



Запорізький національний технічний університет

## **Радіоелектроніка, інформатика, управління**

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 1(40) 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

№ 1(40) 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

№1(40) 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. Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ №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 СС ліцензією СС-ВУ.

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

**Журнал входить до наукометричної бази Thomson Reuters 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 / РИИЦ, 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 закрите (анонімне для автора) **рецензування** штатними редакторами і незалежними рецензентами – провідними вченими за профілем журналу.

#### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

**Члени редколегії:**

Андроулідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

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

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

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

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

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

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

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

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

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

Папшицький М., д-р філософії, Польща

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

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

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

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 8 від 27.03.2017.

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

**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 Thomson Reuters Web of Science.**

**Журнал реферруется 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:**

Андроидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Япония

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

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

Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина

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

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

Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль

Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша

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

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

Папшицкий М., д-р философии, Польша

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

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

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

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 8 от 27.03.2017.

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](mailto: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 Thomson Reuters 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 / РИИЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich’s Periodicals Directory, WorldCat, VINITI (All-Russian Institute of scientific and technical information), Djerelo), full list of which is presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

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

**The journal scope:** radio physics, micro-, nano- and radio electronics, computer hardware and software, computer networks and telecommunications, algorithm and programming theory, optimization and operations research, machine-machine and man-machine interfacing, mathematical modeling and computer simulation, data and signal processing, control in technical systems, artificial intelligence, including knowledge-based and expert systems, data mining, pattern recognition, artificial neural and neuro-fuzzy networks, fuzzy logics, swarm intelligence and multiagent systems, hybrid systems.

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

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

## EDITORIAL BOARD

**Editor-in-Chief:** S. A. Subbotin, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

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

### Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece

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

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

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

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

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

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

M. Kameyama, Doctor of Science, Japan

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

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

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

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

V. G. Levashenko, Ph.D, Slovakia

A. Lisnianski, Ph.D, Israel

U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland

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

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

M. Paprzycki, Ph.D, Poland

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

O. I. Rubel, Ph.D, Canada

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

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

E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 8 dated 27.03.2017.

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

© Zaporizhzhya National Technical University, 2017

## ЗМІСТ

<b>РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....</b>	<b>7</b>
<i>Красовська Ю. О., Магро В. І.</i> ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-T2 НА 9 КАНАЛІ В МІСТІ ДНІПРО.....	7
<i>Суліма С. В., Скулиш М. А.</i> ГІБРИДНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ.....	16
<b>МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....</b>	<b>24</b>
<i>Кондратець В. О., Мацуї А. М.</i> ВІРТУАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ В ПІСКОВОМУ ЖОЛОБІ ОДНОСПРАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ.....	24
<i>Левин В. И.</i> МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ РАЗДЕТЕРМИНИЗАЦИИ.....	33
<i>Маслак А. А., Моисеев С. И., Осипов С. А., Поздняков С. А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛАТЕНТНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИАПАЗОНА ВАРЬИРОВАНИЯ НАБОРА ИНДИКАТОРОВ.....	42
<b>НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....</b>	<b>50</b>
<i>Авраменко В. В., Шелехов И. В., Зарецкий Н. А.</i> ОПЕРАТИВНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА ПРИ ЕГО ИСКАЖЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫМ УСТРОЙСТВОМ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ.....	50
<i>Субботин С. А., Благодарев А. Ю., Гофман Е. А.</i> СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С ХЭШИРУЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМАХ.....	56
<i>Ходак М. В., Кучеренко Е. И., Трохимчук С. Н.</i> ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ.....	66
<i>Zhengbing Hu, Yevgeniy V. Bodyanskiy, Oleksii K. Tyshchenko, Viktoriia O. Samitova</i> FUZZY DATA CLUSTERING IN THE RANK SCALE BASED ON A DOUBLE NEO-FUZZY NEURON.....	74
<b>ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....</b>	<b>83</b>
<i>Агаджанян А. Р., Лоза Е. И., Нариманова Е. В.</i> ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ЭКГ С ПАТОЛОГИЯМИ.....	83
<i>Вовк С. М.</i> ДЕКОМПОЗИЦИЯ СУММЫ ГАУССИАН, ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ШУМОМ.....	91
<i>Гороховатский В. А.</i> МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЕВАНТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИАННОЙ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРНЫХ ОПИСАНИЙ.....	100
<i>Дудатъев А. В., Войтович О. П.</i> МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІННЯ КОМПЛЕКСНОЮ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ.....	107
<i>Євсєєв С. П., Рзаєв Х. Н., Остапов С. Е., Ніколаєнко В. І.</i> ОЦІНКА ОБМІНУ ДАНИМИ В ГЛОБАЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ МЕРЕЖІ.....	115
<i>Лисицкая И. В., Лисицкий К. Е., Родинко М. Ю., Головки И. А., Жариков И. И., Корниенко М. А., Кулеба М. В.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИХОДА БЛОЧНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ШИФРОВ К СОСТОЯНИЮ СЛУЧАЙНОЙ ПОДСТАНОВКИ.....	129
<i>Оліїнюк А., Skrupsky S. Yu., Shkarupylo V. V., Subbotin S.</i> THE MODEL FOR ESTIMATION OF COMPUTER SYSTEM USED RESOURCES WHILE EXTRACTING PRODUCTION RULES BASED ON PARALLEL COMPUTATIONS.....	142
<b>УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>153</b>
<i>Бушувєв С. Д., Веренич Е. В., Бушувєв Д. А., Ярошенко Р. Ф.</i> ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ МЕНТАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРОЕКТА ИЛИ ПРОГРАММЫ.....	153
<i>Дорофеев Ю. И., Любчик Л. М.</i> ПОДАВЛЕННЯ «ЭФФЕКТА ХЛЫСТА» В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК С ПОМОЩЬЮ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНВАРИАНТНЫХ ЭЛЛИПСОИДОВ.....	161
<i>Купін А. І., Музика І. О., Кузнєцов Д. І.</i> СТРУКТУРА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ.....	171

