\ \Phi(requirement_2, w_{i,2}) \\ \dots \\ \Phi(requirement_l, w_{i,2}) \end{matrix} & \dots & \begin{matrix} \Phi(requirement_1, w_{i,n}) \\ \Phi(requirement_2, w_{i,n}) \\ \dots \\ \Phi(requirement_l, w_{i,n}) \end{matrix} \end{matrix} \quad (4)$$

– взаємозв'язок ризиків проекту та робіт i -го рівня. Цей зв'язок може бути заданий у нечіткій формі. Нехай $\Phi(risk_v, w_{i,j}) : risk_v \times w_{i,j} \rightarrow [0;1]$ є функція приналежності нечіткого бінарного відношення (4). Для всіх $risk_v \in risk$ та $w_{i,j} \in w_i$ функція $\Phi(risk_v, w_{i,j})$ – це ступінь, у якому виконання j -ї роботи i -го рівня зумовлює виникнення ризику v . Відношення можна представити у матричній формі

	$w_{i,1}$	$w_{i,2}$	...	$w_{i,n}$
$risk_1$	$\Phi(risk_1, w_{i,1})$	$\Phi(risk_1, w_{i,2})$	...	$\Phi(risk_1, w_{i,n})$
$Risk_i = risk_2$	$\Phi(risk_2, w_{i,1})$	$\Phi(risk_2, w_{i,2})$	...	$\Phi(risk_2, w_{i,n})$
...	...	...	...	...
$risk_v$	$\Phi(risk_v, w_{i,1})$	$\Phi(risk_v, w_{i,2})$	...	$\Phi(risk_v, w_{i,n})$

(5)

Також можна встановити зв'язок між стейкхолдерами проекту та їх певними вимогами:

	$requirement_1$	...	$requirement_l$
$stakeholder_1$	$F(stakeholder_1, requirement_1)$	...	$F(stakeholder_1, requirement_l)$
$S = stakeholder_2$	$F(stakeholder_2, requirement_1)$	...	$F(stakeholder_2, requirement_l)$
...	...	...	...
$stakeholder_u$	$F(stakeholder_u, requirement_1)$	...	$F(stakeholder_u, requirement_l)$

(6)

Елемент матриці визначає наявність або відсутність зв'язку між l -ю вимогою та u -м стейкхолдером – $F(stakeholder_u, requirement_l) = 1$, якщо зв'язок є, і $F(stakeholder_u, requirement_l) = 0$ за відсутністю зв'язку.

Використовуючи формули (1–5), отримуємо розподіл характеристик (елементів моделі), що вивчаються, за $(i-1)$ -м рівнем робіт:

$$\text{– ресурсів: } Recourse_{i-1} = M_{i,i-1} \cdot Recourse_i; \quad (7)$$

$$\text{– відповідальності: } Responsibility_{i-1} = M_{i,i-1} \cdot Responsibility_i; \quad (8)$$

$$\text{– вимог: } Requirement_{i-1} = M_{i,i-1} \cdot Requirement_i; \quad (9)$$

$$\text{– ризиків: } Risk_{i-1} = M_{i,i-1} \cdot Risk_i. \quad (10)$$

Це надасть змогу встановити зв'язки між окремими характеристиками. Наприклад, формули (10–12) пов'язують вимоги стейкхолдерів з ресурсами, необхідними для їх виконання, відповідальними особами та ризиками, які можуть виникнути при виконання вимог:

$$RRec = Requirement_{i-1}^T \cdot Recourse_{i-1}, \quad (11)$$

$$RRes = Requirement_{i-1}^T \cdot Responsibility_{i-1}, \quad (12)$$

$$RRis = Requirement_{i-1}^T \cdot Risk_{i-1}. \quad (13)$$

Надалі, використовуючи інформацію щодо стейкхолдерів та їх вимог (6), можна співвіднести ресурсне і ризикове навантаження окремих вимог зі стейкхолдерами, які їх висувають, що надасть змогу класифікувати зацікавлені сторони проекту за цими характеристиками.

Отже, для використання запропонованого методу формалізації метрик управління вимогами проекту необхідно виконати наступне:

1. Обрати рівень ієрархічної структури робіт проекту, для якого слід отримати інформацію щодо ресурсного та ризикового навантаження вимог. На основі WBS проекту побудувати матриці $M_{i,i-1}$, які зв'язують елементарні роботи проекту з сумарними роботами обраного рівня.

2. Сформувати матриці $Recourse_i$, $Requirement_i$, $Responsibility_i$ та $Risk_i$ для рівня WBS, який відповідає елементарним роботам проекту.

3. Послідовно використовуючи формули (7–10) отримати розподіл характеристик, що вивчаються, за досліджуваним рівнем робіт.

4. За формулами (11–13) отримати матриці (вектори), які пов'язують вимоги стейкхолдерів з ресурсами, необхідними для їх виконання, відповідальними особами та ризиками, які можуть виникнути при виконання вимог.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо умовний проект, ієрархічну структуру робіт якого представлено на рис. 1.

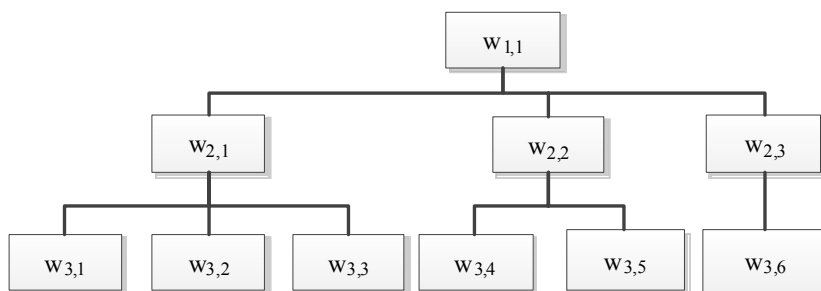


Рисунок 1 – WBS умовного проекту

Припустимо, що в проекті використовується три типи ресурсів ($resource_1$, $resource_2$, $resource_3$), які розподілено між елементарними роботами (третього рівня) наступним чином:

$$Resource_3 = \begin{pmatrix} 0,2 & 0,05 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,4 \\ 0,1 & 0,55 & 0 \\ 0,2 & 0 & 0,1 \\ 0 & 0,4 & 0,2 \\ 0 & 0,05 & 0,3 \end{pmatrix};$$

і проект реалізує дві вимоги стейкхолдерів ($requirement_1$, $requirement_2$), виконання яких розподілено між елементарними роботами проекту так:

$$Requirement_3 = \begin{pmatrix} 0 & 0,3 \\ 0,5 & 0 \\ 0 & 0,6 \\ 0,25 & 0 \\ 0,25 & 0 \\ 0 & 0,1 \end{pmatrix}.$$

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Зв'язки між роботами третього та другого рівня проекту описує матриця M_{32} :

$$M_{32} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

В свою чергу, зв'язки між другим та першим рівнем робіт проекту задає вектор M_{21} : $M_{21} = [1 \ 1 \ 1]$.

Аналіз проекту проводимо для другого рівня WBS: розподіл ресурсів для другого рівня робіт:

$$Resource_2 = M_{32} \cdot Resource_3 = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} 0,2 & 0,05 & 0 \\ 0,5 & 0 & 0,4 \\ 0,1 & 0,55 & 0 \\ 0,2 & 0 & 0,1 \\ 0 & 0,4 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0,3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,8 & 0,6 & 0,4 \\ 0,2 & 0,4 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0,3 \end{pmatrix};$$

– співвідношення вимог стейкхолдерів і ресурсів для другого рівня робіт:

$$RReR = Requirement_3^T \cdot Resource_3 = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0 \\ 0,9 & 0 & 0,1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} 0,8 & 0,6 & 0,4 \\ 0,2 & 0,4 & 0,3 \\ 0 & 0 & 0,3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 & 0,5 & 0,35 \\ 0,72 & 0,54 & 0,39 \end{pmatrix}.$$

Таким чином, визначається ресурсне навантаження певної вимоги: перша вимога споживає 0,5 першого ресурсу; 0,5 другого ресурсу і 0,35 третього ресурсу; для другої вимоги значення споживання ресурсів, відповідно, 0,72, 0,54 і 0,39.

Матриця $RRes$ не враховує розподілу «спільних» ресурсів між окремими вимогами. З іншого боку, сума за стовбцями цієї матриці характеризує ефективність використання певного ресурсу щодо виконання вимог стейкхолдерів. Так, показник ефективності використання $resource_1$ складає 1,32, $resource_2$ – 1,04, $resource_3$ – 0,74.

Для врахування спільного використання ресурсів розрахуємо ресурсонавантаженість окремо за $requirement_1$:

$$\begin{pmatrix} 0,4 & 0,3 & 0,2 \\ 0,1 & 0,2 & 0,15 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

та $requirement_2$:

$$\begin{pmatrix} 0,72 & 0,54 & 0,36 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,03 \end{pmatrix}.$$

Спільні ресурси визначаються наступною матрицею, кожен з елементів якої визначається як мінімальний з елементів двох попередніх матриць:

$$\begin{pmatrix} 0,4 & 0,3 & 0,2 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Отже, $requirement_1$ споживає ресурси

$$\begin{pmatrix} 0,2 & 0,15 & 0,1 \\ 0,1 & 0,2 & 0,15 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

а $requirement_2$ –

$$\begin{pmatrix} 0,52 & 0,39 & 0,26 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0,03 \end{pmatrix}.$$

Співвідношення вимог стейкхолдерів і ресурсів для другого рівня робіт з урахуванням спільного використання ресурсів (за умови рівномірного їх розподілу):

$$\begin{pmatrix} 0,3 & 0,35 & 0,25 \\ 0,52 & 0,39 & 0,29 \end{pmatrix}.$$

Аналогічно можна отримати матрицю взаємозв'язку вимог і осіб, відповідальних за їх виконання ($RRes$) та матрицю взаємозв'язку вимог і ризиків, що виникають при їх виконанні ($RRis$).

6 ОБГОВОРЕННЯ

У роботі отримано формалізацію зв'язків між окремими характеристиками моделі 4R & WS – ризиками, роботами, ресурсами, вимогами, стейкхолдерами та відповідальним особами проекту.

Відзначимо, що існуючі методи моделюють лише взаємозв'язки між роботами та ресурсами проекту, окремо відокремлюючи часові ресурси. Практичною реалізацією таких методів є програмне забезпечення для управління проектами – наприклад, MS Project, OpenProj, Ganttler для традиційного проектного менеджменту, Jira і Trello – для гнучких методологій розробки.

Так, MS Project дозволяє задати три типи ресурсів (рис. 2) та закріпити їх за роботами проекту, тривалість яких встановлюється окремо (рис. 3).

Такий підхід дозволяє не тільки розрахувати бюджет та тривалість проекту, а й відстежувати його виконання за допомогою методу освоєного обсягу, який контролює виконання проекту за часом та бюджетом. Виконання вимог стейкхолдерів не відстежується.

При використанні гнучких методологій завдання на проект формулюються у вигляді «user stories» – історій користувача, які є відображенням вимог відповідного стейкхолдера. Кожна задача пов'язана з виконавцем та часом (інші ресурси не враховуються), який потрібен на її виконання. Відсутні явно задані зв'язки між окремими задачами.

Відмінною рисою запропонованого методу є його адаптивність під традиційні процеси проектного управління, що спрощує отримання вихідних даних та надалі надасть змогу використовувати стандартне програмне забезпечення для практичної реалізації методу.

При формуванні вихідних даних необхідно враховувати обмеження щодо існування різних типів вимог у проекті (взаємовиключних, підтримуючих, незалежних і обов'язкових), а також коректно використовувати методи нечітких множин при формуванні матриць $Requirement_i$ та $Risk_i$.

ВИСНОВКИ

Для прийняття обґрунтованих рішень і формалізації процесів управління вимогами необхідно створити

інструменти, які визначатимуть основні характеристики вимог у проекті. Результатом дослідження є встановлення формальних зв'язків між ризиками, роботами, ресурсами, вимогами, стейкхолдерами та відповідальним особами проекту. Використання методу формалізації метрик управління вимогами проекту дозволяє визначити ресурсо- та ризиконавантаженість певної вимоги, що надає можливість доповнити існуючі моделі класифікації і пріоритетизації вимог даними характеристиками. Аналогічно, можна отримати метрики для оцінювання ефективності команди проекту та класифікації зацікавлених сторін проекту.

Таким чином, у роботі вирішено актуальну задачу формалізації метрик процесів управління вимогами у проектах.

Науковою новизною роботи є розробка методу формалізації метрик управління вимогами проекту, який, на відміну від існуючих, дає змогу відстежувати виконання вимог стейкхолдерів проекту, враховуючи їх ризикове та ресурсне навантаження.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропонований метод дозволяє контролювати виконання проекту не лише за часовими та вартісними характеристиками, а й відстежувати ступінь задоволеності зацікавлених сторін проекту, що підвищує обґрунтованість проектних рішень відносно управління змінами та стейкхолдерами в проекті. Перспективою подальших досліджень є програма реалізації запропонованого методу.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова «Методологія та інформаційні технології управління стейкхолдерами проектів та програм міського розвитку» (ДР № 0116U003371).

	Название ресурса	Тип	Единицы измерения материалов	Краткое название	Группа	Макс. единиц	Стандартная ставка	Ставка сверхурочных	Затраты на исполн.	Начисление	Базовый календарь
1	res1	Трудовой		r1		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
2	res2	Трудовой		r2		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
3	res3	Материальный		r3		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
4	res4	Затраты		r4		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
5	res5	Трудовой		r5		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
6	res6	Трудовой		r6		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
7	res7	Трудовой		r7		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
8	res8	Трудовой		r8		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный
9	res9	Трудовой		r9		100%	0,00р./ч	0,00р./ч	0,00р.	Пропорциональное	Стандартный

Рисунок 2 – Лист ресурсів проекту

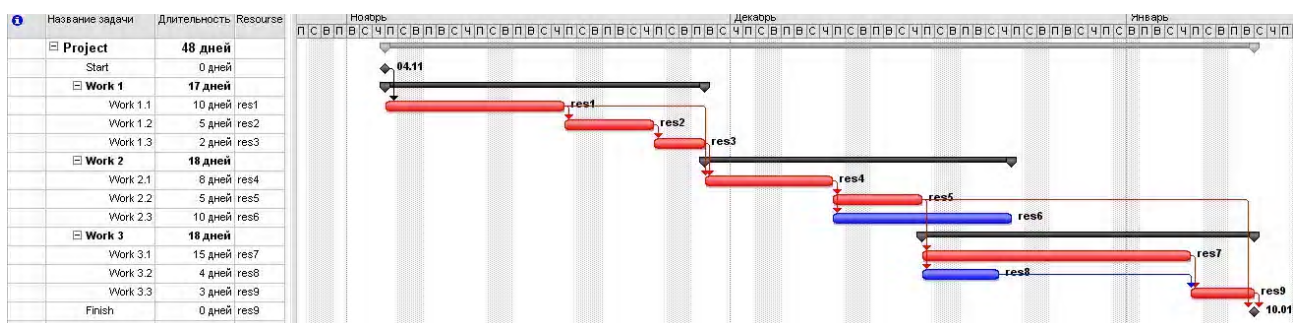


Рисунок 3 – Діаграма Ганта проекту

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. PMI's Pulse of the Profession®: The High Cost of Low Performance [Electronic resource]. – Access mode: http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2016.pdf?sc_lang=temp=en
2. Pulse of the Profession®: Capturing the Value of Project Management [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2015.pdf>
3. Requirements Management: A Practice Guide. – Newtown Square, Pa. : Project Management Institute, Inc., 2016. – 93 p.
4. Гусева Ю. Ю. Матрична модель 4R & WS для класифікації стейкхолдерів проекту / Ю. Ю. Гусева, О. С. Мартиненко, І. В. Чумаченко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 2 (1224). – С. 18–22.
5. Гусева Ю. Ю. Процесний підхід до моделювання і моніторингу вимог зацікавлених сторін / Ю. Ю. Гусева, О. С. Мартиненко, І. В. Чумаченко // Інформаційні технології та інновації в економіці, управлінні проектами і програмами: за заг. ред. В. О. Тімофєєва, І. В. Чумаченко. – Х. : ХНУРЕ, 2016. – С. 289–296.
6. Гусева Ю. Ю. Управління зацікавленими сторонами освітніх проєктів / Ю. Ю. Гусева, М. В. Сидоренко, І. В. Чумаченко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – Х. : НТУ «ХПІ». – 2016. – № 2 – С. 8–12.
7. A Guide To The Business Analysis Body Of Knowledge. – 3d Edition. – IIBA, 2015 – 657 p.
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide). – Fifth Edition. – Newtown Square, Pa. : Project Management Institute, Inc., 2013. – 614 p.
9. Business Analysis for Practitioners: A practice Guide. – Newtown Square, Pa. : Project Management Institute, Inc., 2015. – 206 p.
10. Sommerville I. Software Engineering – 9th ed. / I. Sommerville. – Addison-Wesley., 2011. – 790 p.
11. The Agile Extension to the BABOK® Guide. – IIBA, 2013 – 134 p.
12. Miranda E. Timeboxing Planning: Buffered Moscow Rules / E. Miranda // ACM SIGSOFT Software Engineering Notes. – 2011. – Volume 36, Number 6. – P. 1–5. DOI: 10.1145/2047414.2047428.
13. Fitzgerald J. S. Vienna development method / J. S. Fitzgerald, P. G. Larsen, M. Verhoef // Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering. – 2008. – P. 1–11. DOI: 10.1002/9780470050118.ecse447.
14. Spivey J. M. The z notation: a reference manual / J. M. Spivey. – Oriel College, 1998. – 1168 p.
15. Stakeholder management in construction: An empirical study to address research gaps in previous studies / [J. Yang, G. Q. Shen, M. Ho et al] // International Journal of Project Management. – 2011. – Vol. 29, No. 7. – P. 900–910. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.07.013
16. Macharis C. Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use / C. Macharis, L. Turcksin, K. Lebeau // Decision Support Systems. – 2012. – Vol. 54, No. 1. – P. 610–620.
17. Damian D. StakeSource2.0: using social networks of stakeholders to identify and prioritize requirements / D. Damian, A. Finkelstein // Proceedings of the 33rd international conference on Software engineering. – ACM. – 2011. – P. 1022–1024.
18. Мамонов К. А. Теоретико-методичні положення та особливості формування стейкхолдерів на підприємствах житлово-комунального господарства / К. А. Мамонов, О. О. Конопліна, Є. В. Гавриленко // Актуальні проблеми економіки: науковий економічний журнал. – 2014. – № 8. – С. 127–134.
19. Кадыкова И. Н. Информационная технология стратегического управления проектно-ориентированной организацией / И. Н. Кадыкова, С. А. Ларина, И. В. Чумаченко // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 3 (1225). – С. 9–15.

Стаття надійшла до редакції 12.06.2017.

Після доробки 21.08.2017.