---

# CONTENTS

<b>RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....</b>	<b>7</b>
<i>Krasovska Y. O., Magro V. I.</i> INTRODUCTION OF DIGITAL TELEVISION OF DVB-T2 ON THE 9 CHANNEL IN THE DNIPRO CITY.....	7
<i>Sulima S., Skulysh M.</i> HYBRID RESOURCE PROVISIONING SYSTEM FOR VIRTUAL NETWORK FUNCTIONS.....	16
<b>MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....</b>	<b>24</b>
<i>Kondratets V. A., Matsui A. N.</i> VIRTUAL DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF SINGLE-SPIRAL CLASSIFIERS FLOW SAND CHUTE.....	24
<i>Levin V. I.</i> METHOD OF MODELING OF BEHAVIOR OF FUNCTION BY DEDETERMINATION.....	33
<i>Maslak A. A., Moiseev S. I., Osipov S. A., Pozdnyakov S. A.</i> INVESTIGATION OF MEASUREMENT PRECISION OF LATENT VARIABLE DEPENDING ON THE RANGE OF VARIATION OF INDICATORS SET.....	42
<b>NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....</b>	<b>50</b>
<i>Avramenko V. V., Shelehov I. V., Zaretsky M. O.</i> RAPID RECOGNITION OF REFERENCE SIGNAL DURING ITS DISTORTION BY NONLINEAR OBJECTS WITH EXPONENTIAL STATIC CHARACTERISTIC.....	50
<i>Subbotin S. A., Blagodarev A. Yu., Gofman Ye. A.</i> THE NEURO-FUZZY DIAGNOSTIC MODEL SYNTHESIS WITH HASHED TRANSFORMATION IN THE SEQUENCE AND PARALLEL MODE.....	56
<i>Khodak M.V., [Kucherenko Ye.I.], Trokhymchuk S. N.</i> APPLIED RESEARCH ASPECTS OF INTELLECTUAL PROCESS BASED ON THE CRITERIA OF RELIABILITY.....	66
<i>Zhengbing Hu, Yevgeniy V. Bodyanskiy, Oleksii K. Tyshchenko, Viktoriia O. Samitova,</i> FUZZY DATA CLUSTERING IN THE RANK SCALE BASED ON A DOUBLE NEO-FUZZY NEURON.....	74
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>83</b>
<i>Ahadzhanian A. R., Loza K. I., Narimanova O. V.</i> FORMATION AND ANALYSIS OF ECG SIGNALS WITH PATHOLOGIES.....	83
<i>Vovk S. M.</i> DECOMPOSITION OF SUM OF GAUSSIANS DISTORTED BY IMPULSIVE NOISE.....	91
<i>Gorokhovatsky V. A.</i> METHODS OF RELEVANT IMAGES SEARCH BASED ON THE MEDIAN PROCESSING OF STRUCTURAL DESCRIPTIONS.....	100
<i>Dudatyev A. V., Voitovykh O. P.</i> MODELS OF INFOMATIONAL DECISION SUPPORT FOR THE COMPLEX INFORMATION SECURITY MANAGMENT.....	107
<i>Yevseiev S. P., Rzayev H. N., Ostapov S. E., Nikolaenko V. I.</i> DATA EXCHANGE EVALUATION IN GLOBAL NETWORKS BASED ON INTEGRATED QUALITY INDICATOR OF SERVICE NETWORK.....	115
<i>Lisitskaya I. V., Lisitsky K. E., Golovko I. A., Zharikov I. I., Kornienko M. A., Kuleba M. V., Rodinko M. Y.</i> EXPERIMENTAL DATA FOR THE IDENTIFICATION OF DYNAMIC INDICATORS OF COMING TO BLOCK OF SYMMETRIC CIPHERS RANDOM PERMUTATION.....	129
<i>Oliinyk A., Skrupsky S. Yu., Shkarupylo V. V., Subbotin S.</i> THE MODEL FOR ESTIMATION OF COMPUTER SYSTEM USED RESOURCES WHILE EXTRACTING PRODUCTION RULES BASED ON PARALLEL COMPUTATIONS.....	142
<b>CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....</b>	<b>153</b>
<i>Bushuyev S. D., Verenych O. V., Bushuyev D. A., Jaroshenko R. F.</i> FORMAL MODEL OF PROJECTOR PROGRAM MENTAL SPACE.....	153
<i>Dorofieiev Yu. I., Lyubchik L. M.</i> BULLWHIP EFFECT IN SUPPLY CHAINS REDUCING BY DECENTRALIZED INVENTORY CONTROL BASED ON INVARIANT ELLIPSOIDS METHOD.....	161
<i>Kupin A. I., Muzyka I. O., Kuznetsov D. I.</i> STRUCTURE OF DECISION SUPPORT SYSTEM OF INFORMATION SYSTEM INTELLIGENT CLIMATE CONTROL RESIDENTIAL.....	171

# РАДИОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

## РАДИОЕЛЕКТРОНІКА И ТЕЛЕКОММУНІКАЦИИ

### RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.397

Красовська Ю. О.<sup>1</sup>, Магро В. І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магістр Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет», співробітник телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал», Дніпро, Україна

<sup>2</sup>Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри прикладної і комп'ютерної радіофізики, Дніпропетровський національний університет, Дніпро, Україна

## ВПРОВАДЖЕННЯ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕБАЧЕННЯ DVB-T2 НА 9 КАНАЛІ В МІСТІ ДНІПРО

**Актуальність.** Вирішено завдання переходу регіонального телевізійного каналу з аналогового на цифрове мовлення.

**Мета роботи** – виявлення та подолання складнощів локального переходу на цифрове телебачення стандарту DVB-T2 на прикладі пересічної регіональної телекомпанії.

**Метод.** Запропоновано два рівня переходу регіонального телевізійного каналу з аналогового на цифрове мовлення. Перший рівень включає у себе обрання оптимального формату відеозображення для мовлення у стандартах DVB-T2 та HDTV, а також два варіанти заміни устаткування телеканалу, які можуть забезпечити цифрове наземне телебачення другого покоління і цифрове наземне телебачення високої чіткості. Наявність двох варіантів заміни устаткування зумовлена обмеженістю коштів, які телекомпанія може виділити впродовж короткого часового інтервалу на технічне переоснащення. На другому рівні, рівні міста, розраховано реальну дальність покриття цифрового мовлення та запропоновані методи його досягнення.

**Результати.** На прикладі пересічної регіональної телевізійної компанії показана методика переходу з аналогового на цифрове мовлення. Розрахунки проведені на прикладі телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал», міста Дніпро показали, що наявна аналогова система фіксування, обробки і транспортування відеозображення на регіональному телеканалі потребує повної заміни обладнання. Залежно від наявних коштів, які виділяються на технічне переобладнання, запропоновано два шляхи заміни обладнання. Розрахунки показали, що мінімально задовільне покриття цифрового телевізійного сигналу у м. Дніпро забезпечується на відстані близько 65 км. Втім, якість цифрового телебачення на межі зони покриття не забезпечується повною мірою через незадовільну напруженість поля у точках найбільшої віддаленості від телевізійного центру.

**Висновки.** Розроблена методика переходу регіонального телевізійного каналу з аналогового мовлення на цифрове. Її можна рекомендувати для застосування на практиці з урахуванням місцевих особливостей та інших регіональних каналів України.

**Ключові слова:** цифрове телебачення, стандарт DVB-T2, HDTV, роздільна здатність, покриття, телевізійне обладнання.

### НОМЕНКЛАТУРА

DVB-T2 – європейський стандарт цифрового ефірного телебачення другого покоління;

HDTV – телебачення високої чіткості;

UltraHD – телебачення надвисокої чіткості;

PALDV – формат з сімейства цифрових форматів похило-рядкової магнітного відеозапису;

Sony Super HAD analog cameras – аналогові камери старого зразка;

CTDM – система часового ущільнення зі стисненням;

Betacam SP – сімейство форматів професійного відеозапису;

CAM – блок управління відеокамерою;

VMIX Sony DFS-700 – пульт відео мікшування;

MASTER – комп'ютер, на якому виконується обробка відеоматеріалу;

VIDEOSERVER – комп'ютер, що здійснює управління ефірним мовленням;

LOGIC of issuance – блок, який забезпечує логістику видачі відеосигналу;

Composite video – повний кольоровий аналоговий відеосигнал у вихідній смузі відео частот;

CTV – передавальний комплекс;

CRV – приймальний комплекс;

Mini Converter Analog to – аналого-цифровий перетворювач;

SDI – сімейство професійних цифрових відео інтерфейсів;

P – потужність випромінювання;

$MX$  – цифровий пакет телевізійних каналів при цифровому мовленні;

$E_{\min}$  – мінімально допустима напруженість поля;

$(C/N)_{\min}$  – мінімально допустиме співвідношення несуча/шум приймального пристрою;

$\eta = 120\pi$ , Ом – опір вільного середовища;

$P_{\text{вх}}$  – мінімально допустима потужність на вході приймача;

$c = 3 \cdot 10^8$ , м/с – швидкість світла;

$L_{GSM}$  – втрати режекторного фільтра, що встановлюється для пригнічення сигналу стільникового зв'язку європейського стандарту GSM900;

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К – стала Больцмана;

$R_m = 4,12(\sqrt{H} + \sqrt{h})$  – рівняння радіовидимості.

## ВСТУП

Нині актуальним завданням, що має теоретичне і практичне значення, є дослідження та вирішення проблем усіх рівнів, що виникають на шляху впровадження цифрового ефірного телебачення в Україні. Це зумовлює необхідність розробки методів подолання перешкод на шляху впровадження стандарту DVB-T2 на рівні пересічного регіонального телеканалу. Для телеканалу це означає повну або часткову заміну аналогового обладнання на цифрове. На рівні телецентру – вирішення проблеми недостатнього покриття телевізійним сигналом. На прикладі регіонального телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» можна дослідити наявну аналогову систему фіксування, обробки і транспортування відео зображення та запропонувати найпростіший та найскладніший методи модернізації системи телеканалу з метою досягнення відповідності вимогам стандартів DVB-T2 і HDTV. Ще однією із задач, що виникає під час впровадження цифрового телебачення, є дослідження стану поточного покриття цифровим телевізійним сигналом в місті Дніпро та визначення шляхів збільшення покриття, виходячи з рельєфу міста.

Слід додати, що регіональний телевізійний канал Приват ТБ Дніпро – «9 канал» мовить в аналогових ефірному (метровий діапазон, покриття – 50–100 км від м. Дніпро, потужність передавача 500 Вт) та кабельному, а також у кабельному цифровому режимах. Відео монтуюється у форматі PALDV та має роздільну здатність 720x576 з черезрядковою розгорткою.

Метою роботи є створення методики переходу регіональних телевізійних каналів з мовлення в аналоговому форматі на цифровий формат.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Після відключення ефірного аналогового телебачення по всій Україні, більшість регіональних каналів, які не мають цифрової ліцензії, залишаться на ринку лише у кабельному та онлайн режимах. За таких умов, на телевізійному каналі Приват ТБ Дніпро – «9 канал», що наразі не має ліцензії на мовлення у стандарті DVB-T2, значно погіршиться фінансове становище, покриття стане більш дискретним, зменшиться кількість глядачів, популярність та вагомість каналу у конкурентній боротьбі за першість серед ЗМІ. Постає питання про закриття кана-

лу, як такого, через неефективність та втрату великої частини цільової аудиторії.

За умови, що до визначеного строку переходу Дніпропетровщини на цифрове ТБ, Приват ТБ Дніпро – «9 канал» отримає ліцензію, він працюватиме у цифровому ефірному і кабельному, кабельному аналоговому та онлайн режимах. Це, навпаки, посприє розширенню покриття, підвищенню якості зображення, збільшенню кількості глядачів та популярності каналу.

Перехід від аналогового ефірного мовлення до цифрового потребує повної або часткової заміни наявного на телеканалі устаткування. Розглянемо обидва варіанти. Перший передбачає повноцінну заміну майже всього обладнання. Це означає, що початковий робочий відеоматеріал одразу матиме цифровий формат. Другий варіант базується на встановленні аналого-цифрових перетворювачів, що дозволить працювати із початковим аналоговим відео у цифровій формі. Але тоді постає питання про якість зображення.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Відомо багато робіт, що присвячені проблемі впровадження цифрового телебачення [1–6]. Зокрема, проблемі впровадження телебачення високої чіткості, зокрема і в Україні присвячені роботи [7–8]. Проте багато питань технічного характеру на рівні пересічної регіональної телевізійної компанії залишаються поза увагою.

В ряді робіт досліджується проблема покриття телевізійним сигналом заданої якості території міста, деякого регіону [9–18]. В той самий час відсутні розрахунки для конкретної території, з урахуванням реальних випромінюючих пристроїв згідно рекомендаціям [19]. В даній роботі досліджуються складнощі локального переходу на цифрове телебачення стандарту DVB-T2 пересічного регіонального телеканалу.

## 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Виконаємо дослідження зміни формату відеозображення.

Впровадження цифрового ефірного мовлення зобов'язує телеканал забезпечувати глядачів зображенням високої чіткості, адже висновки про необхідність переходу на цифрове телебачення роблять глядачі, порівнюючи аналогове та цифрове зображення. Програма відео монтування SonyVegasPro, яку використовує телеканал, пропонує наступні дозволи для збереження HDTV відео: 1080-60i, 1080-50i, 1080-24р. Різниця між 1080-60i та 1080-50i полягає в тому, що при розробці чорно-білого телебачення, частота синхронізації телевізійного сигналу бралася з електричної мережі. Відповідно, частота змінного струму в Америці, Японії і ще у декількох країнах – 60 Гц; а у країнах Європи, Азії та у Австралії – 50 Гц. Тому стандарт 1080-60i має близько 30 кадрів в секунду і не підходить для використання в Україні. Отже, використовуються останні два стандарти: 1080-50i, 1080-24р. Перший з них має 25 кадрів на секунду, другий – 24. Утім, перевага – на боці 1080-24р, оскільки він має прогресивну розгортку та забезпечує більшу плавність зображення. Його недолік полягає в тому, що користувачі, які не мають сучасних телевізійних приймачів можуть спостерігати мерехтіння відеозображення на телевізорі. Утім, кількість домогосподарств зі старою телевізійною технікою – незначна та по-

стійно скорочується. Тому при переході на цифрове мовлення заміна формату змонтованого відео з PALDV 720x576i на HDTV 1080-24p – найдоцільніша.

Визначимо, як зміниться структурна схема устаткування телеканалу.

Структурна схема наявної системи обробки і транспортування відеозображення на телеканалі Приват ТБ Дніпро – «9 канал» зображена на рис. 1.

На рис. 1 напрямки руху відеосигналу показаний стрілками. Умовні позначення:

1. Sony HyperHAD analog cameras – аналогові камери старого зразка, сімейства професійних форматів компонентного похило-рядкового відеозапису Betacam SP. Аналоговий компонентний формат відеозапису дозволяє зберігати сигнали яскравості «Y» на одну доріжку, а сигнали кольорової різниці «R-Y» і «B-Y» – по черзі сегментами на іншу доріжку із застосуванням системи часового ущільнення зі стисненням CTDM (англ. Compressed Time Division Multiplex). Поділ каналів дозволяє отримати відеозапис мовної якості з горизонтальною чіткістю сигналу яскравості 480 твл. Професійний формат Betacam SP («SP» від англ. «Superior Performance» – вища якість) має підвищену роздільну здатність (до 600 твл), досягнуту за рахунок використання металопорошкової магнітної стрічки зі зменшеною довжиною хвилі запису.

2. CTV – передавальний комплекс потужністю 1 Вт, виробництва компанії ABE ELETTRONICA, що складається з радіорелейного передавача RR TRANSMITTER та параболічної променевої антени. Знаходиться на даху

офісу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» та спрямовано передає сигнал на телевежу для подальшої трансляції по області.

3. CRV – приймальний комплекс виробництва компанії ABE ELETTRONICA, що складається з радіорелейного приймача RR RECEIVER і параболічної приймальної антени, яка встановлена на дніпровській телевежі за адресою: вул. Телевізійна, 3.