Гусева Ю. Ю.¹, Мартиненко А. С.², Кадыкова И. Н.³, Чумаченко И. В.⁴

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри управління проектами в городском хозяйстве и строительстве, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, Харьков, Украина

²Аспирант кафедры управления проектами в городском хозяйстве и строительстве, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, Харьков, Украина

³Канд. экон. наук, доцент, доцент кафедры управления проектами в городском хозяйстве и строительстве, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, Харьков, Украина

⁴Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры управления проектами в городском хозяйстве и строительстве, Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова, Харьков, Украина

МЕТРИКИ ПРОЦЕСОВ УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ТРЕБОВАНИЙ В ПРОЕКТАХ

Актуальность. Процессы управления требованиями являются одним из ключевых факторов успеха или неудачи проекта. Исследования в области проектного менеджмента показывают, что именно эти процессы недостаточно формализованы. Следовательно, есть необходимость разработки и формализации методов управления и контроля требований, в частности, для проектов, управление которых осуществляется по традиционным или комбинированным методологиям.

Цель работы – формализация метрик процессов управления требованиями в проектах. Объектом исследования являются процессы управления и контроля требований в проектах, предметом исследования – метрики, характеризующие требования в проекте.

Метод. Используются методы анализа и синтеза, методы нечетких множеств и операции над матрицами. Предложено использование модели, которая устанавливает связи между отдельными характеристиками проекта (риски, работы, ресурсы, требования, стейкхолдеры и ответственные лица проекта) с помощью иерархической структуры работ. Предложена формализация метрик модели, которая позволит отслеживать динамику выполнения проекта и идентифицировать заинтересованные стороны проекта по определенным направлениям.

Результаты. На основе сопоставления иерархической структуры работ с иерархическими структурами требований, рисков, ресурсов и организационной структурой проекта разработан метод формализации метрик управления требованиями проекта. Предложенный метод позволяет отслеживать выполнение требований заинтересованных сторон проекта во времени в соответствии с объемом фактически израсходованных ресурсов по аналогии с методом освоенного объема. Адаптивность метода к традиционным процессам менеджмента проектов позволяет использовать исходные данные – уже сформированные активы проекта и стандартное программное обеспечение (в частности, MS Project, OpenProj) для практической реализации метода.

Выводы. Предложенный метод формализует процессы управления требованиями в проекте, позволяет определять ресурсную и рисковую нагрузку требований, дополняет существующие модели классификации требований данным метриками. Метод формализации метрик управления требованиями проекта позволяет также получить инструменты для оценки эффективности команды проекта и классификации заинтересованных сторон проекта. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его использование на практике при принятии проектных решений по управле-

нию изменениями и требованиями стейкхолдеров проекта. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в разработке программного обеспечения, реализующего предложенный метод.

Ключевые слова: управление требованиями, проект, метрика, ресурсы, стейкхолдеры, риски.

Husieva Yu. Yu.¹, Martynenko O. S.², Kadykova I. M.³, Chumachenko I. V.⁴

¹PhD, docent, associate professor of the Department of Project management in urban economy and construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

²Post-graduate student of the Department of Project management in urban economy and construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

³PhD, docent, associate professor of the Department of Project management in urban economy and construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

⁴Dr. Sc. Professor, Head of the Department of Project management in urban economy and construction, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine

METRICS OF MANAGEMENT AND CONTROL REQUIREMENTS PROCESSES IN PROJECTS

Context. The processes of requirements management are a key factor in the success or failure of the project. Researches in the field of project management indicate that these processes are not formalized. Thus, there is need to develop and formalize methods of requirements management and control, particularly for projects which are carried out by combined or traditional methodologies.

Objective of the article is formalizing of requirements management processes metrics in projects. The object of the research is management and control requirements processes of projects, the subject of the study – metrics that characterize the requirements of the project.

Method. Methods used are analysis and synthesis, methods of fuzzy sets and operations on matrices. The use of a model that establishes relationships between individual characteristics of the project (risks, resources, requirements, stakeholders and decision-makers of the project) through WBS is proposed. A formalization of model metrics is proposed that will keep track of the project and identify project stakeholders through the defined areas.

Results. Based on the comparison of WBS with a hierarchical structure of requirements, risks, resources and organizational structure of the project method of formalizing metrics requirements management project is developed. The proposed method allow to track the performance of project stakeholders' requirements according to the actual amount of resources spent by analogy with the method of earned value. Adaptability to the traditional project management processes lets you use the original data – assets of the project and standard software (eg, MS Project, OpenProj) for the practical implementation of the method.

Conclusions. The proposed method formalizes requirement management processes in the project, determines resource and risk load of requirements, supplementing the existing requirements classification models with these metrics. The proposed method can also provide metrics for evaluation the performance of the project team and project stakeholders classification. The conducted experiments have confirmed the efficiency of the proposed mathematical software and allow recommending it for use in practice for making project decisions about change management and requirements management of the project. Prospects for further research may include developing of software that will implement the proposed method.

Keywords: requirements management, project, metrics, resources, stakeholders, risks.

REFERENCES

1. PMI's Pulse of the Profession®: The High Cost of Low Performance [Electronic resource]. Access mode: http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2016.pdf?sc_lang=temp=en
2. Pulse of the Profession®: Capturing the Value of Project Management [Electronic resource]. Access mode: <http://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2015.pdf>
3. Requirements Management: A Practice Guide [Text]. Newtown Square, Pa., Project Management Institute, Inc., 2016, 93 p.
4. Husieva Yu. Yu., Martynenko O. S., Chumachenko I. V. Matrychna model' 4R & WS dlja klasyfikacii' steykholderiv proektu, Visnyk Nac. tehn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Strategichne upravlinnja, upravlinnja portfeljamy, programamy ta proektamy. Harkiv, NTU "HPI", 2017, No. 2 (1224), pp. 18–22.
5. Husieva Yu. Yu., Martynenko O. S., Chumachenko I. V. za zag. red. V. O. Timofjejeva, I. V. Chumachenko Procesnyj pidhid do modeljuvannja i monitoryngu vymog zacikavlenyh storing, Informacijni tehnologii' ta innovacii v ekonomici, upravlinni proektamy i programamy. Kharkiv, HNURE, 2016, pp. 289–296
6. Husieva Yu. Yu., Sydorenko M. V., Chumachenko I. V. Upravlinnja zacikavlenymy storonamy osvutnih proektiv, Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovyh prac'. Serija: Strategichne upravlinnja, upravlinnja portfeljamy, programamy ta proektamy. Kharkiv, NTU «HPI», 2016, No. 2, pp. 8–12
7. A Guide To The Business Analysis Body Of Knowledge. 3d Edition, IIBA, 2015, 657 p.
8. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide) – Fifth Edition. Newtown Square, Pa.: Project Management Institute, Inc., 2013, 614 p.
9. Business Analysis for Practitioners: A practice Guide. Newtown Square, Pa.: Project Management Institute, Inc., 2015, 206 p.
10. Sommerville I. Software Engineering 9th ed. Addison-Wesley, 2011, 790 p.
11. The Agile Extension to the BABOK® Guide, IIBA, 2013, 134 p.
12. Miranda E. Timeboxing Planning: Buffered Moscow Rules, *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes*, 2011, Volume 36, Number 6, pp. 1–5. DOI: 10.1145/2047414.2047428.
13. Fitzgerald J. S., Larsen P. G., Verhoef M. Vienna development method, *Wiley Encyclopedia of Computer Science and Engineering*, 2008, pp. 1–11. DOI: 10.1002/9780470050118.ecse447.
14. Spivey J. M. The z notation: a reference manual. Oriel College, 1998, 1168 p.
15. Yang J., Shen G. Q., Ho M., Drew D. S., Xue X. Stakeholder management in construction: An empirical study to address research gaps in previous studies, *International Journal of Project Management*, 2011, Vol. 29, No. 7, pp. 900–910. DOI: 10.1016/j.ijproman.2010.07.013
16. Macharis C., Turcksin L., Lebeau K. Multi actor multi criteria analysis (MAMCA) as a tool to support sustainable decisions: State of use, *Decision Support Systems*, 2012, Vol. 54, No. 1, pp. 610–620.
17. Damian D., Finkelstein A. StakeSource2.0: using social networks of stakeholders to identify and prioritize requirements, *Proceedings of the 33rd international conference on Software engineering*, ACM, 2011, pp. 1022–1024.
18. Mamonov K. A., Konoplyna O. O., Gavrylenko Je. V. Teoretyko-metodychni polozhennja ta osoblyvosti formuvannja steykholderiv na pidpryjemstvah zhytlovo-komunal'nogo gospodarstva, *Aktual'ni problemy ekonomiky: naukovyy ekonomichnyj zhurnal*, 2014, No. 8, pp. 127–134.
19. Kadykova I. N., Larina S. A., Chumachenko I. V. Informacionnaja tehnologija strategicheskogo upravlenija proektno-orientirovannoj organizaciej, *Visnyk Nac. tehn. un-tu "HPI": zb. nauk. pr. Ser.: Strategichne upravlinnja, upravlinnja portfeljami, programami ta proektami*. Kharkiv, NTU "HPI", 2017, No. 3 (1225), pp. 9–15.

СИНТЕЗ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ПОНИЖЕНОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ ЗАМКНУТИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НЕПЕРЕРВНИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Актуальність. Складність цифрового регулятора замкнутих систем управління неперервними об'єктами визначається розмірністю математичної моделі об'єкта управління, яка подається у вигляді передаточної функції. На практиці перевага надається простим регулятором, розмірність яких менша за розмірність об'єкта. Саме тому задача синтезу систем управління з використанням лінійних регуляторів низького порядку є предметом уваги багатьох дослідників.

Мета. Виклад результатів розробки методики синтезу цифрових регуляторів пониженого порядку з гарантованою якістю управління на основі редукованої передаточної функції об'єкта управління.

Метод. Спрощення регуляторів досягається за рахунок використання при синтезі редукованої передаточної функції об'єкта управління. Синтез пропонується виконувати в два етапи. На першому етапі здійснюється редукція передаточної функції об'єкта управління. Критерієм якості редукції є відповідність значень інтегральних оцінок якості перехідного процесу вихідної та спрощеної моделей об'єктів управління, замкнутих одиничним негативним зворотнім зв'язком системи автоматичного управління. Виконання критерію досягається забезпеченням відповідності непрямих показників якості перехідного процесу вихідної та редукованої моделей. На другому етапі реалізується безпосередній синтез цифрового регулятора. В роботі показано використання метода синтезу компенсаційних регуляторів.

Результати. Застосування викладеного підходу показано на прикладі синтезу цифрового регулятора для системи частотного автотістроювання. Наводяться результати цифрового моделювання.

Висновки. На відміну від відомих підходів, відповідності між початковою та спрощеною передаточними функціями досягається шляхом привласнення редукованій моделі значень непрямих показників якості перехідного процесу вихідної моделі, які визначаються за частотними характеристиками. Практична значущість роботи полягає у створенні методики синтезу простих лінійних цифрових регуляторів для замкнутих систем управління неперервними об'єктами.

Ключові слова: синтез, редукція, цифровий регулятор, передаточна функція, об'єкт управління, частотна характеристика.

НОМЕНКЛАТУРА

k_0 – коефіцієнт підсилення вихідної передаточної функції;

k – коефіцієнт підсилення редукованої передаточної функції;

T_i, T_j, T_k – постійні часу вихідної передаточної функції;

T_l, T_r – постійні часу редукованої передаточної функції;

ξ – коефіцієнт згасання;

p – оператор Лапласа;

h – інтервал часової дискретизації

q – порядок редукованої моделі;

r – порядок чисельника вихідної передаточної функції об'єкта управління;

m – кількість інерційних ланок у складі вихідної передаточної функції об'єкта управління;

s – порядок астатизму об'єкта управління;

v – порядок чисельника редукованої передаточної функції об'єкта управління;

$W_0(p)$ – вихідна передаточна функція об'єкта управління;

$W(p)$ – редукована передаточна функція об'єкта управління;

$W_{cp}(z)$ – дискретна передаточна функція цифрового регулятора;

J – інтегральна оцінка якості перехідного процесу;

$\omega_{зр}$ – частота зрізу;

$\Delta\varphi_0$ – запас стійкості за фазою;

$W_0(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика вихідного об'єкта управління;

$W(\omega)$ – амплітудно-частотна характеристика редукованої моделі об'єкта управління;

$\varphi(\omega)$ – фазочастотна характеристика редукованої моделі об'єкта управління;

ε – помилка системи в сталому режимі;

h – інтервал часової дискретизації;

x – поліноміальна вхідна дія;

y – вихідна дія системи;

$\Delta^i x$ – i -та ліва різниця від вхідної дії;

N – порядок вхідної дії;

σ – перерегулювання перехідної характеристики;

$W_\varepsilon(z)$ – передаточна функція за помилкою системи управління з цифровим регулятором;

$A(z)$ – поліном чисельника передаточної функції за помилкою системи управління з цифровим регулятором;

$C(z)$ – характеристичний поліном системи управління з цифровим регулятором;

Q_i – коефіцієнти характеристичного полінома системи управління з цифровим регулятором;

m_i, n_i – коефіцієнти передаточної функції цифрового регулятора.

ВСТУП

Одною з центральних задач теорії автоматичного управління є задача синтезу, в результаті рішення якої визначається склад, структура та параметри усіх пристроїв

системи автоматичного управління при умові відповідності заданому комплексу технічних вимог. При цьому однією з необхідних умов синтезу є наявність математичної моделі об'єкту управління. Для систем з одним входом і одним виходом такою моделлю, як правило, являється передаточна функція. У більшості випадків порядок передаточної функції об'єкту визначає складність регулятора. На практиці викликають інтерес регулятори низького порядку з фіксованою структурою (прості регулятори) [1]. Спрощення регулятора актуальне не лише зниженням обчислювальної складності, але і можливістю формувати алгоритми управління на базі простих контролерів [1, 2].

Питанням синтезу регуляторів пониженого порядку присвячено досить велику кількість публікацій. Викладені в них методи можна розділити на два класи: прямі та непрямі. Прямі методи передбачають розрахунок регулятора за допомогою оптимізації його параметрів або проведення будь-якої іншої процедури, що супроводжується певними обчислювальними витратами. Прямі методи, як правило, дозволяють формувати і структуру, і якість управління, але немає ніяких гарантій, що регулятор, який синтезується, буде побудовано [1].

Непрямі методи припускають синтез регулятора високого порядку з подальшим його спрощенням або редукцією моделі об'єкту управління з подальшим використанням результату для синтезу регулятора. Непрямі методи завжди дозволяють побудувати регулятор пониженої розмірності, проте не гарантують ні заданої структури регулятора, ні бажаної якості управління [1]. Зважаючи на це задача синтезу цифрових регуляторів пониженої розмірності залишається актуальною.

Метою статті є виклад результатів розробки методики синтезу цифрових регуляторів пониженого порядку з гарантованою якістю управління на основі редукованої моделі об'єкту управління, поданої у вигляді передаточної функції. Поставлена мета досягається поетапним розв'язанням задач редукції моделі об'єкту управління та синтезу структури регулятора.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Допускається, що неперервний лінійний об'єкт замкненої системи автоматичного управління описується передаточною функцією

$$W_o(p) = \frac{k_0 \prod_{j=0}^r (1 + T_j p)}{p^s (1 + 2\xi T_k p + T_k^2 p^2) \prod_{i=1}^m (1 + T_i p)} \quad (1)$$

Вхідна дія описується поліноміальною моделлю

$$x(n) = x(n-1) + \sum_{i=1}^N \frac{h^i}{i!} \Delta^i x(n-1) \quad (2)$$

Синтезувати передаточну функцію цифрового регулятора пониженої розмірності $W_{up}(z)$, який надасть системі задане перерегулювання σ перехідної характеристики та нульову помилку в сталому режимі $\varepsilon(n) = 0$.

Пониження порядку регулятора досягти шляхом використання при синтезі спрощеної передаточної функції об'єкта управління наступного виду

$$W(p) = \frac{k \prod_{r=0}^v (1 + T_r p)}{p^s \prod_{l=1}^{q-s} (1 + T_l p)} \quad (3)$$

тут $q < s + m + 2$; $v \leq q$.

Критерієм якості редукції є відповідність значень інтегральних оцінок якості перехідного процесу вихідної J_0 та редукованої J моделей об'єктів управління [3, 4] замкнутих одиничним негативним зворотним зв'язком системи автоматичного управління.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В теорії управління задача редукції моделі займає одне з центральних місць. Проте, евристичні методи, які засновані на спрощенні моделі виходячи з фізичних та інженерних міркувань дають досить грубий результат [3, 4]. Методи апроксимації, що ґрунтуються на розкладанні передаточної функції в ряд з подальшим відкиданням складових, які найменше впливають на динамічні властивості об'єкту [5, 6], також є досить наближеними. Аналітичні методи передбачають зменшення розмірності моделі шляхом відкидання її елементів відповідно до заданого критерію. Прикладом подібної редукції є виключення деяких змінних стану в матричному описі [7, 8, 9]. Незважаючи на математичну суворість подібний підхід досить складний внаслідок високої обчислювальної складності. Альтернативним є числовий метод, який реалізується за допомогою ЕОМ [4]. Подібна процедура передбачає наявність відповідного програмного забезпечення, яке реалізує той або інший числовий метод, і не гарантує збіжності процесу розрахунків. Таким чином, розробка аналітичних методів узагальненого редуктування, що не потребують для своєї реалізації складних математичних розрахунків, зберігає свою актуальність.