4. TRANSMITTER – передавач TXVP1000 виробництва компанії Kvant-Efir, який складає сигнали сьомого, дев'ятого та одинадцятого регіональних телеканалів та за допомогою антени потужністю 500 Вт транслює по області у метровому діапазоні.

Крім того, існують два шляхи проходження відеоматеріалу мережею. Перший – від п'яти відеокамер через пульт відеомікшування до передавача (у випадку прямого ефіру та студійного запису). Другий шлях – коротший. Він стосується позастудійного запису (журналістських репортажів), коли відео відзняте поза межами офісу у будь-якій точці міста. Для цього використовують цифрові відеокамери фірми Panasonic, що фіксують зображення із роздільною здатністю 720x576i. Змонтоване в сюжет відео журналісти зберігають на VIDEOSERVER, звідки воно прямує до передавача.

Розглянемо намічені варіанти заміни устаткування при переході на стандарт DVB-T2. Перший – повна заміна обладнання (рис. 2) – передбачає:

1) закупівлю п'яти нових студійних цифрових відеокамер з можливістю зйомки у HD чи UltraHD якості;

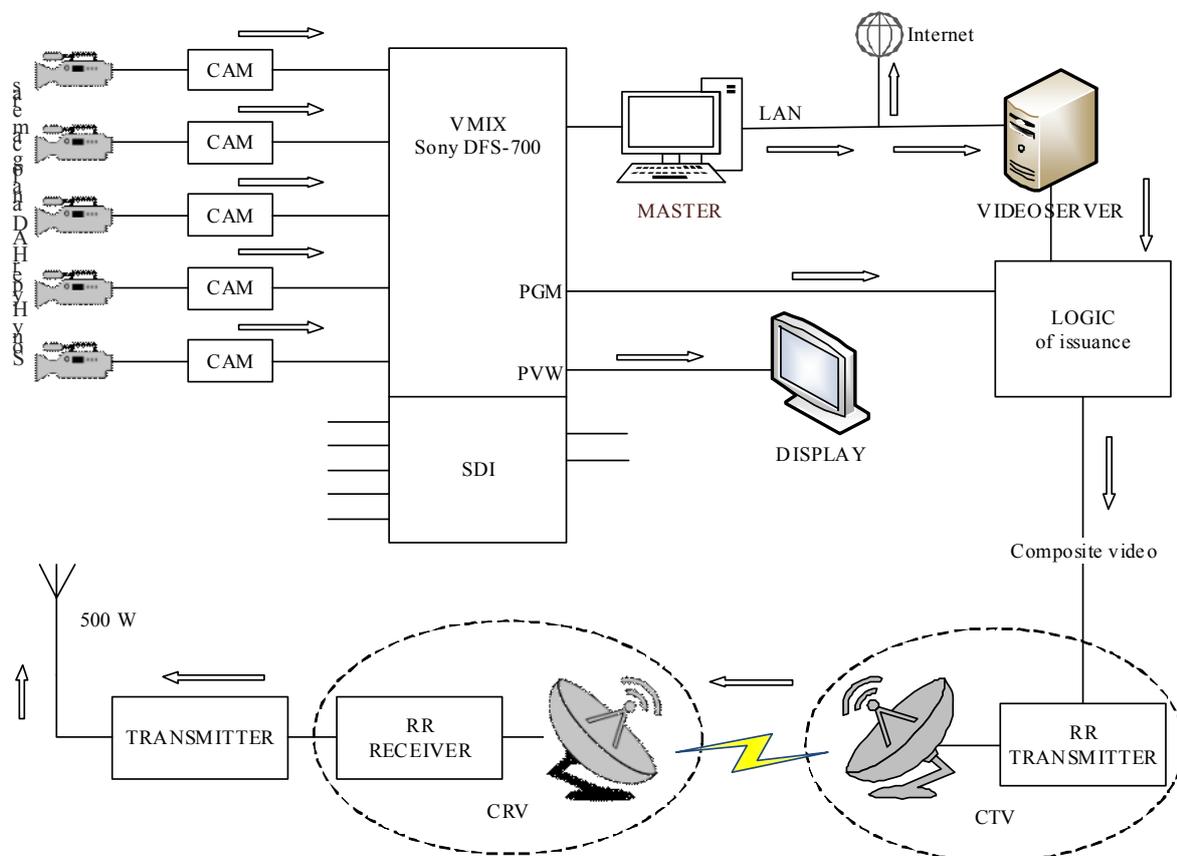


Рисунок 1 – Структурна схема аналогової системи фіксування, обробки і транспортування відеозображення Приват ТБ Дніпро «9 канал»

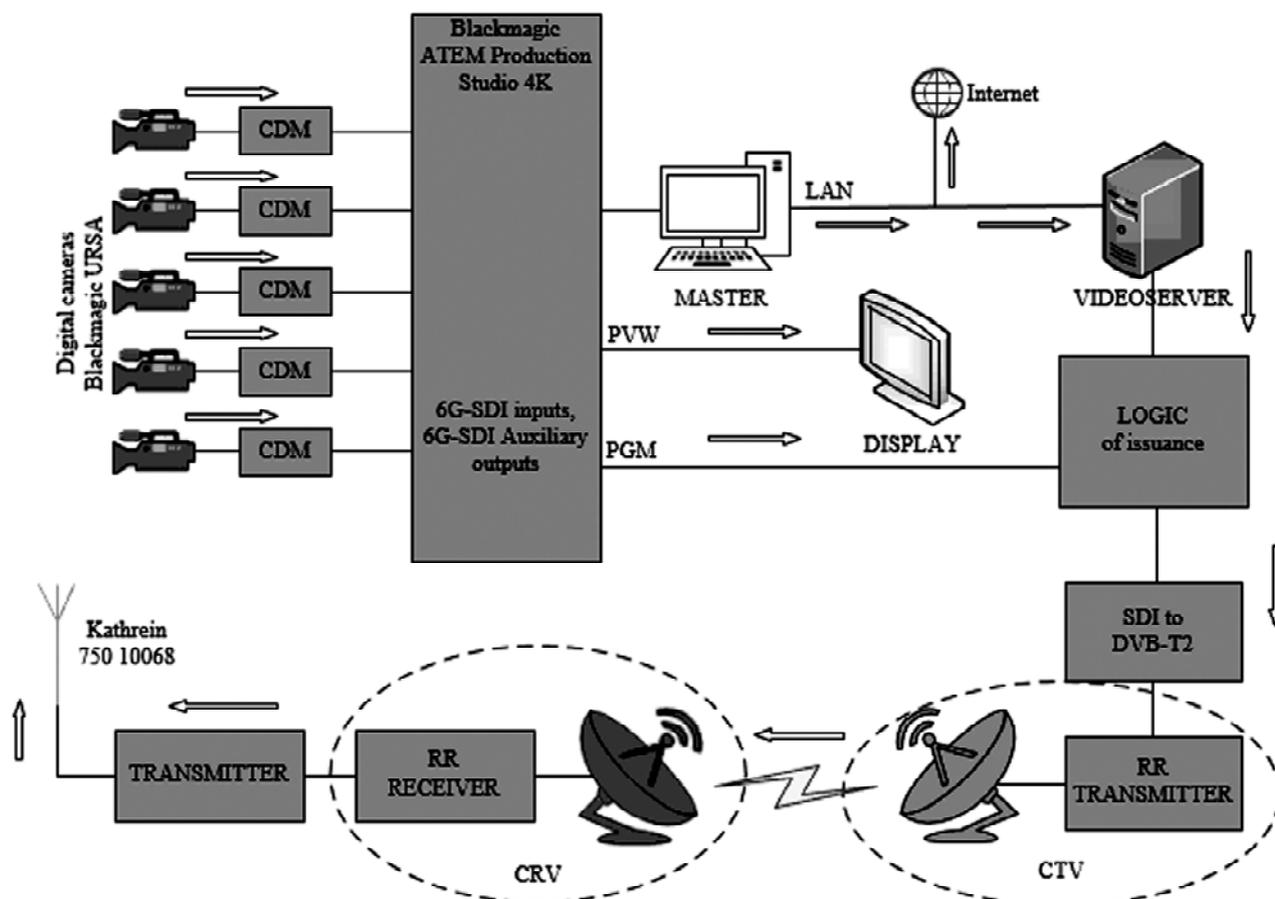


Рисунок 2 – Повна заміна обладнання для переходу телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» на цифрове телебачення стандарту DVB-T2

2) придбання 5 нових блоків управління камерами CAM, що відповідають марці самих відеокамер;

3) встановлення нового пульта відеомікшування, адже Sony DFS-700 не підтримує HDTV відео;

4) заміну аналогової плати комп'ютера VIDEOSERVER на цифрову;

5) заміну наповнення блоку логіки;

6) заміну передавального (будівля Приват ТБ Дніпро – «9 канал») та приймального (телевежа, вул. Телевізійна, 3) комплексів на такі, що забезпечать необхідну для стандарту DVB-T2 модуляцію сигналу;

7) встановлення між радіорелейним приймачем та блоком TRANSMITTER конвертеру, що забезпечить перехід від інтерфейсу SDI до інтерфейсу DVB-T2;

8) заміні модулятора і кодера блоку TRANSMITTER на такі, що підтримують стандарт DVB-T2;

9) підключення до передавальної антени Kathrein 750 10068 компанії «Зеонбуд», яка працює у дециметровому діапазоні.

Крім того, перехід до HDTV потребує більш об'ємних карток-носіїв для позастудійного відеозапису та надпотужних комп'ютерів для монтажу «важкого» відео, яке через високу якість займатиме більші об'єми пам'яті.

На рис. 2 темним кольором зображені структурні елементи, що підлягають заміні.

Проаналізувавши ринок необхідного цифрового обладнання для телебачення, можна зробити висновок, що

перевага у співвідношенні ціна-якість – на боці фірми Blackmagic. Тому заміна технічного забезпечення каналу обладнанням цієї фірми буде найбільш економічно вигідним та ефективним в умовах поточної кризи і наявного рівня розвитку українського регіонального цифрового телебачення.

Усі вищеописані зміни дозволять телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» не лише вести мовлення у стандарті DVB-T2, а постачати глядачам зображення високої чіткості з роздільною здатністю 1920x1080 та прогресивною розгорткою.

Другий варіант переходу телеканалу на цифрове ефірне мовлення передбачає часткову заміну обладнання та встановлення аналого-цифрових перетворювачів (AD Converters). На рис. 3 темним кольором зображена структурна схема такої перекомплетації мережі.

Цей метод полягає у:

1) встановленні п'яти аналого-цифрових перетворювачів (AD Converters) фірми Blackmagic-Mini Converter Analog to SDI;

2) заміні аналогової плати комп'ютера VIDEOSERVER на цифрову;

3) заміні наповнення блоку логіки;

4) встановлення між радіорелейним приймачем та блоком TRANSMITTER конвертеру, що забезпечить перехід від інтерфейсу SDI до інтерфейсу DVB-T2;

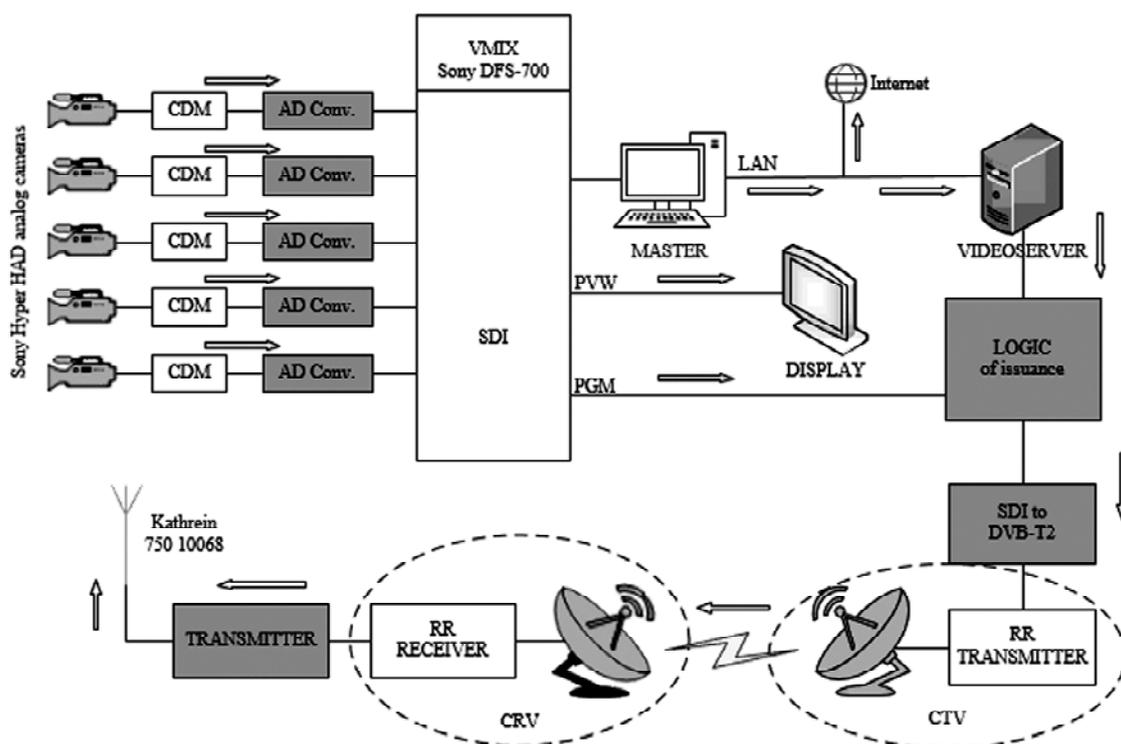


Рисунок 3 – Часткова заміна обладнання для переходу телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» на цифрове телебачення стандарту DVB-T2

5) заміні модулятора і кодера блока TRANSMITTER на такі, що підтримують стандарт DVB-T2;

6) підключенні до передавальної антени Kathrein 750 10068 компанії «Зеонбуд», яка працює у дециметровому діапазоні.

Аналого-цифровий перетворювач Mini Converter Analog to SDI перетворює аналогове компонентне відео, NTSC, PAL або S-Video в SDI-сигнал. Передбачена можливість вбудовування AES / EBU і аналогового звуку. Забезпечує високу якість SD / HD-SDI-матеріалу, отриманого перетворенням аналогового сигналу з таких пристроїв, як Betacam SP, VHS-відеомагнітофони та HDV-камери. Забезпечує автоматичний підбір SD і HD відповідно до сигналу на відеовході.

У випадку телеканалу Приват ТБ Дніпро – «9 канал» вихідне відео стандарту SD з перетворювача потраплятиме на цифровий вхід SDI вже наявного на телеканалі пульта. Подальша обробка і транспортування сигналу забезпечать телеглядачам цифрове зображення, але не чіткість HDTV.