Задачі синтезу цифрових регуляторів в теорії управління також є класичними. В літературі описано ряд відомих методів, серед яких: метод розміщення нулів і полюсів [4, 12], частотний метод [11, 12], метод ПІД регулятора [3, 11, 12], метод синтезу компенсаційних регуляторів [3, 13]. При наявності моделі об'єкта управління кожен із зазначених методів може бути використаний для синтезу цифрового регулятора.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Редукція моделі об'єкта управління. В основу підходу, який пропонується, покладено твердження [4], що адекватність математичних моделей початкового та редуктованого об'єктів, охоплених одиничним негативним зворотним зв'язком, визначається близькістю їх перехідних характеристик. Відомо, що для оцінки якості перехідного процесу можуть використовуватися непрямі показники [10], до яких належать: значення частоти зрізу ω_{zp} , як оцінка швидкодії замкнутої системи; запас стійкості за фазою $\Delta\phi_0(\omega_{zp})$, як міра коливальності пе-

рехідної характеристики; запас стійкості за амплітудою, що визначається на частоті ω_π , при якій система знаходиться на межі стійкості $\varphi_0(\omega_\pi) = -\pi$. У зв'язку з цим реалізувати редукцію передбачається можливим шляхом привласнення редукованій моделі значень частоти зрізу ω_{zp} , фазочастотної $\varphi_0(\omega_{zp})$ та амплітудно-частотної $W_0(\omega_\pi)$ характеристик, як параметрів, що визначають якість перехідного процесу реальної моделі. Значення частоти зрізу розраховується з рішення рівняння

$$W_0(\omega) = 1.$$

Для виключення складності математичних перетворень, частоту зрізу пропонується визначати шляхом побудови асимптотичної логарифмічної амплітудно-частотної характеристики при виконанні рівності

$$20 \lg W_0(\omega) = 0.$$

Значення $\varphi_0(\omega_{zp})$ та ω_π розраховуються із співвідношень

$$\varphi_0(\omega_{zp}) = -s \frac{\pi}{2} - \sum_{i=1}^m \arctg(\omega_{zp} T_i) - \arctg \frac{2\xi T_k \omega_{zp}}{1 - \omega_{zp}^2 T_k^2} + \sum_{j=0}^r \arctg(\omega_{zp} T_j), \quad (4)$$

$$\varphi_0(\omega_\pi) = -\pi. \quad (5)$$

Використовуючи отримані значення ω_{zp} , $W_0(\omega_\pi)$ та $\varphi_0(\omega_{zp})$ в якості величин, що визначають динамічні властивості редукованої моделі, вирази для розрахунку коефіцієнта підсилення та постійних часу редукованої передаточної функції (3) розраховуються із спільного рішення рівнянь

$$W(\omega_{zp}) = 1, \quad (6)$$

$$\varphi(\omega_{zp}) = \varphi_0(\omega_{zp}), \quad (7)$$

$$W(\omega_\pi) = W_0(\omega_\pi). \quad (8)$$

Розв'язок системи рівнянь (6)–(8) дозволяє визначити передаточну функцію з трьома невідомими коефіцієнтами. В умовах, коли кількість невідомих перевищує кількість рівнянь, доцільно частину складових початкової моделі, які найбільш впливають на динамічні властивості системи, зберегти у складі редукованої передаточної функції. Такий підхід дає можливість отримувати передаточні функції заданого порядку. Передаточна функція об'єкта управління, яка спрощена за викладеною методикою, може використовуватися для синтезу цифрового регулятора пониженого порядку.

Синтез структури регулятора. Передаточну функцію цифрового регулятора $W_{up}(z)$ пропонується [13] визначати з виразу

$$W_{up}(z) = \frac{C(z) - A(z)}{A(z)W(z)}, \quad (9)$$

де

$$A(z) = (1 - z^{-1})^{N+1}, \quad (10)$$

$$C(z) = \prod_{i=1}^{N+1} (1 + \Theta_i z^{-1}). \quad (11)$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Синтез цифрового регулятора розглядається на прикладі. Синтезується цифровий регулятор пониженої розмірності для системи частотного автопідстроювання, передаточна функція безперервної частини якої має вигляд

$$W_0(p) = \frac{20}{p(1 + 0,02p)(1 + 0,08p)(1 + 0,03p)}.$$

Вхідна дія описується рівнянням (2) при $N = 1$. Критерій якості: в сталому режимі $\varepsilon(n) = 0$, в перехідному режимі $\sigma \leq 20\%$.

Розв'язок. За графіком логарифмічної амплітудно-частотної характеристики вихідної моделі (рис. 1) визначається частота зрізу $\omega_{zp} = 15$ рад/с.

З виразу (4) розраховується значення фазочастотної характеристики на частоті зрізу $\varphi_0(\omega_{zp}) = -171^\circ$.

В якості редукованої вибирається передаточна функція [4] наступного виду

$$W(p) = \frac{k}{p(1 + Tp)}, \quad (12)$$

тут значення коефіцієнта підсилення k та сталої часу T підлягають визначенню.

Амплітудно-частотна $W(\omega)$ та фазочастотна $\varphi(\omega)$ характеристики редукованої моделі (12) описуються рівняннями

$$W(\omega) = \frac{k\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}{\omega(1 + \omega^2 T^2)}, \quad \varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{1}{\omega T}\right).$$

За виразами (6) та (7) розраховуються коефіцієнти редукованої передаточної функції: $k = 87c^{-1}$, $T = 0,51$ с.

Відповідно (12) визначається дискретна передаточна функція об'єкта управління з урахуванням екстраполятора нульового порядку

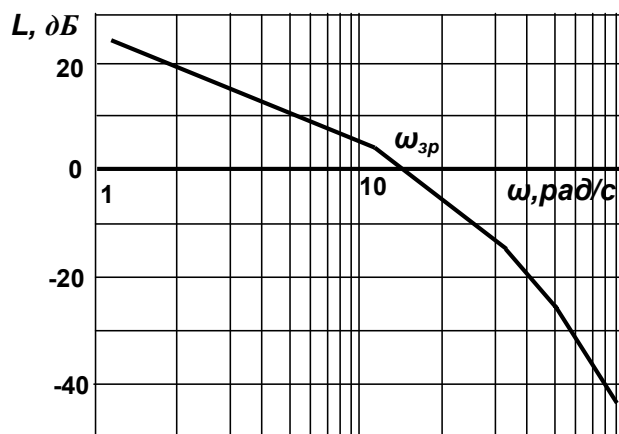


Рисунок 1 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика вихідної моделі об'єкта

$$W(z) = \frac{c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2}}{(1 - z^{-1})(1 - d_2 z^{-1})},$$

$$\text{де } c_1 = \frac{\alpha}{b^2}(bh - 1 + d_2); \quad c_2 = \frac{\alpha}{b^2}(1 - d_2 - bhd_2);$$

$$d_2 = e^{-bh}; \quad \alpha = \frac{k}{T}; \quad b = \frac{1}{T}.$$

Для досягнення заданого показника якості системи з (10) та (11) записуються поліноми

$$A(z) = (1 - z^{-1})^2, \quad C(z) = (1 - Q_1 z^{-1})(1 - Q_2 z^{-1}).$$

За виразом (9) синтезується передаточна функція цифрового регулятора

$$W_{up}(z) = \frac{m_0 + m_1 z^{-1} + m_2 z^{-2}}{1 + n_1 z^{-1} + n_2 z^{-2}},$$

$$\text{де } m_0 = \frac{2 - Q_1 - Q_2}{c_1}; \quad m_1 = -\frac{2d_2 - d_2 Q_1 - d_2 Q_2 - Q_1 Q_2 + 1}{c_1};$$

$$m_2 = \frac{d_2(1 - Q_1 Q_2)}{c_1}; \quad n_1 = \frac{c_2 - c_1}{c_1}; \quad n_2 = -\frac{c_2}{c_1}.$$

Коефіцієнти характеристичного рівняння розраховувались методом розміщення нулів та полюсів [12]. Заданому перегулюванню задовольняють корені характеристичного рівняння $z_1 = 0,73$ та $z_2 = 0,75$, яким відповідають коефіцієнти $Q_1 = 0,73$ та $Q_2 = 0,75$.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Ступінь наближення результату редукції до вихідної моделі оцінювалась шляхом математичного моделювання. При моделюванні неперервних частин системи використовувались рекурентні формули за методом трапецій [4]. Результати моделювання у вигляді перехідних характеристик вихідної та спрощеної моделей, охоплених від'ємним зворотним зв'язком, приведені на рис. 2 та 3. Значення інтегральних квадратичних оцінок якості перехідного процесу відповідно дорівнюють: $J_0 = 0,9899$ та $J = 0,9732$.

Оцінка ефективності синтезованої цифрової системи управління також проводилась шляхом математичного

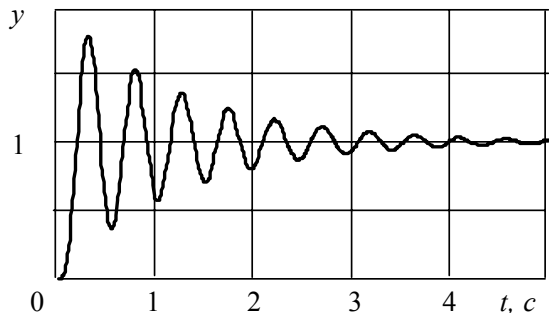


Рисунок 2 – Перехідна характеристика системи управління з вихідною моделлю об'єкта

моделювання при таких умовах: крок моделювання $h_0 = 0,001c$; крок дискретизації $h = 0,2c$. Результати моделювання у вигляді перехідної характеристики при $x(n) = 1$ та графіка зміни помилки системи ε при лінійній вхідній дії $x(n) = nh$ приведені на рис. 4 та 5.

Використання у складі замкнутої системи управління цифрового регулятора, синтезованого за викладеною методикою, призводить до покращення динамічних властивостей системи. При заданих вхідних діях в сталому режимі помилка дорівнює нулю. Цифровий регулятор надає системі астатизм другого порядку.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані результати показують достатньо високу ступінь близькості між вихідною та спрощеною моделями об'єктів управління. На відміну від відомих методів редукції моделей об'єктів управління викладений підхід не потребує великих обчислень для своєї реалізації. Рішення отримується шляхом розв'язання системи алгебраїчних рівнянь.

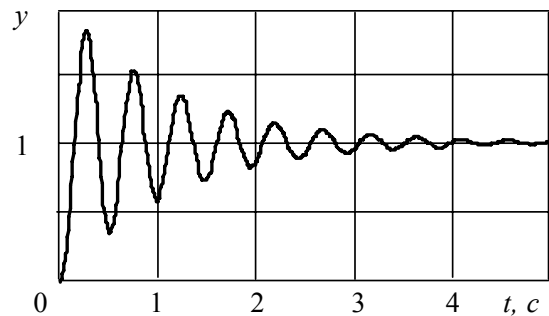


Рисунок 3 – Перехідна характеристика системи управління з редукованою моделлю об'єкта

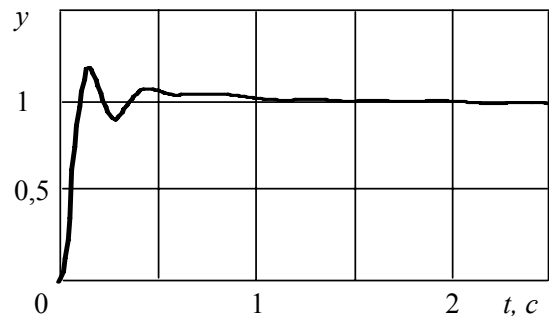


Рисунок 4 – Перехідна характеристика цифрової системи

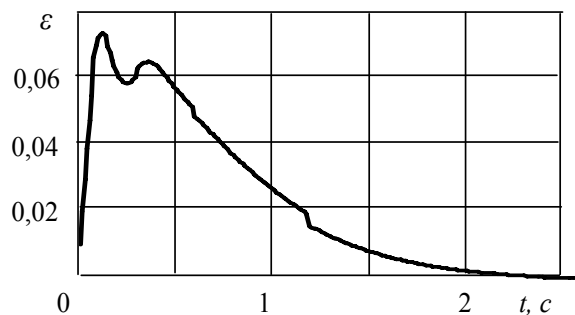


Рисунок 5 – Помилка цифрової системи при лінійній вхідній дії

Недоліком викладеного підходу є те, що він може бути задіяний лише для стійких об'єктів управління. Крім того, якщо стоїть задача спрощення моделі до завчасно заданого порядку, виникає необхідність введення ряду припущень завдяки яким кількість невідомих параметрів редукованої моделі приводиться у відповідність до кількості рівнянь у системі, яка підлягає розв'язанню. Розрахунки ускладнюються при підвищенні порядку редукованої моделі. Якщо модель об'єкта управління подано у просторі стану, доцільно здійснити перехід до передаточної функції за допомогою любого відомого методу.

Результати застосування викладеної методики спрощення моделей об'єктів управління складають основу для синтезу цифрових регуляторів. В роботі пропонується синтез регулятора здійснювати методом [13], який відноситься до класу компенсаційних [3, 11]. Метод дозволяє синтезувати цифрові регулятори виходячи із необхідної якості управління як в сталому, так і в перехідному. В загальному випадку синтез регулятора може виконуватися любым відомим методом.

ВИСНОВКИ

У роботі викладено порядок синтезу цифрових регуляторів пониженого порядку для автоматичних слідкувальних систем. В основу підходу покладено спрощення передаточної функції об'єкта управління з подальшим використанням отриманого результату для синтезу регулятора.

Наукова новизна роботи полягає у тому, що при побудові редукованої моделі об'єкта управління відповідність між початковою та редукованою передаточними функціями досягається шляхом використання непрямих показників якості перехідного процесу, які визначаються за частотними характеристиками.

Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні теоретико-методологічної основи для синтезу цифрових регуляторів низької структурної складності, які реалізують прості алгоритми управління.

Перспективами подальших досліджень є розвинення викладеного підходу для ідентифікації математичних моделей об'єктів управління за перехідними характеристиками, які отримуються експериментально.

ПОДЯКИ

Робота виконана відповідно до плану наукової роботи Житомирського військового інституту імені С. П. Ко-

Зимчук І. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і кібербезпеки Житомирського військового інституту радіоелектроніки ім. С. П. Королева, Житомир, Україна

СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА ДЛЯ ЗАМКНУТЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЕ НЕПРЕРЫВНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Актуальность. Сложность цифрового регулятора замкнутых систем управления непрерывными объектами определяется размерностью математической модели объекта управления, которая представляется в виде передаточной функции. На практике более предпочтительными являются простые регуляторы, размерность которых меньше размерности объекта. Именно поэтому задача синтеза систем управления с использованием линейных регуляторов низкого порядка является предметом внимания многих исследователей.

Цель. Изложение результатов разработки методики синтеза цифровых регуляторов пониженного порядка с гарантированным качеством управления на основе редуцированной передаточной функции объекта управления.

Метод. Упрощение регуляторов достигается путем использования при синтезе редуцированной передаточной функции объекта управления. Синтез предлагается выполнять в два этапа. На первом этапе осуществляется редукция передаточной функции объекта управления. Критерием качества редукации является соответствие значений интегральных оценок качества переходного процесса исходной и упрощенной моделей объектов управления, замкнутых единичной негативной обратной связью системы автоматического управления. Выполнение критерия достигается обеспечением соответствия косвенных показателей качества переходного процесса

рольова на 2016 рік, носить ініціативний характер та виконана без спонсорської допомоги.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры / [В. А. Бойченко, А. П. Курдюков, В. Н. Тимин и др.] // Управление большими системами: сборник трудов. – М. : ИПУ РАН, 2007. – Вып. 19. – С. 23–126.
2. Романова И. К. Современные методы редукиции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов / И. К. Романова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 122–133.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.
4. Гостев В. И. Оптимальные системы управления с цифровыми регуляторами: справочник / В. И. Гостев, В. И. Стеклов, С. Н. Скляренко. – К. : КИРЦ «Сенс», 1995. – 484 с.
5. Котляров В. О. Синтез наблюдателей с редуцированными моделями электропривода / В. О. Котляров, Л. А. Жилевская // Электромеханика и энергосберегающие системы. – 2012. – №3 (19). – С. 114–115.
6. Мироновский Л. А. Функциональное диагностирование динамических систем / Л. А. Мироновский. – СПб, 1998. – 257 с.
7. Мэн Цинсун. Метод упрощения моделей для сложных сбалансированных систем управления / Мэн Цинсун, К. М. Шестаков // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2008. – № 3. – С. 44–51.
8. Guiver C. Bounded real and positive real balanced truncation for infinite-dimensional systems / C. Guiver, R. Mark // Mathematical Control and Related Fields (MCRF). – 2013. – Vol. 3, Issue 1. – P. 83–119.
9. Monshizadeh N. A Simultaneous Balanced Truncation Approach to Model Reduction of Switched Linear Systems / N. Monshizadeh, L. T. Harry, M. Kanat // IEEE Transactions On Automatic Control. – 2012. – Vol. 57, № 12. – P. 3118–3131.
10. Арсеньев Г. Н. Радиоавтоматика. Ч. 1. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления РЭС. Учебник для вузов / Г. Н. Арсеньев, Г. Ф. Зайцев. – М. : САЙНС-ПРЕСС, 2008. – 480с.
11. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления / Б. Куо. – М. : Машиностроение, 1986. – 448 с.
12. Поляков К. Ю. Основы теории цифровых систем управления : учеб. пособие / К. Ю. Поляков. – СПб. : СПбГМТУ, 2006. – 161 с.
13. Зімчук І. В. Синтез алгоритмів цифрового управління для автоматичних слідкувальних систем / І. В. Зімчук, В. І. Іщенко, І. О. Канкін // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2015. – № 1. – С. 32–38.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2016.

Після доробки 06.02.2017.

исходной и редуцированной моделей. На втором этапе реализуется непосредственный синтез цифрового регулятора. В работе показано использование метода синтеза компенсационных регуляторов.

Результаты. Применение изложенного подхода показано на примере синтеза цифрового регулятора для системы частотной автоподстройки. Приводятся результаты цифрового моделирования.

Выводы. В отличие от известных подходов, соответствие между исходной и упрощенной передаточными функциями достигается путем присвоения редуцированной модели значений косвенных показателей качества переходного процесса исходной модели, которые определяются по частотным характеристикам. Практическая значимость работы заключается в создании методики синтеза простых линейных цифровых регуляторов для замкнутых систем управления непрерывными объектами.

Ключевые слова: синтез, редукция, цифровой регулятор, передаточная функция, объект управления, частотная характеристика.

Zimchuk I. V.

PhD., Associate Professor, Associate Professor of Department of Computer Integrated Technologies and Cybernetic Safety, Korolyov Zhytomyr Military Institute, Zhytomyr, Ukraine

SYNTHESIS THE DIGITAL REGULATORS OF LOWERED ORDER FOR THE RESERVED SYSTEMS MANAGEMENT BY CONTINUOUS OBJECTS

Context. Complication of digital regulator of the closed control systems by the continuous objects is determined by the dimension of mathematical model of control object, which given as a transmission function. In practice more preferable are simple regulators a dimension of which is a less dimension of object. For this reason a task of synthesis the control system with use the linear regulators of subzero order is the article attention of many researchers.

Objective. Exposition the results of development methodology by synthesis of digital regulators the lowered order with the assured control quality on the basis of reduction transmission function of control object.

Method. Simplification of regulators is arrived at by using for the synthesis the reduction transmission function of control object. A synthesis it is suggested to execute in two stages. On the first stage reduction of transmission function of management object comes true. The criterion quality of reduction is accordance the values of integral estimations quality of transient initial and simplified models the management objects reserved by the single negative feed-back of the automatic control system. The quality criterion is arrived at by providing the accordance of indirect indexes quality of transient initial and reduction models. On the second stage the direct synthesis of digital regulator will be realized. The use of synthesis method of compensative regulators is in-process shown.

Results. Application of the expounded approach is shown on the example of synthesis the digital regulator for FLL system. Work example and simulation results are presented.

Conclusions. Unlike the known approaches, accordance between initial and simplified transmission functions arrived at by the appropriation to reduction model the values of indirect indexes quality of initial model transient, which are determined on frequency descriptions. Practical meaningfulness of work consists in creation the methodology synthesis of simple linear digital regulators for reserved control system continuous objects.