Для роботи зі стандартом SD на комп'ютері VIDEOSERVER уякості заміни аналогової плати FD300 можна використати цифрову плату FD422 того ж виробника.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Визначимо особливості впровадження DVB-T2 на міському рівні та реальне покриття DVB-T2 у місті Дніпро.

Ефірне телебачення м. Дніпро належить до 47 цифрової зони. За даними компанії «Зеонбуд», радіус покриття цифрового наземного ефірного ТБ у Дніпрі дорівнює 65 км. Телевізійна вежа, яка розповсюджує ефірний сигнал, розміщена за адресою: вул. Телевізійна, 3. Побудована у 1958 році, вежа має висоту над рівнем моря 144 м. Її власні розміри: 180м над поверхнею землі, плюс висота верхніх дециметрових антен. Розрахунки за стандартом DVB-T2 враховують  $H = 158$  м висоти телевежі. Встановлена DVB-T2 антена Kathrein 750 10068 має наступні параметри: коефіцієнт підсилення  $G_{\text{пер}} = 10,5$  дБ та потужність випромінювання  $P = 1$  кВт.

Відповідність дніпровських телевізійних частотних каналів мультиплексам та частотам дециметрового діапазону зафіксована у таблиці 1.

Розрахунок зони покриття в найбільш загальному випадку зводиться до розв'язання системи рівнянь [12]:

1. Розрахунок мінімально допустимої напруженості поля  $E_{\text{min}}$  необхідної для нормальної роботи приймального комплексу.

2. Розрахунок реальної напруженості поля від діючого передавача для заданих умов розповсюдження.

Прирівнюючи ці два значення напруженості поля, необхідно визначити радіус покриття, при заданих умовах прийому. Виконаємо розрахунок мінімально допустимої напруженості поля  $E_{\text{min}}$ . Щоб визначити умови

Таблиця 1 – Частоти цифрового ефірного наземного телебачення місті Дніпро

Цифрові пакети	MX1	MX2	MX3	MX5
Номери ТВ каналів	26	35	25	40
Частотні межі каналів, МГц	510–518	582–590	502–510	622–630
Середні частоти каналів, МГц	514	586	506	626

прийому необхідно розрахувати мінімальну напруженість поля для найменшого допустимого співвідношення несуча/шум приймального пристрою  $(C/N)_{\min} = 13,5$  дБ [20–21] та для співвідношення несуча/шум при гарному прийомі  $(C/N)_e = 22,5$  дБ (за умови модуляції 256-QAM). У якості антени приймача візьмемо пасивну антену типу «хвильовий канал» з кількістю елементів – 16 та коефіцієнтом підсилення  $G_{\text{пр}} = 13,5$  дБ. Антени такого типу найбільш розповсюджені на території України для прийому як цифрового, так і аналогового ефірного телебачення. На відстані 65 км від передавача знаходяться переважно приватні будинки, у яких приймальну антену можна розмістити на висоті, не більшій, ніж  $h = 6$  метрів. Враховуючи усі приведені данні, розрахуємо мінімально необхідні напруженості поля  $E_{\min}$  для прийому середніх частот кожного з чотирьох мультиплексів.

Відомо, що напруженість поля у точці прийому визначається за формулою [10]:

$$E = \sqrt{4\pi\eta \cdot \frac{P_{\text{вх}}}{G_{\text{пр}}} \cdot \frac{f}{c}} \quad (1)$$

Вираз (1) зручно переписати у логарифмічному вигляді:

$$E_{[\text{дБ}\mu\text{В}/\text{м}]} = P_{\text{вх}[\text{дБВт}]} - G_{\text{пр}[\text{дБ}]} + L_{\text{GSM}} + 77,2 + 20 \cdot \lg(f_{[\text{MHz}]}) \quad (2)$$

Мінімальний рівень входної потужності визначається шумовою температурою приймальної антени  $T_A$ , смугою каналу  $\Pi$ , коефіцієнтом шуму  $F$  (для розрахунку зони покриття рекомендовано  $F = 2,7$  дБ) і співвідношенням несуча/шум  $(C/N)$ :

$$P_{\text{вх},\min[\text{дБВт}]} = 10 \lg(kT_A \Pi) + F_{[\text{дБ}]} + C/N_{[\text{дБ}]} \quad (3)$$

Відомо, що шумова температура антени у діапазоні дециметрових хвиль приблизно дорівнює  $T_A = 300$  К. Саме це значення рекомендоване до інженерного розрахунку. Тоді мінімальне значення напруженості поля  $E_{\min}$  (1) з урахуванням (2) можна записати:

$$E_{\min[\frac{\text{дБ}\mu\text{В}}{\text{м}}]} = -30 + F + \frac{C}{N} - G_{\text{пр}} + 20 \lg(f) \quad (4)$$

Основне рівняння дальності у зручному алгебраїчному вигляді [12] було вперше запропоноване С. Н. Песковим в [13] на базі [14]:

$$-\sqrt{\frac{H}{h}} \cdot 10 \lg \left( 1 + \frac{R}{R_m} \right) \quad (5)$$

Таблиця 2 – Розрахунок радіусу покриття цифровим наземним ефірним телебаченням у м. Дніпро

Цифрові пакети і середні частоти каналів	MX1 514 МГц	MX2 586 МГц	MX3 506 МГц	MX5 626 МГц
Мінімально допустимий прийом (для 256-QAM): $(C/N)_{\min} = 13,5$ дБ	68,796 км	65,497 км	69,199 км	63,884 км
Якісний прийом (для 256-QAM): $(C/N)_e = 22,5$ дБ	50,008 км	47,458 км	50,321 км	46,213 км

Таблиця 3 – Результати розрахунків співвідношення  $C/N$  на відстані  $R = 65$  км від дніпровської телевежі DVB-T2 на вул. Телевізійній, 3

Цифрові пакети і середні частоти каналів	MX1 514 МГц	MX2 586 МГц	MX3 506 МГц	MX5 626 МГц
Співвідношення $C/N$ , дБ	15,143	13,719	15,313	13,003

Розв’язавши систему рівнянь (4) і (5) для чотирьох середніх частот і двох співвідношень  $C/N$ , можна розрахувати радіус покриття цифрового ТБ у місті Дніпро (табл. 2).

### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Із розрахунків видно, що мінімально задовільне покриття цифрового телевізійного сигналу у м. Дніпро забезпечується на відстані близько 65 км. Втім, якість цифрового телебачення на межі зони покриття не забезпечується повною мірою через незадовільну напруженість поля у точках найбільшої віддаленості від телевізійного центру. Співвідношення несуча/шум у цих точка значно нижча за 22,5 дБ, необхідні для гарного прийому високоякісного цифрового зображення. Результати розрахунків співвідношення  $C/N$  на відстані 65 км від телевежі DVB-T2 наведено в таблиці 3.

Через вищеназвані причини, цифрове зображення на вказаних частотах матиме меншу контрастність та більшу зернистість, також можливі зупинки відеопотоку і так зване «розсіпання зображення» (накладена маска із пікселів випадкового кольору та яскравості). Вирішити цю проблему, у першу чергу, необхідно на рівні передавача. Максимальна потужність антени Kathrein 750 10068 складає 5 кВт, утім, на практиці використовується лише 1 кВт.

Для забезпечення гарної якості прийому на відстані 65 км від телевежі є таке рішення: необхідно збільшити потужність до 5 дБкВт (від 1000 Вт до 3162 Вт) та збільшити коефіцієнт підсилення передавальної антени на 4,5 дБ. Для цього необхідно провести модернізацію передавальної антени.