Keywords: synthesis, reduction, digital regulator, transmission function, management object, frequency description.

REFERENCES

- Bojchenko V. A., Kurdyukov A. P., Timin V. N. i dr. Nekotorye metody sinteza regulyatorov ponizhennogo poryadka i zadannoj struktury, *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov*. Moscow, IPU RAN, 2007, Vyp. 19, pp. 23–126.
- Romanova I. K. Sovremennyye metody redukcii nelinejnyh sistem i ih primenenie dlya formirovaniya modelej dvizhushchih ob"ektov, *Vestnik MGTU im. N. E.H. Bauman. Ser. "Mashinostroenie"*, 2012, pp. 122–133.
- Izerman R. Cifrovyye sistemy upravleniya. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
- Gostev V. I., Sklyarenko S. N. Optimal'nye sistemy upravleniya s cifrovymi regulyatorami: spravochnik. Kiev, KIRC «Sens», 1995, 484 p.
- Kotlyarov V. O., Zhilevskaya L. A. Sintez nablyudatelej s reducirovannymi modelyami ehlektroprivoda, *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi*, 2012, No. 3 (19), pp. 114–115.
- Mironovskij L. A. Funkcional'noe diagnostirovanie dinamicheskikh sistem. Sankt-Peterburg, 1998, 257 p.
- Mehn Cinsun, SHehtakov K. M. Metod uproshcheniya modelej dlya slozhnyh sbalansirovannyh sistem upravleniya, *Vestnik BGU. Ser. I*, 2008, No. 3, pp. 44–51.
- Guiver C., Mark R. Bounded real and positive real balanced truncation for infinite-dimensional systems, *Mathematical Control and Related Fields (MCRF)*, 2013, Vol. 3, Issue 1, pp. 83–119.
- Monshizadeh N., Harry L. T., Kanat M. A Simultaneous Balanced Truncation Approach to Model Reduction of Switched Linear Systems, *IEEE Transactions On Automatic Control*, 2012, Vol. 57, No. 12, pp. 3118–3131.
- Arsen'ev G. N., Zajcev G. F. Radioavtomatika. CH. 1. Teoriya linejnyh nepreryvnyh sistem avtomaticheskogo upravleniya REHS. Uchebnik dlya vuzov. Moscow, SAJNS-PRESS, 2008, 480 p.
- Kuo B. Teoriya i proektirovanie cifrovyyh sistem upravleniya. Moscow, Mashinostroenie, 1986, 448 p.
- Polyakov K. YU. Osnovy teorii cifrovyyh sistem upravleniya: Ucheb. Posobie. Sankt-Peterburg, SPbGMTU, 2006, 161 p.
- Zimchuk I. V., Ishchenko V. I., Kankin I. O. Sintez algoritmov cifrovogo upravlinnya dlya avtomatichnih slidkuval'nih sistem, *Sistemni doslidzhennya ta informacijni tekhnologii*, 2015, No. 1, pp. 32–38.

ІННОВАЦІЙНЕ УПРАВЛІННЯ ПРОЦЕСОМ НАГРІВАННЯ МЕТАЛУ У ПЕЧІ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРОСТОРОВОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОЛЯ

Актуальність. У роботі вирішено актуальну задачу розробки інноваційної системи управління процесом нагрівання металу у камерній печі.

Мета – розробка алгоритму управління процесом нагрівання металу з додатковим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля у камері печі.

Метод. За загальновідомими методиками планування експерименту одержано регресійну модель реальної камерної печі з врахуванням величини напруги між пальником і садкою металу, яка і покладена в основу алгоритму.

Результати. Розроблено систему управління камерною піччю, у якій за створеним алгоритмом визначаються оптимальні значення керуючих впливів на кожному кроці циклу нагрівання. Запропонована система управління є універсальною, оскільки після прорахунків видає динаміку, за якою потрібно змінювати величину постійної напруги та подачу газу з кроком у часі j для виконання будь-якого заданого режиму термічної обробки металу. Проведені експериментальні дослідження на реальній камерній печі з вихватним подом на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» це підтвердили. Аналіз отриманих графіків зміни температури відпалу металу показав, що при реалізації оптимальних значень керуючих впливів, одержаних за допомогою розробленого алгоритму, спостерігається висока рівномірність й забезпечується краща якість нагрівання металу. Динаміка споживання газу камерною піччю за цикл нагрівання у базовому режимі, без подачі напруги, та за умови її використання у відповідності до виконаної оптимізації засвідчують можливість суттєвого підвищення енергоефективності розглядуваних печей.

Висновки. Вперше доказано можливість і ефективність використання у якості керуючого впливу просторового електричного поля в камері печі, що підтверджує наукову новизну отриманих результатів. Практичне значення досліджень полягає у тому, що розроблений алгоритм управління є універсальним з точки зору режимів термічної обробки металу та може застосовуватись у камерних печах будь-якого промислового підприємства, при цьому за один цикл нагрівання зменшується споживання природного газу більш ніж на 10%.

Ключові слова: алгоритм управління, матриця експерименту, поліноміальна модель, оптимальні керуючі впливи.

НОМЕНКЛАТУРА

b_i – коефіцієнти моделі;

T – температура металу;

U – напруга між пальником і садкою;

$U_{\max}$ – максимальне значення напруги між пальни-

ком і садкою;

$U_{\min}$ – мінімальне значення напруги між пальником

і садкою;

ΔU – крок зміни напруги;

Q – обсяг подачі газу;

$Q_{\max}$ – максимальне значення обсягу подачі газу;

$Q_{\min}$ – мінімальне значення обсягу подачі газу;

ΔQ – крок зміни подачі газу;

τ – час нагрівання;

j – крок за часом;

$j_{\max}$ – максимальне значення кроку за часом;

$j_{\min}$ – мінімальне значення кроку за часом;

$T_{\text{зад}}$ – задана за технологічним режимом температу-
ра металу;

$\Delta T_{\text{відх}}$ – технологічно допустиме відхилення темпе-
ратури від заданої;

x – ширина заготівки;

$x_{\max}$ – максимальна ширина заготівки;

$x_{\min}$ – мінімальна ширина заготівки;

y – довжина заготівки;

$y_{\max}$ – максимальна довжина заготівки;

$y_{\min}$ – мінімальна довжина заготівки;

z – висота заготівки;

$z_{\max}$ – максимальна висота заготівки;

$z_{\min}$ – мінімальна довжина заготівки.

ВСТУП

Проблема підвищення енергоефективності камерних печей – це багатопланова задача, найбільш перспективним вирішенням якої на даний час є ефективне управління їх тепловим режимом. З цієї позиції камерні печі відносяться до класу об'єктів періодичної дії. Управління нагріванням зводиться до визначення і реалізації у часі раціональних теплових і температурних режимів, що забезпечують технологічно необхідну динаміку нагрівання металу [1, 2].

Об'єктом дослідження є процес нагрівання металу у камерній печі.

Аналіз сучасного стану роботи камерних печей свідчить про їх невідповідність технологічним вимогам до якості нагрівання металу. В наявних наукових дослідженнях, присвячених управлінню процесом термічної обробки останнього, у якості керуючого впливу використовують тільки витрату природного газу.

Предметом дослідження є енергозберігаюча система управління процесом нагрівання металу у камерній печі.

Метою даної роботи було створення алгоритму управління процесом нагрівання металу у печі з додатко-

вим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля в її камері.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай $T_{\text{зад}}$ – задана температура металу, а τ – час його нагрівання за температурно-часовим режимом. Останні жорстко регламентовані технологією за усіма фазами процесу термообробки задля досягнення необхідних теплофізичних перетворень. Тоді задача оптимізації полягає у розрахунку значень керуючих впливів для досягнення заданої динаміки температурних змін з мінімальною витратою природного газу, для чого і необхідно розробити відповідний алгоритм.

У якості керуючих впливів запропоновано використати напругу між пальником і садкою U у деякому діапазоні $U \in [U_{\min}; U_{\max}]$ та обсяг подачі газу $Q \in [Q_{\min}; Q_{\max}]$ на кожному кроці за часом $j \in [j_{\min}; j_{\max}]$. Після прорахунків оптимальних співвідношень керуючих впливів за створеним алгоритмом система управління повинна реалізувати послідовність зміни витрати природного газу та електричної напруги для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В роботі [3] математично сформульована задача конструктивної оптимізації камерної печі та на основі методу динамічного програмування створено алгоритм оптимального керування подачею газу на піч впродовж всього часу розігріву металевих виробів. Однак наведений алгоритм є досить громіздким щодо практичного використання через складність розробленої моделі. Тому більш цікавими у даному сенсі є технічно менш складний в реалізації новий спосіб управління процесом нагрівання металу.

У статті [4] вперше показано, що створення теплових бар'єрів у камерних печах за допомогою просторового електричного поля може сприяти підвищенню їх енергоефективності. Для цього використано комплекс програм, що дозволяють прогнозувати з урахуванням турбулентності потоків рух пічних газів у печі, проведено їх математичне моделювання у камері печі [5–10]. В результаті одержано картину полів швидкостей газів в робочому об'ємі та проведено аналіз щодо ефективності їх використання у зоні розташування металевих виробів, що нагріваються. Встановлено, що основна частина теплоти нагріває верхню частину печі і лише потім опускається вниз камери, де гази незначної щільності контактують з металом, при цьому більша їх кількість просто видаляється через димові вікна, не віддавши теплоти. Останнє призводить до перевитрати первинного енергоресурсу та зменшення енергетичної ефективності печі у цілому. Запропоновано створити тепловий бар'єр шляхом направлення деякої кількості останніх перпендикулярно тій їх частині, що видаляються з печі. Доказано, що реалізувати тепловий бар'єр найпростіше шляхом створення просторового електричного поля у камері печі між пальником і садкою металу. Тому дослідницький інтерес і викликає розробка інноваційного алгоритму управління нагріван-

ням металу у камерних печах, де у якості додаткового керуючого впливу буде використовуватись напруга між пальником і садкою металу, що нагрівається.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для створення зазначеного алгоритму на першому етапі були проведені експериментальні дослідження на камерній печі промислового підприємства задля встановлення взаємозв'язку між її параметрами та температурою металевих виробів, що нагріваються. Для досягнення максимальної точності прогнозування за мінімальною кількістю виконаних операцій, а також збереження статистичної достовірності результатів експерименту, було здійснено його планування за загальновідомими методиками [11].

Для розробки матриці експерименту типу 2^5 було обрано кілька факторів, які можуть впливати на розподіл температури всередині печі, а саме: витрата природного газу (Q), м³/год.; напруга між пальником і заготівкою (U), В; габарити заготовки (x, y, z), м [12]. Матрицю діапазону значень досліджуваних параметрів, що враховувались у математичній моделі наведено у табл. 1.

За результатами спланованого таким чином експерименту відповідно до складеної задля цього матриці одержано шукану поліноміальну модель у вигляді:

$$T = f(U, Q, x, y, z) = b_0 + b_1 \cdot U + b_2 \cdot Q + b_3 \cdot x + b_4 \cdot y + b_5 \cdot z + b_6 \cdot (U \cdot Q) + b_7 \cdot (U \cdot x) + b_8 \cdot (U \cdot y) + b_9 \cdot (U \cdot z) + b_{10} \cdot (Q \cdot x) + b_{11} \cdot (Q \cdot y) + b_{12} \cdot (Q \cdot z) + b_{13} \cdot (x \cdot y) + b_{14} \cdot (x \cdot z) + b_{15} \cdot (y \cdot z) + b_{16} \cdot (U \cdot Q \cdot x) + b_{17} \cdot (U \cdot Q \cdot y) + b_{18} \cdot (U \cdot Q \cdot z) + b_{19} \cdot (U \cdot x \cdot y) + b_{20} \cdot (U \cdot x \cdot z) + b_{21} \cdot (U \cdot y \cdot z) + b_{22} \cdot (Q \cdot x \cdot y) + b_{23} \cdot (Q \cdot x \cdot z) + b_{24} \cdot (Q \cdot y \cdot z) + b_{25} \cdot (x \cdot y \cdot z) + b_{26} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y) + b_{27} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot z) + b_{28} \cdot (U \cdot Q \cdot y \cdot z) + b_{29} \cdot (U \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{30} \cdot (Q \cdot x \cdot y \cdot z) + b_{31} \cdot (U \cdot Q \cdot x \cdot y \cdot z). \quad (1)$$

На рис. 1 наведено схему запропонованої системи управління камерною піччю, яка включає в себе такі основні блоки як розрахунок оптимальних керуючих впливів за цикл нагрівання, регулятори газу і напруги між пальником та заготівкою та блок визначення відхилень температури від заданої за технологічним режимом.

Таблиця 1 – Діапазон значень факторів, врахованих у математичній моделі

Фактор	Максимальне значення	Мінімальне значення
Q , м ³ /год.	$Q_{\max}$	$Q_{\min}$
U , В	$U_{\max}$	$U_{\min}$
x , м	$x_{\max}$	$x_{\min}$
y , м	$y_{\max}$	$y_{\min}$
z , м	$z_{\max}$	$z_{\min}$

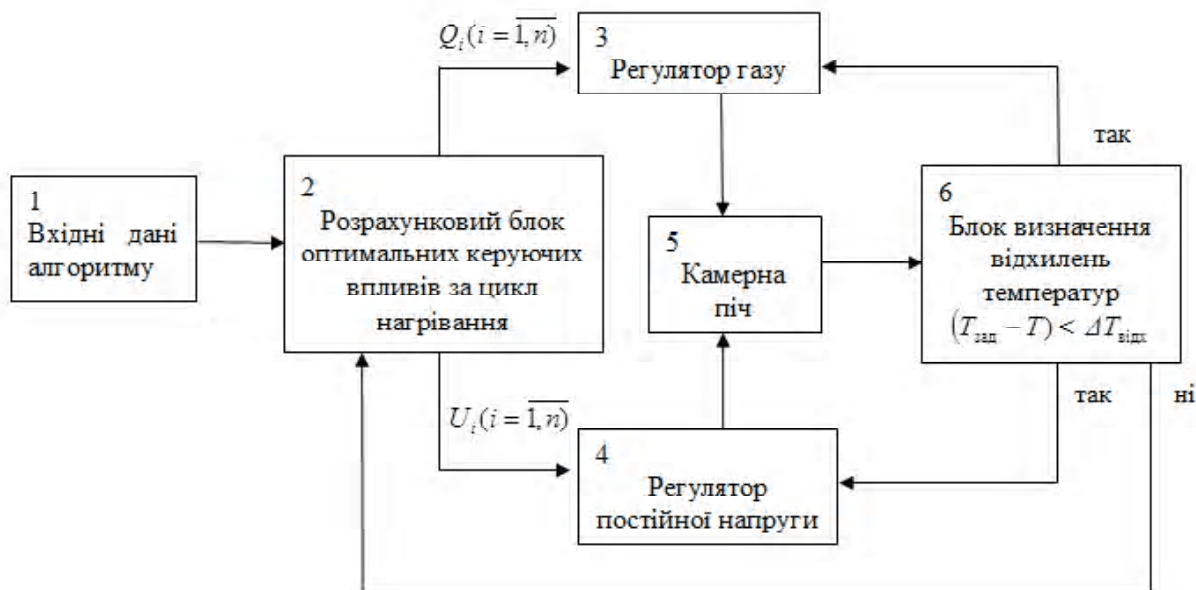


Рисунок 1 – Блок-схема системи управління камерною піччю

Функціонування запропонованої системи управління відбувається наступним чином: у розрахунковий блок 2 вводяться вхідні дані алгоритму з обмеженнями. Розрахунки для визначення оптимальних значень величини напруги та витрати природного газу на кожному кроці виконуються у блоці 2 за розробленим алгоритмом (рис. 2).

Після визначення співвідношень керуючих впливів, які забезпечують досягнення заданої температури на кожному кроці, встановлюється оптимальна послідовність зміни витрати газу та напруги за цикл, яка забезпечить виконання температурного режиму нагрівання з мінімальною витратою природного газу. Потім у відповідності до отриманої послідовності регуляторами 3 і 4 змінюється величина напруги між пальником і садкою металу та подача газу, які й забезпечують виконання заданого графіку нагрівання. У разі відповідності температури заданій, регулятори продовжують реалізовувати видану алгоритмом послідовність на наступному кроці. Якщо температура виходить за межі технологічно допустимого відхилення, процес реалізації зупиняється і проводиться визначення нових значень керуючих впливів за цим же алгоритмом на подальші кроки. Запропонована система управління є універсальною, оскільки після розрахунків видає динаміку, за якою потрібно змінювати величину постійної напруги та подачу газу на кожному часовому інтервалі для виконання заданого технологічного режиму нагрівання.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальні дослідження були проведені на реальній камерній печі відпалу з викатним подом на ТОВ «Запорізький титано-магнієвий комбінат» (ТОВ «ЗТМК»), яка призначена для термічної обробки деталей. Піч опалювалася природним газом та мала чотири працюючі інжекційні пальники. На викатний під площею близько 5м² встановлювалася електропровідна пластина, яка за розміром не перевищувала нижню площину садки металу і витримувала температуру у нагрівальній

камері. До пластини присднувався ізолюваний провідник струму, який виводився назовні так, щоб не було контакту з корпусом поду (не виникало заземлення). Садку металу масою близько 4500 кг розміщували на викатному поді таким чином, щоб між нею і пластиною зберігався електричний контакт і можна було через наявний отвір у камері печі безконтактним приладом визначити температуру садки в процесі нагріву. Інший ізолюваний провідник струму з таким же перетином закріплювався на інжекційному пальнику таким чином, щоб забезпечувався його електричний контакт з останнім. Протилежні кінці зазначених провідників струму присднувались до випрямляча з напругою (не більше 1000В) таким чином, щоб на пальнику був нульовий потенціал [13].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Графіки отриманих значень температур відпалу металу у камерній печі з викатним подом представлені на рис. 3. Температура садки металу в динаміці вимірювалась безконтактними лазерними пірометрами Optris LaserSight. На рисунку 4 показано також одержану динаміку споживання газу камерною піччю за цикл нагрівання.

Аналіз графіків, представлених на рис. 3 показує, що незначне відхилення від заданого температурно-часового режиму не порушує технології нагрівання (близько 120° за годину), швидше досягається потрібна температура металу та спостерігається більш прямолінійна крива відпалу. Все це свідчить про більшу рівномірність й забезпечення кращої якості нагрівання металу. Динаміка одержаних витрат природного газу у базовому режимі, без подачі напруги та отримана за умови подачі напруги між пальником і садкою металу у відповідності до виконаної оптимізації показано на рисунку 4. Скачки на графіках відповідають почерговому включенню та відключенню пальників. За показниками лічильників за один цикл термічної обробки у відповідності до виконаної оптимізації досягнуто скорочення споживання природного газу на 11% [14].

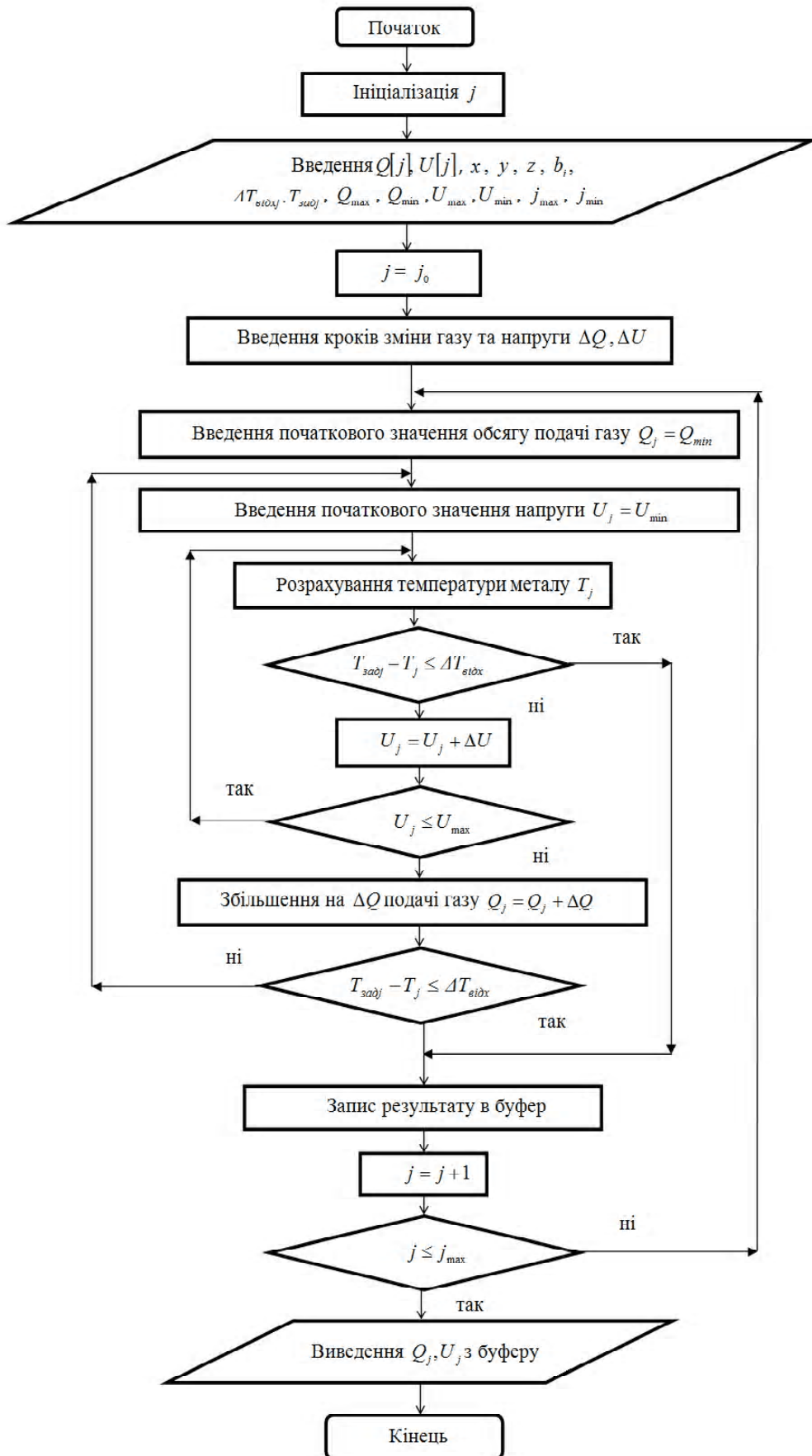


Рисунок 2 – Алгоритм управління процесом нагрівання металу у печі

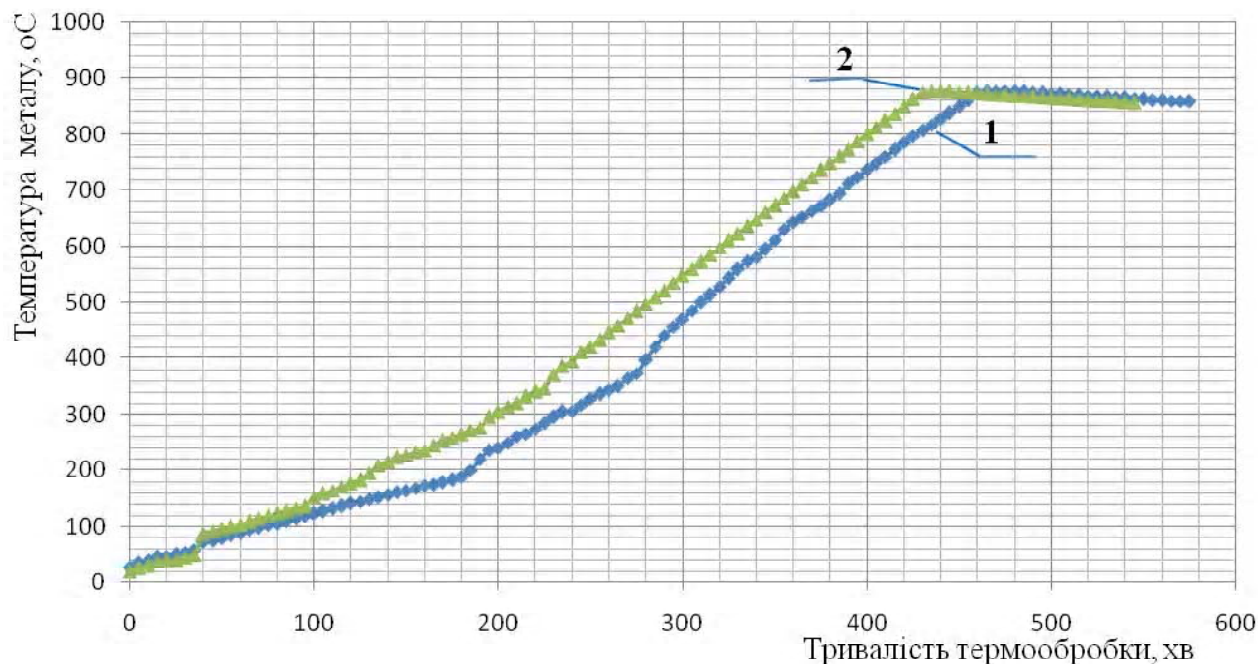


Рисунок 3 – Графіки значень температур відпалу металу у камерній печі:
1 – базовий, необхідний за технологією, 2 – при реалізації оптимальних значень керуючих впливів, отриманих за допомогою наведеного алгоритму

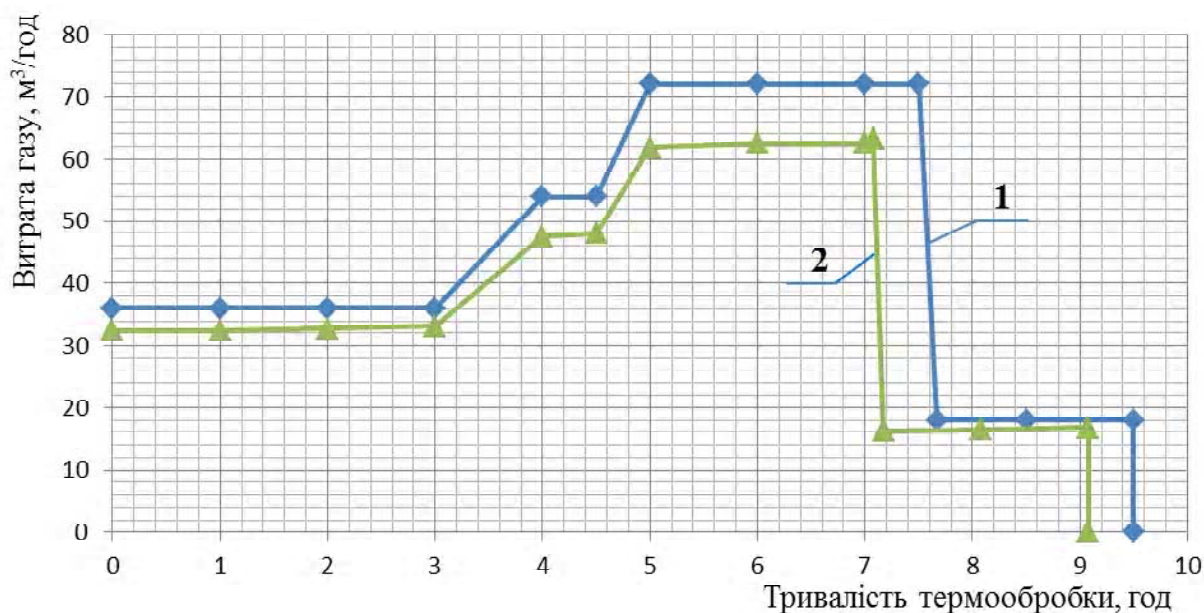


Рисунок 4 – Динаміка споживання газу камерною піччю:
1 – базова, без подачі напруги, 2 – отримана за умови подачі напруги між пальником і садкою металу у відповідності до виконаної оптимізації

6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонований алгоритм управління процесом нагрівання металу з додатковим використанням у якості керуючого впливу просторового електричного поля, який дозволяє суттєво підвищити енергоефективність камерної печі порівняно з алгоритмом конструктивної оптимізації камерних печей на основі переміщення витяжних вікон та місць розташування пальників [3] простіший за технічною реалізацією. Перевагою розробле-

ного алгоритму є те, вперше у якості додаткового керуючого впливу використовується просторове електричне поле, створення якого на реальному підприємстві не потребує значних капіталовкладень та зовнішніх теплоутилізаторів, оскільки теплота продуктів згоряння, що раніше втрачалась з відхідними газами використовується безпосередньо у процесі термічної обробки, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності установок у цілому.

ВИСНОВКИ

Згідно з поставленою у цій роботі метою, вирішено задачу щодо розробки інноваційного алгоритму управління процесом нагрівання металу у камерній печі, який підвищує її енергоефективність. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше доказано можливість використання у якості керуючого впливу просторового електричного поля, що створюється в її камері. Розроблений алгоритм управління є універсальним з точки зору режимів термічної обробки металу та може застосовуватись у камерних печах будь-якого промислового підприємства. При цьому за один цикл термічної обробки можливо скоротити споживання природного газу більш ніж на 10%, що підтверджує його практичну доцільність.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Запорізької державної інженерної академії «Розроблення технології та організація промислового виробництва композиційних матеріалів, стійких в умовах дії високих температур та агресивних середовищ, для авіаційної та космічної техніки» (номер державної реєстрації 011U004839).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Анализ методов математического моделирования процессов теплообмена в промышленных печах для нагрева металла / [В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, Д. В. Менделеев, П. Э. Ратников] // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 2 (85). – С. 102–107.
2. Поливанчук А. С. Моделирование процесса нагрева металла в камерной печи при минимизации расхода топлива / А. С. Поливанчук, С. В. Василец // *Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих : Збірник наукових праць XI науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17–20 травня 2011 р.* – Донецьк, ДонНТУ, 2011. – С. 64–68.
3. Качан Ю. Г. Оптимальное управление камерной нагревательной печью по энергосберегающему критерию / Ю. Г. Качан, В. В. Степкин, Ю. Б. Лиуш // *Гірнича електромеханіка та автоматика*. – 2013. – № 91. – С. 143–147.
4. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових переходів у камерних печах / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 1. – С. 18–23.
5. Сибір А. В. Моделирование теплообмена в камерной печи с центральной регенеративной горелкой / А. В. Сибір, С. И. Решетняк, В. И. Губинский // *Вісник Дніпропетровського університету. Серія Механіка*. – 2007. – № 2/1. – С. 131–139.
6. Development of turbulence models for shear flows by a double technique: [V. Yakhot, S. Orszag, S. Thangam et. al.] // *Phys. Fluids A*. – 1992. – Vol. 4, № 7. – P. 1510–1520. DOI:10.1063/1.858424.
7. Launder B. E. The numerical computation of turbulent flow / B. E. Launder, D. B. Spalding // *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* – 1974. – Vol. 3. – P. 269–289.
8. Dulikravich G. S. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields / G. S. Dulikravich, M. J. Colaco // *Journal of Enhanced Heat Transfer*. – 2006. – Vol. 13 (2). – P. 139–155.
9. Huang M. Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy / Meirong Huang. – Norman : The University of Oklahoma, 2005. – 152 p.
10. Mahmoudi S. R. Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy / Mahmoudi Seyed Reza. – London : The University of Western Ontario, 2012. – 253 p.
11. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
12. Качан Ю. Г. Методика визначення оптимальних енергетичних параметрів термічної печі, що працює на біогазовій суміші за умови наявності в її камері просторового електричного поля / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Металургія : наукові праці Запорізької державної інженерної академії*. – 2016. – 35 (1). – С. 88–91.
13. Пат. 116305 Україна МПК 2007 C21D 9/00. Спосіб термічної обробки металу у камерних печах періодичної дії / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, В. Л. Коваленко (Україна) ; заявник Запорізька державна інженерна академія. – u201612960 ; заявл. 19.12.2016 ; опубл. 10.05.2017, Бюл. № 9 – 4 с.
14. Качан Ю. Г. Визначення економії споживання промисловим підприємством природного газу за наявності у робочих об'ємах його камерних печей просторового електричного поля / Ю. Г. Качан, В. Л. Коваленко, А. А. Візер // *Енергетика : економіка, технології, екологія*. – 2017. – № 1. – С. 91–94.

Стаття надійшла до редакції 23.08.2017.
Після доробки 11.10.2017.

Качан Ю. Г.¹, Ерофеева А. А.²

¹Д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедрою електротехніки та енергоефективності Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

²Асистент кафедри електротехніки та енергоефективності Запорізької державної інженерної академії, Запоріжжя, Україна

ИННОВАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НАГРЕВАНИЯ МЕТАЛЛА В ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

Актуальность. В работе решена актуальная задача разработки инновационной системы управления процессом нагревания металла в камерной печи.

Цель – разработка алгоритма управления процессом нагревания металла с дополнительным использованием в качестве управляющего воздействия пространственного электрического поля в камере печи.

Метод. По общеизвестным методикам планирования эксперимента получена регрессионная модель реальной камерной печи с учетом величины напряжения между горелкой и садкой металла, которая и положена в основу алгоритма.

Результаты. Разработана система управления камерной печью, в которой по созданному алгоритму определяются оптимальные значения управляющих воздействий на каждом шаге цикла нагрева. Предложенная система управления является универсальной, поскольку после просчетов выдает динамику, по которой нужно менять величину постоянного напряжения и подачу газа с шагом по времени j для выполнения любого заданного режима термической обработки металла. Проведенные экспериментальные исследования на реальной камерной печи с выкатным подом на ООО «Запорожский титано-магний комбинат» это подтвердили. Анализ полученных графиков изменения температуры отжига металла показал, что при реализации оптимальных значений управляющих воздействий,

полученных с помощью разработанного алгоритма, наблюдается высокая равномерность и обеспечивается лучшее качество нагрева металла. Динамика потребления газа камерной печью за цикл нагрева в базовом режиме, без подачи напряжения, и при условии его использования в соответствии с выполненной оптимизацией свидетельствуют о возможности существенного повышения энергоэффективности рассматриваемых печей.

Выводы. Впервые доказано возможность и эффективность использования в качестве управляющего воздействия пространственно-го электрического поля в камере печи, что подтверждает научную новизну полученных результатов. Практическое значение исследований заключается в том, что разработанный алгоритм управления является универсальным с точки зрения режимов термической обработки металла и может применяться в камерных печах любого промышленного предприятия, при этом за один цикл нагревания уменьшается потребление природного газа более чем на 10%.

Ключевые слова: алгоритм управления, матрица эксперимента, полиномиальная модель, оптимальные управляющие воздействия.

Kachan Y. G.¹, Yerofieieva A. A.²

¹Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Electrical engineering and energy efficiency of Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya, Ukraine

²Assistant of the Department of Electrical engineering and energy efficiency of Zaporizhzhya State Engineering Academy, Zaporizhzhya, Ukraine

THE INNOVATIVE CONTROL OF THE HEATING UP PROCESS OF THE METAL IN THE FURNACE USING SPATIAL ELECTRIC FIELD

Context. The actual task of developing an innovative control system for the process of metal heating up in the chamber furnace has been solved in the work.

Objective is a creation of an algorithm for the controlling of the heating up of the metal with additional use as the controlling influence of a spatial electric field in the furnace chamber.

Method. A regression model of a real chamber furnace was obtained using well-known experimental design techniques. The model is the basis of the algorithm and takes into account the magnitude of the voltage between the burner and the metal cage.

Results. A control system for the chamber furnace has been developed, in which the optimal values of control actions at each step of the heating cycle are determined according to the created algorithm. The proposed control system is universal, it gives the dynamics of the change in the constant voltage and the gas supply in steps in time j to perform any given mode of heat treatment of the metal. The carried out experiments on a real chamber furnace with a withdrawable hearth at OOO «Zaporizhzhya Titanium and Magnesium Plant» have confirmed this. Analysis of the obtained graphs of the annealing temperature of the metal. There is a high uniformity and a better quality of metal heating when implementing the optimal values of control actions obtained with the help of the algorithm. The dynamics of gas consumption by the chamber furnace during the heating cycle is shown in accordance with the optimization performed without the supply of voltage and with the supply of voltage. The obtained data testify to the possibility of a significant increase in the energy efficiency of the furnaces in question.

Conclusions. For the first time, the possibility and efficiency of using a spatial electric field in the furnace chamber as a control action has been proved, which confirms the scientific novelty of the results obtained. The developed control algorithm is universal from the viewpoint of thermal treatment of metal and can be used in chamber furnaces of any industrial enterprise. During one heating cycle, natural gas consumption is reduced by more than 10%, which confirms the practical importance of research.

Keywords: control algorithm, experiment matrix, polynomial model, optimal control actions.