### 6 ОБГОВОРЕННЯ

Для остаточного переходу України з аналогового ефірного мовлення на цифрове, необхідно, щоб 95% території держави мали покриття сигналом стандарту DVB-T2 (згідно з п. 2 Додатка до рішення № 1486 «Про створення національної мережі цифрового телемовлення в стандарті DVB-T» від 27.10.2010 Національної ради з питань телебачення і радіомовлення). Спираючись на офіційні дані «Зеонбуду», наведені у [19], з приводу досягнення такого покриття, а також спираючись на п. II/6 інформаційної довідки до питання «Про стан інформаційного простору у Дніпропетровській області» Департаменту інформаційної політики, у м. Дніпро радіус покриття має складати 65 кілометрів від телевежі. Проведені у роботі розрахунки та отримані результати підтвердили, що прийом цифрового сигналу у місті

Дніпро можливий на відстані більшій за 65 км. При цьому споживачі, що знаходяться в радіусі до 50 км від телецентру, отримують якісне чітке зображення.

Розрахунки в роботі проведені для приймальної антени з коефіцієнтом підсилення = 13,5 дБ. Зазвичай найбільш розповсюдженим типом антен, що забезпечують такий коефіцієнт підсилення є директорні антени (антени типу «хвильовий канал»). Для забезпечення більшого коефіцієнта підсилення приймальної антени (наприклад, 18 чи 32 дБ) як це рекомендовано на офіційному сайті цифрового ефірного телебачення України [19], мають бути застосовані приймальні антени з попереднім підсилювачем. Тільки такі антени зможуть забезпечити якісний прийом цифрового наземного сигналу на запланованій відстані 65 км від передавача. Проте даний тип антен підсилює як корисний сигнал, так і шуми, а це суттєво впливає на якість прийнятого сигналу. З іншого боку це змушує користувачів купувати додаткове устаткування. На наш погляд питання збільшення покриття якісним DVB-T2-сигналом можна вирішити на рівні установ, які мають можливості: на рівні телеканалу та на рівні телецентру.

## ВИСНОВКИ

В роботі отримані наступні результати:

1. Наявна аналогова система фіксування, обробки і транспортування відео зображення на регіональному телеканалі «9 канал» потребує повної заміни обладнання (8 блоків і комп'ютери) для забезпечення стандартів HDTV та DVB-T2.

2. Дальність покриття якісним цифровим телевізійним сигналом в місті Дніпро наразі складає 46,213–50,321 км від телецентру. На відстані 65 км від радіопередавача співвідношення  $C/N$  становить 13,003–15,313 дБ.

3. Розроблений метод збільшення покриття передбачає збільшення потужності радіопередавача на 2,162 кВт та збільшення коефіцієнта підсилення передавальної антени на 4,5 дБ.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара (номер державної реєстрації 1-298-15).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Маковецько Д.А. Исследование пропускной способности стандарта цифрового наземного телевидения второго поколения DVB-T2 / Д. А. Маковецько, М. Хусайн // Цифрові технології – 2009. – № 6. – С. 27–32.
2. Хусайн Маен. Области применения методов обработки изображений высокой четкости / М. Хусайн // Холодильная техника и технология – 2010. – № 3. – С. 74–77.
3. Халиль Г. Проблемы и перспективы внедрения цифрового телевидения высокой четкости / Г. Халиль, М. Хусайн // Цифрові технології – 2007. – № 1. – С. 49–57.
4. Хусайн М. Современное состояние развития методов доставки телевизионных сигналов / М. Хусайн, Е. В. Ошаровская // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Технології цифрового мовлення: Стратегії впровадження», 24–25 червня 2010, Одеса. – Одеса, 2010. – С. 78–82.
5. Песков С.Н. Рекомендации по внедрению DVB эфирного вещания / С. Н. Песков, И. А. Колпаков // Теле-Спутник. – 2007. – № 2–5.
6. Халиль Г. Проблемы внедрения телевидения высокой четкости и новых поколений телевизионного вещания в странах Ближнего Востока / Г. Халиль, М. Хусайн // VII Международная конференция по телекоммуникациям и телерадиовещанию. – 21–23 октября 2009, Киев. – Киев : Экспоплаза, 2009. – С. 40.
7. Михайлов С. А. Состояние и перспективы внедрения новейших систем цифрового вещания в мире, в странах Ближнего Востока, на Украине / С. А. Михайлов, М. Хусайн // Матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Інститут телекомунікаційних систем, НДІ телекомунікацій. 20–23 квітня 2010, Київ. – Київ, 2010. – С. 28.
8. Мамаев Н. Внедрение цифрового наземного вещания в ряде стран Европы / Н. Мамаев // 625. – 2002. – № 4. – С. 18–25.
9. Песков С. Н. Антенна на дачу / С. Н. Песков, Е. Н. Мельникова // Теле-Спутник. – 2014. – № 6. – С. 62–67.
10. Песков С. Н. Расчет зоны покрытия для цифрового эфирного вещания DVB-T/H. Часть 1. Понятие зоны покрытия для цифрового вещания. Минимальная напряженность электрического поля / С. Н. Песков // Теле-Спутник. – 2008. – № 5. – С. 16–19.
11. Песков С. Н. Дальность эфирного приема / С. Н. Песков // Теле-Спутник. – 2009. – № 10 – С. 34–38.
12. Песков С. Н. Аналитические методы расчета напряженности поля, создаваемой передатчиком / С. Н. Песков // Теле-Спутник. – 2008. – № 10. – С. 94–97.
13. Песков С.Н. Расчет напряженности поля, создаваемой передатчиком. Часть 1. Кривые распространения / С. Н. Песков, А. Н. Подолянова // Теле-Спутник. – 2008. – № 8. – С. 80–83.
14. Локшин М. Основы планирования наземных сетей телевизионного и ОВЧ-ЧМ вещания. Зоны обслуживания радиостанций / М. Локшин // Broadcasting – 2006. – № 4. – С. 28–31.
15. Песков С. Н. Расчет зоны покрытия для цифрового эфирного вещания DVB-T/H. Часть 2. Сетевое планирование для DVB-H вещания передатчиком / С. Н. Песков // Теле-Спутник. – 2008. – № 6. – С. 14–20.
16. Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174–230 MHz and 470–862 MHz (RRC-06) – Geneva – 2006.
17. Смирнов А. В. Цифровое телевидение: от теории к практике / А. В. Смирнов, А. Е. Пескин. – М. : Горячая линия-Телеком, 2005. – 352 с.
18. Омелянюк И. В. Модель цифровой радиовещательной сети DVB-T / Н на базе IP технологий. Первые практические результаты в Киеве / И. В. Омелянюк // 625, UA. Информационно-технический журнал. – 2006. – № 8. – С. 52–54.
19. Цифрове ефірне телебачення України [Електронний ресурс] офіц. сайт. – URL: [http://www.efirtv2.tv/index\\_ukr.html](http://www.efirtv2.tv/index_ukr.html).
20. Методика определения зоны обслуживания одиночной передающей станции наземного цифрового ТВ-вещания стандарта DVB-T2 / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт радио». – М., 2014. – 140 с.
21. Об утверждении методики расчета зоны обслуживания РЭС наземного цифрового телевизионного вещания стандарта DVB-T2 для фиксированного приема в полосах частот 174–230 МГц и 470–790 МГц (14-26-10) / Решение Государственной комиссии по радиочастотам от 22 июля 2014 г. № 14–26–10. – М., 2014.

Стаття надійшла до редакції 19.09.2016.

Після доробки 01.02.2017.