REFERENCES

1. Timoshpol'skij V. I., Trusova I. A., Mendelev D. V., Ratnikov P. Je. Analiz metodov matematicheskogo modelirovaniya processov teploobmena v promyshlennyyh pechah dlja nagreva metala, *Lit'e i metallurgija*, 2012, No. 2(85), pp. 102–107.
2. Polivanchuk A. S., Vasilec S. V. Modelirovanie processa nagreva metalla v kamernoj pechi pri minimizacii rashoda topliva, *Avtomatizacija tehnologichnih ob'ektiv ta procesiv. Poshuk molodih. / Zbirnik naukovih prac' HI nauково-technichnoï konferencii aspirantiv ta studentiv v m. Donec'ku 17–20 travnja 2011 r. Donec'k, DonNTU*, 2011, pp. 64–68.
3. Kachan Ju. G., Stepkin V. V., Liush Ju. B. Optimal'noe upravlenie kamernoj nagrevatel'noj pech'ju po jenergosberegajushemu kriteriju, *Girnichna elektromehanika ta avtomatika*, 2013, No. 91, pp. 143–147.
4. Kachan Ju. G., Vizer A. A., Sibir A. V. Zastosuvannja prostorovih elektrichnih poliv zadlja stvorennja teplovih pereshkod u kamernih pechah, *Elektrotehnika ta elektroenergetika*, 2017, No. 1, pp. 18–23.
5. Sibir A. V. Reshetnjak S. I., Gubinskij V. I. Modelirovanie teploobmena v kamernoj pechi s central'noj regenerativnoj gorelkoj, *Visnik Dnipropetrovs'kogo universitetu. Serija Mehanika*, 2007, No. 2/1, pp. 131–139.
6. Yakhot V., Orszag S., Thangam S. et. al. Development of turbulence models for shear flows by a double technique, *Phys. Fluids A*, 1992, Vol. 4, No. 7, pp. 1510–1520. DOI:10.1063/1.858424.
7. Launder B. E., Spalding D. B. The numerical computation of turbulent flow, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, 1974, Vol. 3, pp. 269–289.
8. Dulikravich G. S., Colaco M. J. Convective heat transfer control using magnetic and electric fields, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, 2006, Vol. 13 (2), pp. 139–155.
9. Huang M. Ehd-enhanced heat and mass transfer: dissertation ... doctor of philosophy. Norman, The University of Oklahoma, 2005, 152 p.
10. Mahmoudi S. R. Electrohydrodynamic enhancement of heat transfer and mass transport in gaseous media, bulk dielectric liquids and dielectric thin liquid films: dissertation ... doctor of philosophy. London: The University of Western Ontario, 2012, 253 p.
11. Adler Ju. P., Markova E. V., Granovskij Ju. V. Planirovanie jeksperimenta pri poiske optimal'nyh uslovij [Tekst]. Moscow, Nauka, 1976, 279 p.
12. Kachan Ju. G., Kovalenko V. L., Vizer A. A. Metodika viznachennja optimal'nih energetichnih parametriv termichnoï pechi, shho pracuje na biogazovij sumishi za umovi najavnosti v ii kameri prostorovogo elektrichnogo polja, *Metallurgija : naukovі praci Zaporiz'koï derzhavnoï inzhenernoï akademii*, 2016, 35 (1), pp. 88–91.
13. Kachan Ju. G., Vizer A. A., Kovalenko V. L. Pat. 116305 Ukraïna MPK 2007 C21D 9/00. Cposib termichnoï obrobki metalu u kamernih pechah periodichnoï dii / (Ukraïna) ; zajavnik Zaporiz'ka derzhavna inzhenerna akademija. u201612960 ; zajavl. 19.12.2016 ; opubl. 10.05.2017, Bjul. № 9, 4 p.
14. Kachan Ju. G., Kovalenko V. L., Vizer A. A. Viznachennja ekonomii spozhivannja promislivim pidpriemstvom prirodnoho gazu za najavnosti u robochih ob'emah jogo kamernih pechej prostorovogo elektrichnogo polja, *Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija*, 2017, No. 1, pp. 91–94.

АЛГОРИТМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ СИНТЕЗА СИСТЕМ ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЫ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОРСКИМИ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Актуальность. Для решения задач повышения уровня автоматизации процессов управления морскими подвижными объектами при маневрировании и динамическом позиционировании предложены алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем с переменной структурой обратных связей для заданной размерности модели объекта, требуемого вида траекторий стабилизации и ограничений на управляющие воздействия. Объектом исследования являются динамические процессы стабилизации морских подвижных объектов в условиях неполной информативности моделей и среды. Предметом исследований есть автоматизированные алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с переменной структурой обратных связей.

Цель работы – повышение уровня автоматизации и показателей качества процессов управления морскими подвижными объектами на основе создания автоматизированных процедур синтеза робастно-оптимальных систем.

Метод. Для оптимизации процессов управления формируются оптимальные траектории стабилизации, определяются необходимые моменты переключения и вид управляющих функций в цепях обратных связей. Рассматриваются нелинейные модели морских подвижных объектов с учетом неполной информативности параметров модели и внешних возмущающих воздействий. Предложено использование робастного корректирующего контура управления, обеспечивающего компенсацию отклонения текущей траектории физического объекта от оптимальной траектории, которое возникает вследствие рассогласования параметров модели и физического объекта, а также влияния неконтролируемых возмущений. Таким образом, достигается инвариантность системы управления к неполной информативности моделей и минимальные значения ошибок управления.

Результаты. Разработанные алгоритмические процедуры синтеза робастно-оптимальных систем переменной структуры программно реализованы и исследованы при имитационном моделировании процесса стабилизации морского подвижного объекта на заданной траектории, результаты которого подтвердили корректность и эффективность предложенного подхода.

Выводы. На основе систем с переменной структурой обратных связей для критерия оптимальности по максимальному быстродействию разработаны алгоритмические процедуры автоматизированного синтеза управляющих функций для многомерных нелинейных систем, описывающих динамику морских подвижных объектов. Созданные программные средства автоматизации процесса синтеза и схемные решения систем управления практически применимы для широкого класса подвижных объектов различного технического назначения.

Ключевые слова: робастно-оптимальное управление, системы с переменной структурой обратных связей, морской подвижный объект.

НОМЕНКЛАТУРА

БКП – блок ключей переключения;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор;

A^* – матрица, полученная из матрицы $A(V)$ линеаризацией в окрестностях начального значения $V(0)$;

a_{ij}, b_{ij}, c_{ij} – параметры матриц $A(V)$, B и C соответственно;

$A(V)$, B , C – матрицы параметров, зависящих от координат, инерционных и аэродинамических коэффициентов соответственно;

$E(t)$ – вектор ошибок;

$F(t)$ – вектор сил и момента внешних возмущений;

G_1, G_2 – положительно определенные симметричные матрицы весовых коэффициентов;

q_1, q_2, s_1, s_2 – приведенные коэффициенты модели судна;

$T_x(t), T_y(t), T_\omega(t)$ – управляющие силы и момент;

t_i^s – момент переключения управлений на i -ом отрезке траектории;

$t_{0m}^s, t_{1m}^s, t_{2m}^s, T_m$ – моменты времени начала движения, переключений управляющих функций и окончания

движения, соответственно, определяемые для каждого из m отрезков маневрирования;

$U(t)$ – вектор управляющих сил и момента;

$v_x(t), v_y(t), \omega(t)$ – координаты морского подвижного объекта;

$V(t)$ – вектор координат морского подвижного объекта;

$V(t_i^s)$ – значения вектора координат в i -ый момент переключения;

(m)

$V_{\max}$ – максимальное значение максимального порядка производной вектора координат;

α – угол перекладки пера руля;

σ – дисперсия волновых ординат;

ω – угловая скорость судна;

$\Psi(t)$ – угол курса судна.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение движения по оптимальным траекториям стабилизации и точного позиционирования морских подвижных объектов в условиях неопределенности и с учетом функциональных ограничений требует усовершенствования и практической реализации принципов робастно-оптимального управления, которое обеспечивает решение соответствующих функциональных задач

в режиме реального времени [1]. Морские подвижные объекты, которые функционируют на границе раздела возмущенных воздушной и жидкостной сред, описываются многомерными нелинейными стохастическими дифференциальными системами уравнений. Основные общеприменимые упрощения для рассматриваемых функциональных задач управления морскими подвижными объектами включают: стационарность внешних случайных возмущений, горизонтальную плоскость динамических колебаний объекта и ряд других допущений [2, 3]. Формирование управляющих воздействий в системах динамического позиционирования, при применении классических методов оптимального управления, для нелинейных систем приводит к определенным вычислительным сложностям, которые связаны с необходимостью [4, 5] решения краевых задач высокого порядка, решения многомерных нестационарных матричных уравнений Рикатти, корректной формализации матриц весовых коэффициентов, используемых для квадратичных критериев оптимальности.

Объектом исследования являются динамические процессы стабилизации морских подвижных объектов в условиях неполной информативности моделей и окружающей среды. Предметом исследований есть автоматизированные алгоритмические процедуры синтеза оптимальных по быстродействию систем управления с переменной структурой обратных связей. Цель работы – повышение уровня автоматизации и показателей качества процессов управления морскими подвижными объектами на основе создания автоматизированных процедур синтеза робастно-оптимальных систем.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Морской подвижный объект функционирует в условиях недостаточной априорной информации о параметрах объекта и действия неконтролируемых случайных внешних возмущений (нерегулярного морского волнения, пульсаций ветра) и параметрических шумов, обусловленных качкой объекта. Требования к максимальному быстродействию и точности управления морским подвижным объектом определяются необходимостью обеспечения безопасности мореплавания и выполнения условий рабочего технологического процесса. Одним из возможных направлений создания эффективных структур и алгоритмов робастно-оптимального синтеза нелинейных систем управления морскими подвижными объектами является применение структур переменных обратных связей, при этом ставится задача разработки автоматизированных алгоритмических процедур синтеза для заданной размерности моделей объектов, различного вида граничных условий и траекторий стабилизации с учетом ограничений на управляющие воздействия. Критерий оптимальности задает требование минимального времени T переходного процесса, а инвариантность системы к неполной информативности модели, должна с минимальными значениями ошибок и их производных обеспечиваться контурами робастной коррекции.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Эффективные подходы для решения задач робастно-оптимального управления подвижными объектами, ис-

пользующие фундаментальные свойства обратных связей [6,7] приводят к статическим решениям [8], которые не всегда обеспечивают требуемые показатели качества управления. Применение принципов решения обратных задач динамики и структурного синтеза [9] не позволяют оптимизировать параметры программных (назначенных) траекторий. Широкое применение ПИД-регуляторов [10] также имеет определенные недостатки: значительная сложность настройки параметров регулятора при увеличении количества управляемых переменных; высокий уровень затрат энергии; чувствительность к влиянию параметрических шумов; появление интегрального насыщения в контурах; необходимость калибровки системы.

Реализация высокотехнологических функциональных требований при маневрировании и позиционировании морских подвижных объектов может быть осуществлена на применении прикладных систем управления с переменной структурой на основе специальных переключающихся обратных связей. Эти системы обеспечивают минимизацию энергозатрат или максимальное быстродействие, для конкретной функциональной задачи (рабочего технологического или переходного критического режимов) управления морскими подвижными объектами, с требуемой точностью управления и достаточной инвариантностью к неопределенности объектов и окружающей среды [11–13]. Робастно-оптимальное управление предполагает оптимальную систему управления как эталонную модель, сформированную на основе априорной информации о параметрах объекта и контролируемых (измеряемых) возмущениях. Робастное управление обеспечивает компенсацию отклонения текущей траектории физического объекта от оптимальной траектории, возникающей вследствие рассогласования параметров модели и физического объекта, а также влияния неконтролируемых возмущений.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый подход базируется на использовании обратных связей с переменной структурой и включает следующие основные этапы: планирование оптимальной траектории; синтез управляющих функций и определение моментов их переключения в соответствующих цепях обратной связи многомерного объекта, изложенные для линейных моделей в [11–13].

Планирование траектории динамического объекта (в общем случае нелинейного нестационарного вида), для заданных критериев оптимальности и граничных условий, заключается в определении необходимого количества отрезков траектории с постоянными значениями соответствующих производных координат состояния, а также моментов времени переключения управляющих функций в цепях обратных связей при переходе с начального отрезка на заданный отрезок траектории. Переключение управляющих функций изменяет структурную конфигурацию обратных связей и решает задачу обеспечения оптимальной траектории объекта с требуемым порядком производной координаты состояния с соответствующим позитивным или негативным постоянным значением.

Синтез управляющих функций определяется на основе уравнений соответствующего баланса сил (момен-

тов) и их производных, при которых на определенных отрезках траектории выполняются условия постоянства соответствующих производных координат состояния. При этом можно сделать обобщенный вывод относительно прямых условий оптимальности для построения траекторий морского подвижного объекта в координатной форме при положительных значениях производных вектора координат состояния. Траектория для заданных граничных условий будет оптимальной по быстродействию при движении с максимальным порядком максимальных значений производных вектора координат состояния, с учетом ограничений на управляющее воздействие, при этом данная траектория будет с наибольшим расходом энергии. Моменты переключения управляющих функций в обратных связях рассчитываются путем решения системы алгебраических уравнений, составленных на основе вида планируемых оптимальных траекторий, с учетом ограничений на управляющее воздействие и заданных граничных условий [13].

Динамику морского подвижного объекта в наиболее обобщенном виде для систем динамического позиционирования с учетом общепринятых допущений о колебаниях в горизонтальной плоскости можно представить в векторно-матричной форме [2, 13]

$$\dot{\mathbf{V}}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}(\mathbf{V})\mathbf{U}(t) + \mathbf{CF}(t), \quad (1)$$

$$\text{где } \mathbf{V}(t) = \begin{bmatrix} v_x(t) & v_y(t) & \omega(t) \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{U}(t) = \begin{bmatrix} T_x(t) & T_y(t) & T_\omega(t) \end{bmatrix}^T; \quad \mathbf{F}(t) = \begin{bmatrix} f_x(t) & f_y(t) & f_\omega(t) \end{bmatrix}^T;$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{V}) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12}\omega & a_{13}\omega \\ a_{21}\omega & a_{22} & a_{23} \\ a_{31}v_y & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & 0 \\ 0 & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & 0 & 0 \\ 0 & c_{22} & 0 \\ 0 & 0 & c_{33} \end{bmatrix}.$$

Предполагается, что измеряемые внешние возмущения (ветровое воздействие, морское течение) учитываются в модели морского подвижного объекта и, таким образом, формируется соответствующее управление, компенсирующее их влияние. Компенсация неконтролируемого (неизмеряемого) внешнего возмущения (нерегулярного морского волнения) осуществляется введением корректирующего робастного канала управления.

Для формирования управляющих функций с учетом измеряемых значений управления сформируем уравнения баланса сил (моментов) для второй и третьей производных координат состояния для нелинейных стационарных моделей морских подвижных объектов (1) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}}(t) + \dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t), \\ \ddot{\mathbf{V}}(t) &= \mathbf{A}(\mathbf{V})\ddot{\mathbf{V}}(t) + 2\dot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\dot{\mathbf{V}}(t) + \ddot{\mathbf{A}}(\mathbf{V})\mathbf{V}(t) + \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Векторно-матричные преобразования системы (2) (обозначив матрицу $\mathbf{A}(\mathbf{V})$ как $\mathbf{A}_V$) дают выражения уп-

равлений для нулевых векторов соответствующих второй и третьей производных координат состояния

$$\begin{aligned} \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}_V\mathbf{B}\mathbf{U}(t) &= -(\dot{\mathbf{A}}_V + \mathbf{A}_V^2)\mathbf{V}(t) + \mathbf{A}_V\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t), \\ \mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + \mathbf{A}_V\mathbf{B}\ddot{\mathbf{U}}(t) + (\mathbf{A}_V^2 + 2\dot{\mathbf{A}}_V\mathbf{B})\mathbf{U}(t) &= \\ = -(\mathbf{A}_V^3 + 2\dot{\mathbf{A}}_V\mathbf{A}_V + \mathbf{A}_V\ddot{\mathbf{A}}_V + \ddot{\mathbf{A}}_V)\mathbf{V}(t) + \\ + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t) + \mathbf{A}_V\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t) + 2\dot{\mathbf{A}}_V\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, уравнения (3) формируют управление, которые определяют баланс приведенных сил (моментов) управления и демпфирования (т.е. балансировочный режим), для движения по соответствующим отрезкам траекторий с нулевыми значениями вектора координат $\ddot{\mathbf{V}}(0) = 0$ и $\ddot{\mathbf{V}}(0) = 0$ соответственно.

Моменты переключения управляющих функций являются статическими точками, для которых конечные значения переменных состояния для i -го отрезка траектории определяют совместно с новым значением высшей производной координаты, определенным на основе сформированных отрезков оптимальной траектории, начальные значения $(i+1)$ -го отрезка траектории. Необходимые начальные значения управляющих функций для обеспечения движения морского подвижного объекта с заданными начальными условиями ($\mathbf{V}(t_i^s)$, $\dot{\mathbf{V}}(t_i^s)$, $\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s)$) по соответствующему отрезку траектории получим из следующих алгебраических соотношений

$$\begin{aligned} \mathbf{U}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{A}_V(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t_i^s)], \\ \dot{\mathbf{U}}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \dot{\mathbf{A}}_V(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \mathbf{A}_V(t_i^s)\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t_i^s)], \\ \ddot{\mathbf{U}}(t_i^s) &= \mathbf{B}^{-1}[\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \ddot{\mathbf{A}}_V(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) - \\ - 2\dot{\mathbf{A}}_V(t_i^s)\dot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{A}_V(t_i^s)\ddot{\mathbf{V}}(t_i^s) - \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t_i^s)]. \end{aligned} \quad (4)$$

С учетом заданных ограничений на управляющее воздействие (максимальные, физически реализуемые начальные значения управляющих функций), максимальные начальные значения первой и второй производной вектора координат состояния морского подвижного объекта будут иметь вид

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_{\max}(t_i^s) &= \mathbf{A}_V(t_i^s)\mathbf{V}(t_i^s) + \mathbf{B}\mathbf{U}_{\max}(t_i^s) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t_i^s), \\ \ddot{\mathbf{V}}_{\max}(t_i^s) &= (\mathbf{A}_V^2 + \dot{\mathbf{A}}_V)\mathbf{V}(t_i^s) + \mathbf{B}\dot{\mathbf{U}}_{\max}(t_i^s) + \\ + \mathbf{A}_V\mathbf{B}\mathbf{U}_{\max}(t_i^s) + \mathbf{A}_V\mathbf{C}\dot{\mathbf{F}}(t_i^s) + \mathbf{C}\ddot{\mathbf{F}}(t_i^s). \end{aligned}$$

Таким образом, формируется система управления с переменной структурой обратных связей (структурная схема представлена на рис. 1 для канала управления с нулевой третьей производной вектора координат состояния объекта управления) обеспечивающая, при определенном положении ключа БКП, отрезки траектории с соответствующими нулевыми производными вектора координат состояния.

Решение задачи робастного управления морским подвижным объектом, в условиях неполной определен-

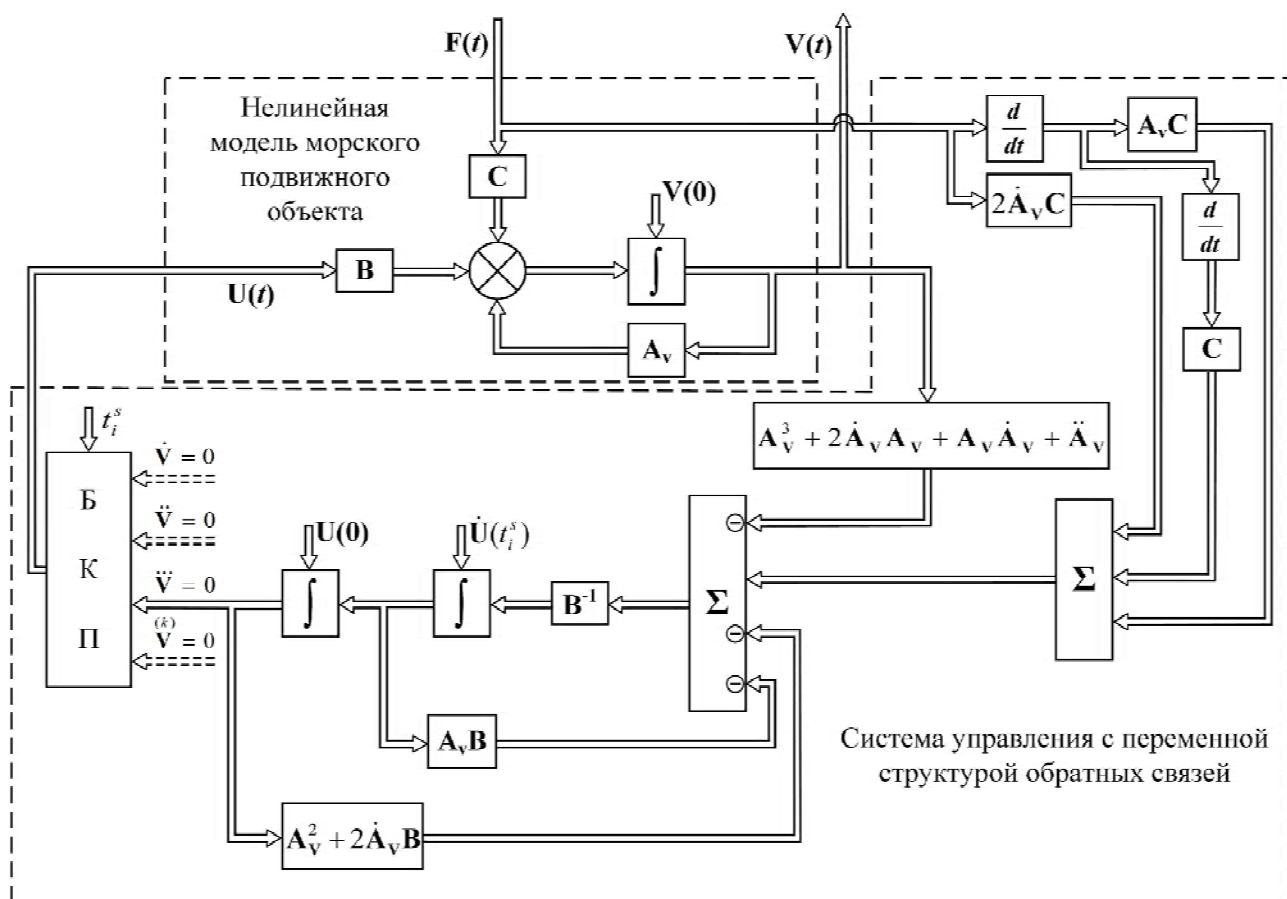


Рисунок 1 – Структурная схема системы управления с переменной структурой обратных связей

ности, базируется на использовании системы переменной структуры, которая формирует оптимальную (эталонную) модель управляемого движения объекта с учетом контролируемых внешних возмущений. Управляющий сигнал с оптимальной модели поступает на вход физического морского подвижного объекта и далее, в контуре робастного управления, формируется корректирующий сигнал на основе сравнения сигнала с выхода оптимальной модели с сигналом на выходе физического объекта управления. На основе анализа функций чувствительности ошибок системы к определенным интервалам разброса параметров, действию параметрических шумов и ограниченных внешних возмущений в работе [11] показано, что использование сигнала оптимального управления $U_m(t)$, сформированного в оптимальной модели, обеспечивает требуемую инвариантность системы для ограниченных значений рассогласования параметров без значительного коэффициента усиления в робастном контуре.

Данный подход предполагает линеаризацию уравнений для вектора ошибок и применение принципа суперпозиции для получаемых линейных уравнений. При этом оптимальные управление и траектории формируются с учетом нелинейности модели, а невязка, возникающая вследствие линеаризации, является дополнительной неопределенностью, требующей коррекции при управлении.

Дифференциальное уравнение (1) с учетом робастного контура примет вид

$$\dot{V}(t) = A^* V(t) + B[U_m(t) + U_k(t)] + CF(t). \quad (5)$$

Для оптимальной модели запишем

$$\dot{V}_m(t) = A^* V_m(t) + BU_m(t) + CF(t). \quad (6)$$

При определении корректирующего сигнала на основе уравнений (5, 6) получим приближенное выражение для вектора ошибок $E(t)$

$$\dot{E}(t) \approx A^* E(t) - BU_k(t). \quad (7)$$

При условии для вектора ошибок

$$G_1 E(t) + \dot{E}(t) = 0$$

и положительно определенной симметричной матрице весовых коэффициентов G_1 получим для корректирующего управления с учетом (7) следующее выражение

$$U_k(t) = B^{-1}(A^* + G_1)E(t). \quad (8)$$

Условие для вектора ошибок

$$G_2 E(t) + G_1 \dot{E}(t) + \ddot{E}(t) = 0$$

и положительно определенных симметричных матрицах весовых коэффициентов G_1 и G_2 формирует корректирующее управление вида

$$B\dot{U}_k(t) + (G_1 + A^*)BU_k(t) = [(A^*)^2 + G_1A^* + G_2]E(t). \quad (9)$$

При решении практических задач динамического позиционирования необходимо компенсировать отклонение морского подвижного объекта от центра позиционирования за минимальный интервал времени. Переход динамического объекта с начального отрезка на заданный отрезок траектории с учетом требований физической реализуемости управляющих воздействий описывается следующими уравнениями

$$\begin{aligned} V(t_i^s) &= V(t_{i-1}^s) + \dots + V^{(m-1)}(t_{i-1}^s) \frac{(t_i^s - t_{i-1}^s)^{m-1}}{(m-1)!} \pm \\ &\pm V_{\max}^{(m)}(t_{i-1}^s) \frac{(t_i^s - t_{i-1}^s)^m}{m!}, \\ \dot{V}(t_i^s) &= \dot{V}(t_{i-1}^s) + \dots + V^{(m-1)}(t_{i-1}^s) \frac{(t_i^s - t_{i-1}^s)^{m-2}}{(m-2)!} \pm \\ &\pm V_{\max}^{(m)}(t_{i-1}^s) \frac{(t_i^s - t_{i-1}^s)^{m-1}}{(m-1)!}, \\ &\dots\dots\dots, \\ V^{(m-1)}(t_i^s) &= V^{(m-1)}(t_{i-1}^s) \pm V_{\max}^{(m)}(t_{i-1}^s)(t_i^s - t_{i-1}^s). \quad (10) \end{aligned}$$

Введение ограничений на управляющее воздействие задает количество возможных производных управляемой координаты, что влияет на вид оптимальной траектории и значительно усложняет ее расчет. Для заданных граничных условий и значений производных вектора координат объекта, определенных с учетом ограничений на управление, на основе решения систем алгебраических уравнений вида (10) разработаны алгоритмы, включающие для многомерной системы введение ведущих, субведущих и ведомых переменных, формирование последовательности моментов времени переключения управляющих функций в обратных связях объекта управления [13].

Автоматизированный расчет параметров оптимальной траектории (состоящей из трех участков), моментов переключения и значений управляющих функции в переменной структуре обратных связей осуществляется на основе программного модуля, представленного на рис. 2.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Рассмотрим моделирование процесса стабилизации угла курса судна, управляемого пером руля [2]

$$\ddot{\omega}(t) + q_1 \dot{\omega}(t) + q_2 \omega(t) | \omega(t) | = s_1 \dot{\alpha}(t) + s_2 \alpha(t), \dot{\psi}(t) = \omega(t), \quad (11)$$

где $q_1 = 0,084$; $q_2 = 0,03$; $s_1 = 0,0063$; $s_2 = 0,0002$.

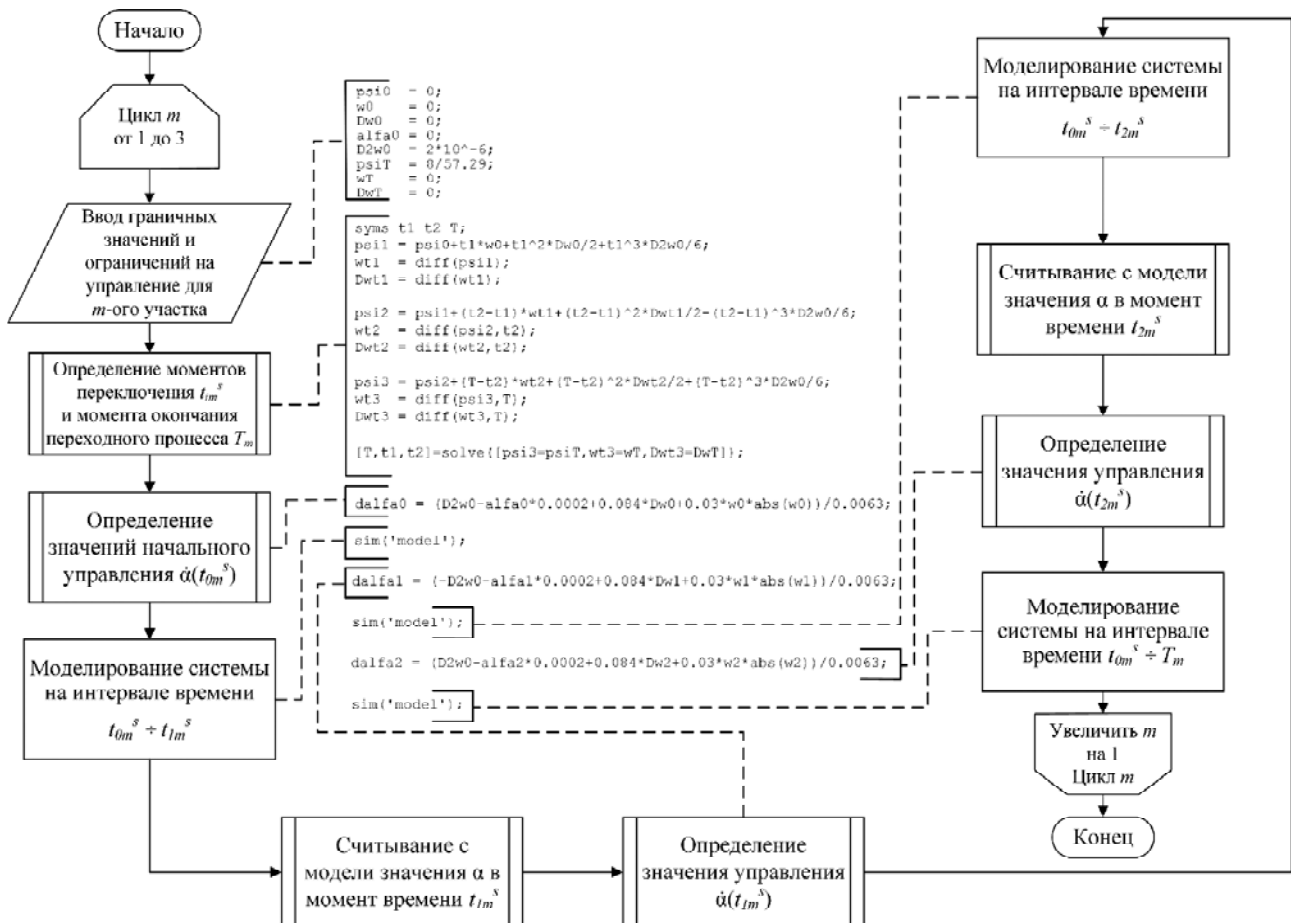


Рисунок 2 – Программный модуль автоматизированной процедуры синтеза системы управления морским подвижным объектом

Сформируем траекторию стабилизации судна при нулевой третьей производной $\ddot{\omega}$ ($\ddot{\omega}(t) = \pm \text{const}$), состоящую из трех отрезков ($m = 3$) маневрирования для следующих граничных условий:

Граничные условия:

$$I) \psi(0) = 0, \omega(0) = 0, \dot{\omega}(0) = 0, |\ddot{\omega}(0)| = 2 \cdot 10^{-6} c^{-3},$$

$$\psi(T_1) = 8 \text{ град}, \omega(T_1) = 0,$$

$$\dot{\omega}(T_1) = 0, |\ddot{\omega}(T_1)| = 2 \cdot 10^{-6} c^{-3};$$

$$II) \psi(T_2) = 10 \text{ град}, \omega(T_2) = 0, \dot{\omega}(T_2) = 0,$$

$$|\ddot{\omega}(T_2)| = 1 \cdot 10^{-6} c^{-3};$$

$$III) \psi(T_3) = \psi_{\text{зад}} = 12 \text{ град}, \omega(T_3) = 0, \dot{\omega}(T_3) = 0,$$

$$|\ddot{\omega}(T_3)| = 5 \cdot 10^{-7} c^{-3}.$$

Каждый из m отрезков траектории маневрирования состоит из трех участков фазовой траектории:

– первый участок:

$$\psi(t_{1m}^s) = \psi(T_{m-1}) + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{1m}^s - t_{0m}^s)^3}{6}, \quad (12)$$

$$\omega(t_{1m}^s) = \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{1m}^s - t_{0m}^s)^2}{2},$$

$$\dot{\omega}(t_{1m}^s) = \ddot{\omega}(T_m)(t_{1m}^s - t_{0m}^s);$$

– второй участок:

$$\begin{aligned} \psi(t_{2m}^s) &= \psi(t_{1m}^s) + \dot{\omega}(t_{1m}^s)(t_{2m}^s - t_{1m}^s) + \\ &+ \ddot{\omega}(t_{1m}^s) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^2}{2} - \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^3}{6}, \\ \omega(t_{2m}^s) &= \omega(t_{1m}^s) + \dot{\omega}(t_{1m}^s)(t_{2m}^s - t_{1m}^s) - \ddot{\omega}(T_m) \frac{(t_{2m}^s - t_{1m}^s)^2}{2}, \\ \dot{\omega}(t_{2m}^s) &= \dot{\omega}(t_{1m}^s) - \ddot{\omega}(T_m)(t_{2m}^s - t_{1m}^s); \end{aligned} \quad (13)$$

– третий участок:

$$\begin{aligned} \psi(t_{2m}^s) + \dot{\omega}(t_{2m}^s)(T_m - t_{2m}^s) + \ddot{\omega}(t_{2m}^s) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^2}{2} + \\ + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^3}{6} &= \psi(T_m), \\ \omega(t_{2m}^s) + \dot{\omega}(t_{2m}^s)(T_m - t_{2m}^s) + \ddot{\omega}(T_m) \frac{(T_m - t_{2m}^s)^2}{2} &= \\ = 0, \dot{\omega}(t_{2m}^s) + \ddot{\omega}(T_m)(T_m - t_{2m}^s) &= 0, \end{aligned} \quad (14)$$

где $t_{01}^s = 0$; $T_1 = t_{02}^s$; $T_2 = t_{03}^s$; $\psi(T_0) = \psi(0) = 0$.

Решение уравнений (12–14) определяет моменты времени переключения управляющих функций для I отрезка $t_{11}^s = 32,68$ с, $t_{21}^s = 98,04$ с и окончания переходного процесса $T_1 = 130,72$ с; II отрезка $t_{12}^s = 156,66$ с, $t_{22}^s = 208,54$ с и окончания переходного процесса $T_2 = 234,47$ с; III отрезка $t_{13}^s = 267,15$ с, $t_{23}^s = 332,51$ с; и окончания переходного процесса $T_3 = 365,19$ с.

Уравнение для определения управляющих функций при условии $\ddot{\omega}(t) = 0$ будут иметь на основе уравнения (3) следующий вид

$$\ddot{\alpha}(t) + 0,0018\dot{\alpha}(t) - 0,081\alpha(t) = [0,06|\dot{\omega}(t)| - 0,007]\dot{\omega}(t) - 0,0025|\dot{\omega}(t)|\omega(t).$$

Начальные значения угловой скорости угла перекладки пера руля для соответствующего момента переключения t_i^s определяются выражением вида (4)

$$\dot{\alpha}(t_i^s) = 158,7\ddot{\omega}(t_i^s) + 13,3\dot{\omega}(t_i^s) + 4,76|\dot{\omega}(t_i^s)|\omega(t_i^s) - 0,032\alpha(t_i^s).$$

Моделирование процесса стабилизации судна (структурная схема – рис. 3) рассматривалось на основе модели (11) с учетом воздействия неконтролируемого нерегулярного волнения, формируемого соответствующим формирующим фильтром [2] для бальности волнения с дисперсией волновых ординат $\sigma = 0,143$ м², рассогласования параметров математической модели и физического судна, задаваемого в пределах 15%, а также влияния параметрического шума заданной интенсивности.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование процесса стабилизации судна (рис. 4) показывает для робастно-оптимальной системы управления: временные (для угла курса $\psi(t)$ – рис. 4а, угловой скорости $\dot{\omega}(t)$ – рис. 4б, углового ускорения $\ddot{\omega}(t)$ – рис. 4в, угла перекладки руля $\alpha(t)$ – рис. 4г), траектории маневрирования в неподвижной системе координат ХОУ (рис. 4д) и фазовые ($\omega(\psi)$ – рис. 4е, $\dot{\omega}(\psi)$ – рис. 4ж, $\dot{\omega}(\omega)$ – рис. 4з, $\dot{\omega}(\omega, t)$ – рис. 4и) характеристики, обеспечивающие точность процесса управления с ошибками менее 1%.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты имитационного моделирования с использованием программных средств MatLab'a позволили сделать следующие заключения: предложенная алгоритмическая процедура синтеза системы управления морского подвижного объекта является эффективной и позволяет корректно описывать динамические процессы управления; разработанные системы управления применимы для многомерных объектов и при построении оптимальных по максимальному быстродействию траекторий используют разделение переменных на ведущие, субведущие и ведомые для формирования последовательности моментов времени переключения управляющих функций в обратных связях объекта управления; применение автоматизированных процедур синтеза позволяет использовать системы с переменной структу-

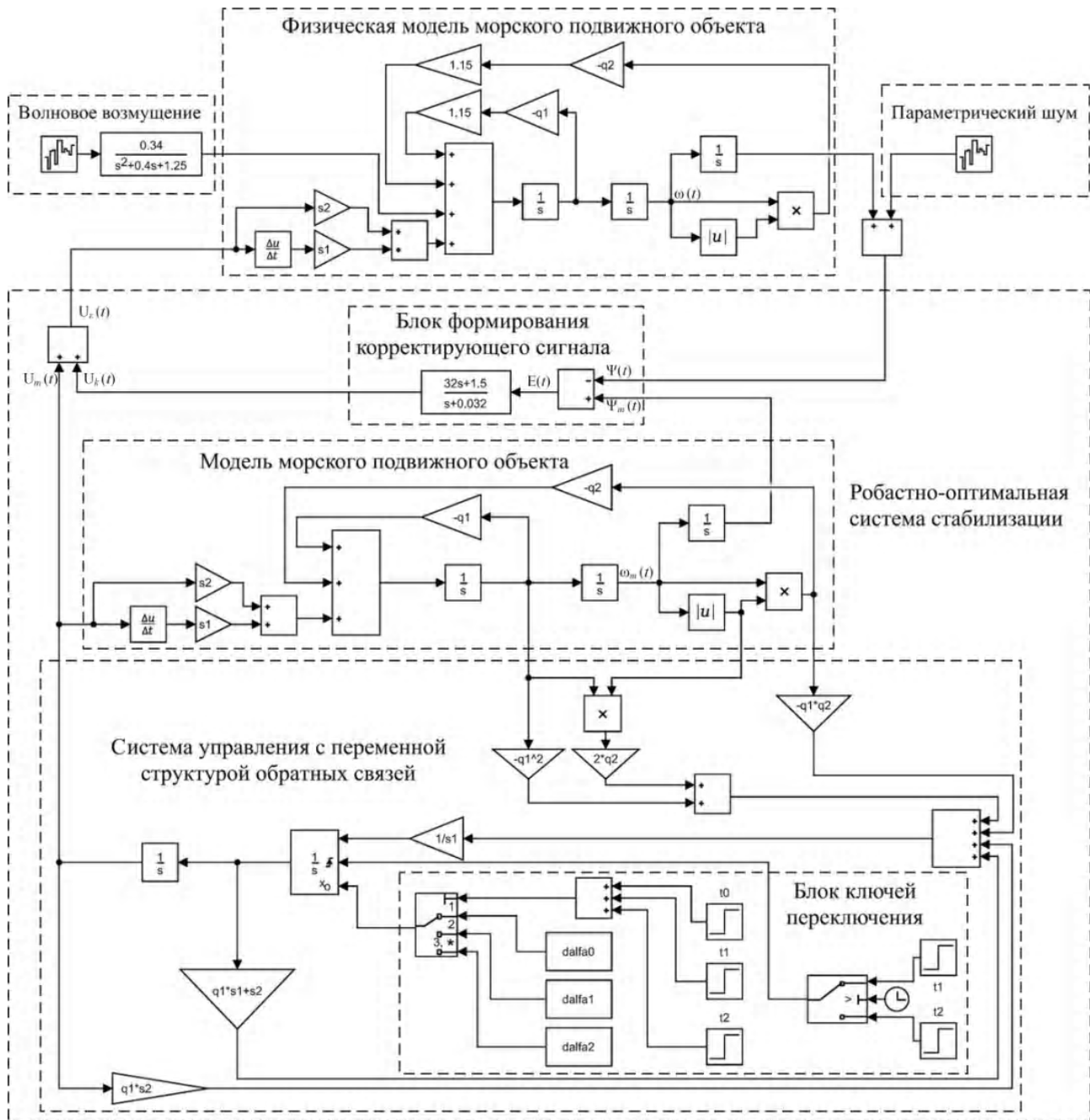


Рисунок 3 – Структурная схема робастно-оптимальной стабилизации судна на заданной траектории

рой для широкого класса задач стабилизации морских подвижных объектов с обеспечением требуемого уровня инвариантности управления в условиях неполной информативности модели объекта управления с необходимой точностью в окрестностях сформированной оптимальной траектории или области динамического позиционирования.

ВЫВОДЫ

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые на основе систем с переменной структурой обратных связей предложены алгоритмические процедуры автоматизированного синтеза управляющих функций для многомерных нелинейных систем, описы-

вающих динамику морских подвижных объектов, которые позволяют решать задачи оптимизации процессов стабилизации для критерия максимального быстродействия. Формирование балансирующих уравнений сил и моментов, действующих на объект, в т. ч. возмущающих воздействий, а также их производных позволяет синтезировать требуемые управляющие воздействия. Практическая ценность полученных результатов заключается в создании программных средств автоматизации процесса синтеза робастно-оптимальных систем переменной структуры для конкретных систем маневрирования и динамического позиционирования морских подвижных объектов.

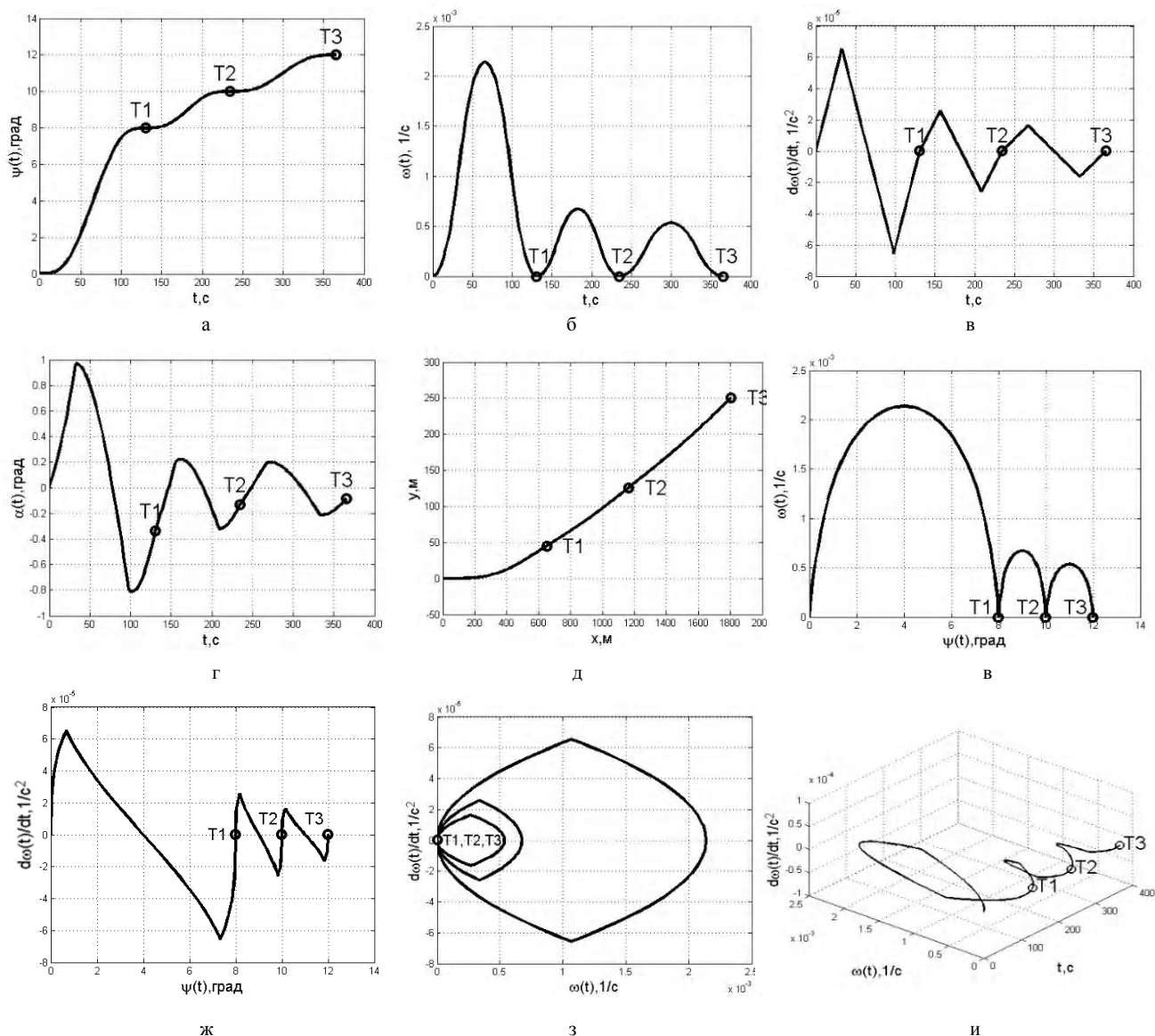


Рисунок 4 – Временные и фазовые характеристики стабилизации судна на заданной траектории

Возможность эффективного решения задач оптимального управления в условиях неполной информативности и нестационарности нелинейной модели объекта и окружающей среды расширяет применение предлагаемых автоматизированных процедур синтеза для классов подвижных объектов различного назначения, например, дронами для мониторинга безопасности мореплавания в районах интенсивного судоходства.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем признательность д.т.н., профессору Лебедеву Дмитрию Васильевичу, многолетнему руководителю секции «Управление аэрокосмическими, морскими и другими подвижными объектами» Международной научно-технической конференции «АВТОМАТИКА» за плодотворное и критическое обсуждение научных исследований авторов в области робастно-оптимальных систем управления морскими объектами, что позволило развить методы синтеза для нелинейных многомерных систем управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кунцевич В. М. Синтез робастно-оптимальных систем управления нестационарными объектами при ограниченных возмущениях / В. М. Кунцевич // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С.19–31.
2. Лукомский Ю. А. Системы управления морскими подвижными объектами / Ю. А. Лукомский, В. С. Чугунов. – Л. : Судостроение, 1988. – 272 с.
3. Fossen, T.I. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels / T.I. Fossen, T. Perez // Journal of modeling, identification and control. – 2007. – Vol. 28, Issue 1. – P. 19–30.
4. Optimal Control of Nonlinear Systems / [N. V. Balashevich, R. Gabasov, A. I. Kalinin, F. M. Kirillova] // Computational Mathematics and Mathematical Physics. – 2002. – Vol. 42, № 7. – P. 931–956.
5. Fossen T. I. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping / T. I. Fossen, A. Grovlen // IEEE Transactions on Control Systems Technology. – 1998. – Vol. 6, Issue 1. – P. 121–129.
6. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи / С. В. Емельянов, С. К. Коровин. – М. : Наука, Физматлит, 1997. – 352 с.

7. Емельянов С. В. Системы автоматического управления переменной структуры: синтез скалярных и векторных систем по состоянию и по выходу / С. В. Емельянов // Нелинейная динамика и управления. – 2007. – Вып. 5. – С. 5–24.
 8. Banos A. Nonlinear quantitative stability / A. Banos, I. M. Horowitz // Int. Journal of Robust and Non-Linear Control. – 2004. – Vol. 14. – P. 289–306.
 9. Крутько П. Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления / П. Д. Крутько. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
 10. Comastlivas, R. Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications / R. Comastlivas, T. Escobet, J. Quevedo // Proceeding of IFAC Conference on Advances in PID Control. – 2012. – P. 715–720.
 11. Тимченко В. Л. Робастная стабилизация морских подвижных объектов на основе систем с переменной структурой обратных связей / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Проблемы управления и информатики. – 2011. – № 3. – С. 79–92.
 12. Тимченко В. Л. Синтез структурно переключаемых систем для управления многомерными подвижными объектами / В. Л. Тимченко, Ю. П. Кондратенко // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2011. – № 1(24). – С. 158–163.
 13. Тимченко В. Л. Оптимизация процессов стабилизации морского подвижного объекта в режиме динамического позиционирования / В. Л. Тимченко, О. А. Ухин // Проблемы управления и информатики. – 2014. – № 4. – С. 77–88.
- Статья поступила в редакцию 29.03.2017.
После доработки 24.06.2017

Тимченко В. Л.¹, Лебедев Д. О.²

¹Д-р техн. наук, профессор кафедры комп'ютеризованих систем управління, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

²Магістрант, Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна

АЛГОРИТМІЧНІ ПРОЦЕДУРИ СИНТЕЗУ СИСТЕМ ЗМІННОЇ СТРУКТУРИ ДЛЯ КЕРУВАННЯ МОРСЬКИМИ РУХОМИМИ ОБ'ЄКТАМИ

Актуальність. Для розв'язання задач підвищення рівня автоматизації процесів керування морськими рухомими об'єктами при маневруванні і динамічному позиціонуванні запропоновані алгоритмічні процедури синтезу оптимальних за швидкодією систем зі змінною структурою зворотних зв'язків для заданої розмірності моделі об'єкту, необхідного виду траєкторій стабілізації та обмежень на керуючі впливи. Об'єктом дослідження є динамічні процеси стабілізації морських рухомих об'єктів в умовах неповної інформативності їх моделей і навколишнього середовища. Предметом дослідження є автоматизовані алгоритмічні процедури синтезу оптимальних за швидкодією систем керування зі змінною структурою зворотних зв'язків.

Мета роботи – підвищення рівня автоматизації та показників якості процесів керування морськими рухомими об'єктами на основі створення автоматизованих процедур синтезу робастно-оптимальних систем.

Метод. Для оптимізації процесів керування формуються оптимальні траєкторії стабілізації, визначаються необхідні моменти перемикання і вигляд керуючих функцій в ланцюгах зворотних зв'язків. Розглядаються нелінійні моделі морських рухомих об'єктів з урахуванням неповної інформативності параметрів моделі та зовнішніх збурень. Запропоновано використання робастного корегувального контуру керування, який забезпечує компенсацію відхилення поточної траєкторії фізичного об'єкта від оптимальної траєкторії, що виникає внаслідок розузгодження параметрів моделі та фізичного об'єкта і впливу неконтрольованих збурень. Таким чином, досягається інваріантність системи керування до неповної інформативності моделей та мінімальні значення похибок керування.

Результати. Розроблені алгоритмічні процедури синтезу робастно-оптимальних систем змінної структури програмно реалізовані та досліджені при імітаційному моделюванні процесу стабілізації морського рухомого об'єкту на заданій траєкторії, результати якого підтвердили коректність і ефективність запропонованого підходу.

Висновки. На основі систем зі змінною структурою зворотних зв'язків для критерію оптимальності по максимальній швидкодії розроблені алгоритмічні процедури автоматизованого синтезу керуючих функцій для багатовимірних нелінійних систем, що описують динаміку морських рухомих об'єктів. Створені програмні засоби автоматизації процесу синтезу і схемні рішення систем керування можуть бути практично застосовні для широкого класу рухомих об'єктів різного технічного призначення.

Ключові слова: робастно-оптимальне керування, системи зі змінною структурою зворотних зв'язків, морський рухомий об'єкт.

Timchenko V. L.¹, Lebedev D. O.²

Doctor of Science, Professor of Department of the Computer's Control Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

²Graduate student, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine

ALGORITHMIC PROCEDURES OF SYNTHESIS OF VARIABLE STRUCTURE SYSTEMS FOR MARINE VEHICLES CONTROL

Context. Algorithmic procedures for synthesizing optimal speed systems with variable feedback structure and a given dimension of the vehicle model, required type of stabilization trajectories and constraints on control actions are proposed for solving the tasks of increasing level of automatization control processes of marine vehicles at maneuvering and dynamic positioning. The study object are dynamic processes which stabilize marine mobile objects in conditions of incomplete informative nature of their models and the environment. The subject of the research is automated algorithmic procedures for synthesis of optimal control systems with variable feedback structure.

Objective – to increase the level of automation and quality indicators for the control processes of marine mobile objects on the basis of creating automated procedures for the synthesis of robust-optimal systems.

Method. To optimize control processes, optimal stabilization trajectories are formed, also the necessary switching moments and the type of control functions are determined for the feed-backs of optimizing control processes. Nonlinear models of marine vehicles with incomplete informativeness of model parameters and external disturbances are considered. The robust correcting control circuit providing compensation of the errors of the actual trajectory of physical object from the optimal trajectories, which arise from a mismatch between the parameters of the model and the physical object and from the effect of uncontrolled disturbances, is proposed. Thus, the control system is invariant for incomplete informativeness of models and minimal values errors of control can be achieved.

Results. The algorithmic procedures for synthesizing robust optimal systems of variable structure have been implemented and studied in the simulation of the stabilizing process of a mobile marine object on a given trajectory, the results of which confirmed the correctness and effectiveness of the proposed approach.

Conclusions. On the basis of systems with variable feedback structure for the criterion of optimality for the maximum operating speed, algorithmic procedures for the automated synthesis of control functions for multidimensional nonlinear systems describing the dynamics of

mobile marine objects have been developed. The software tools for automating the synthesis process and schematic solutions of control systems are practically applicable for a wide class of mobile objects of various technical purposes.

Keywords: robust-optimal control, systems with the variable structure of feed-backs, marine vehicles.

REFERENCES

1. Kuncovich V. M. Sintez robustno-optimal'nyh sistem upravlenija nestacionarnymi ob'ektami pri ogranichennyh vozmushhenijah, *Problemy upravlenija i informatiki*, 2004, No. 2, pp. 19–31.
2. Lukomskij Ju. A., Chugunov V. S. Sistemy upravlenija morskimi podvizhnymi ob'ektami. Leningrad, Sudostroenie, 1988, 272 p.
3. Fossen T. I., Perez T. Kinematic models for maneuvering and seakeeping of marine vessels, *Journal of modeling, identification and control*, 2007, Vol. 28, Issue 1, pp. 19–30.
4. Balashevich N. V., Gabasov R., Kalinin A. I., Kirillova F. M. Optimal Control of Nonlinear Systems, *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2002, Vol. 42, No. 7, pp. 931–956.
5. Fossen T. I., Grovlen A. Nonlinear output feedback control of dynamically positioned ships using vectorial observer backstepping, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1998, Vol. 6, Issue 1, pp. 121–129.
6. Emel'janov S. V., Korovin S. K. Novye tipy obratnoj svjazi. Moscow, Nauka, Fizmatlit., 1997, 352 p.
7. Emel'janov S. V. Sistemy avtomaticheskogo upravlenija peremennoj struktury: sintez skaljarnyh i vektornyh sistem po sostojaniju i po vyhodu, *Nelinejnaja dinamika i upravlenija*, 2007, Vyp. 5, pp. 5–24.
8. Banos A., Horowitz I. M. Nonlinear quantitative stability / A. Banos, *Int. Journal of Robust and Non-Linear Control*, 2004, Vol. 14, pp. 289–306.
9. Krut'ko P. D. Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravlenija. Moscow, Mashinostroenie, 2004, 576 p.
10. Comastlivas R., Escobet T., Quevedo J. Automatic design of robust PID controllers based on QFT specifications, *Proceeding of IFAC Conference on Advances in PID Control*, 2012, pp. 715–720.
11. Timchenko V. L., Kondratenko Ju. P. Robastnaja stabilizacija morskikh podvizhnyh ob'ektov na osnove sistem s peremennoj strukturoj obratnyh svjazej, *Problemy upravlenija i informatiki*, 2011, No. 3, pp. 79–92.
12. Timchenko V. L., Kondratenko Ju. P. Sintez strukturno pereklyuchaemyh sistem dlja upravlenija mnogomernymi podvizhnymi ob'ektami, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 1(24), pp. 158–163.
13. Timchenko V. L., Uhin O. A. Optimizacija processov stabilizacii morskogo podvizhnogo ob'ekta v rezhime dinamicheskogo pozicionirovanija, *Problemy upravlenija i informatik*, 2014, No. 4, pp. 77–88.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 4/2017

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 28.12.2017. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 24,41.
Тираж 300 прим. Зам. № 1133.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.