Красовская Ю. А.<sup>1</sup>, Магро В. І.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Магістр Государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет», сотрудник телеканала Приват ТВ Днепро – «9 канал», Днепро, Украина

<sup>2</sup>Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры прикладной и компьютерной радиопизики, Днепропетровский национальный университет, Днепро, Украина

### ВНЕДРЕНИЕ ЦИФРОВОГО ТЕЛЕВИДЕНИЯ DVB-T2 НА 9 КАНАЛЕ В ГОРОДЕ ДНПРО

**Актуальность.** Решена задача перехода регионального телевизионного канала с аналогового вещания на цифровое вещание.

**Цель работы** – выявление и преодоление трудностей локального перехода на цифровое телевидение стандарта DVB-T2 на примере обычной региональной телекомпании.

**Метод.** Предложено два уровня перехода регионального телевизионного канала с аналогового вещания на цифровое вещание. Первый уровень включает в себе выбор оптимального формата видеоизображения для вещания в стандартах DVB-T2 и HDTV, а также два варианта замены оборудования телеканала, которые могут обеспечить цифровое наземное телевидение второго поколения и цифровое наземное телевидение высокой четкости. Наличие двух вариантов замены оборудования обусловлено ограниченностью средств, которые телекомпания может выделить на протяжении короткого временного интервала на техническое перевооружение. На втором уровне, уровне города, рассчитано реальную дальность покрытия цифрового вещания и предложены методы для его достижения.

**Результаты.** На примере обычной региональной телевизионной компании показана методика перехода с аналогового вещания на цифровое вещание. Расчеты, проведенные на примере телеканала Приват ТВ Днепро – «9 канал» города Днепро показали, что существующая аналоговая система фиксирования, обработки и транспортирования видеоизображения на региональном телеканале потребует полной замены оборудования. В зависимости от объема финансов, которые выделяются на техническое перевооружение, предложено два пути замены оборудования. Расчеты показали, что минимально удовлетворительное покрытие цифровым телевизионным сигналом в г. Днепро обеспечивается на расстоянии около 65 км. Впрочем, качество цифрового телевидения на границе зоны покрытия не обеспечивается в полной мере из-за неудовлетворительной напряженности поля в точках наибольшей удаленности от телевизионного центра.

**Выводы.** Разработана методика перехода регионального телевизионного канала с аналогового вещания на цифровое вещание. Ее можно рекомендовать для применения на практике с учетом местных особенностей на других региональных каналах Украины.

**Ключевые слова:** цифровое телевидение, стандарт DVB-T2, HDTV, разрешение, покрытие, телевизионное оборудование.

Krasovska Y. O.<sup>1</sup>, Magro V. I.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Master of the State Higher Educational Institution «National Mining University», TV employee of «Private TV Dnipro – «Channel 9», Dnipro, Ukraine

<sup>2</sup>Associate Professor, Associate Professor of Department of Applied and Computer Radiophysics, Dnipropetrovsk National University, Dnipro, Ukraine

### INTRODUCTION OF DIGITAL TELEVISION OF DVB-T2 ON THE 9 CHANNEL IN THE DNIPRO CITY

**Context.** The problem of the regional television channel transition from analogue broadcasting to digital broadcasting has been solved.

**Objective** is to identify and overcome the difficulties of the local transition to digital television standard DVB-T2 on the example of the usual regional television company.

**Method.** A two-level transition of the regional TV channel from analog to digital broadcasting is proposed. The first level includes the election of the best video format for broadcasting in the DVB-T2 standard and HDTV, as well as two options for replacing the television equipment that can provide digital terrestrial second generation digital terrestrial television and high definition television. The two options for replacing equipment are due to the limited funds that can allocate TV company for a short time interval on the technical re-equipment. At the second level, the city level to calculate the real range of coverage of digital broadcasting and the proposed methods of achieving it.

**Results.** In this example, the technique of the transition from analogue to digital broadcasting for usual regional television companies is shown. Calculations carried out on the example of TV Private TV Dnipro – «Channel 9», the city Dnipro showed that the existing analogue system fixing, processing and transportation of the video on the regional TV channel will require the complete replacement of the equipment. Depending on the volume of finances allocated for modernization, two ways of replacing equipment are suggested. Calculations showed that minimally satisfactory coverage of digital TV in the city Dnipro provided at a distance of about 65 km. However, the quality of digital television on the verge of coverage is not provided in full by poor field strength at the point of maximum distance from the TV center.

**Conclusions.** The method of transition of the regional TV channel from analogue broadcasting to digital broadcasting has been developed. It can be recommended for use in practice, considering local conditions in other regional channels in Ukraine.

**Keywords:** digital TV, DVB-T2 standard, HDTV, resolution, coverage, television equipment.

### REFERENCES

1. Makoveenko D. A., Husajn Maen Issledovanie propusknoy sposobnosti standarta tsifrovogo televideniya vtorogo pokoleniya DVB-T2, *Tsifrovie tehnologii*, 2009, No. 6, pp. 27–32.
2. Husajn Maen. Oblasti primeneniya metodov obrabotki izobrazheniy visokoy chetkosti, *Holodilnaya tehnika i tehnologiya*, 2010, No. 3, pp. 74–77.
3. Halil G., Husajn M. Problemi i perspektivi vnedreniya tsifrovogo televideniya visokoy chetkosti, *Tsifrovie tehnologii*, 2007, No. 1, pp. 49–57.
4. Husajn Maen, Osharovskaja E. V. Sovremennoe sostojanie razvitiya metodov dostavki televizionnih signalov, *Materialy Mignarodnoji naukovopraktichnoji konferencii «Tehnologii tsifrovogo movlennya: Strategiji vprovadgeniya»*, 24–25 chervnya 2010, Odesa. Odesa, 2010, pp. 78–82.
5. Peskov S. N., Kolpakov I. A. Rekomendatsii po vnedreniu DVB efirnogo vetchaniya, *Tele-Sputnik*, 2007, No. 2–5.
6. Halil G., Husajn M. Problemy vnedreniya televideniya visokoy chetkosti i novih pokoleniy televizionnogo veschaniya v stranah Blignego Vostoka, VII Megdunarodnaya konferentsiya po telekommunikatsiyam i teleradiovatschaniu. 21–23 oktyabrya 2009, Kiev. Kiev, Ekspoplaza, 2009, pp. 40.
7. Mihailov S. A. Husajn Maen Sosoyanie i perspektivi vnedreniya noveyshih system tsifrovogo veschaniya v mire, stranah Blignego Vostoka, *na Meterialy IV Mignarodoi naukovopraktichnoji konferencii «Problemi telekommunikatsij» Natsionalnogo tehničnogo univrsitetu Ukraini «Rijivskiy politehničnij institute»*. Institut telekommunikatsijnih system, NDI telekommunikatsij. 20-23 kvitnij 2010, Kijiv. Kijiv, 2010, pp. 28.
8. Mamaev N. Vnedrenie tsifrovogo nazemnogo veschaniya v ryade stran Evropy, *625*, 2002, No. 4, pp. 18–25.

9. Peskov S. N., Melnikova E. N. Antenna na dachu, *Tele-Sputnik*, 2014, No. 6, pp. 62–67.
10. Peskov S. N. Raschet zoni pokritiya dlya tsifrovogo efirnogo veschaniya DVB-T/H. Chast 1. Ponyatiya zony pokritiya dlya tsifrovogo veschaniya. Minimalnaya napryagennost elektricheskogo polya, *Tele-Sputnik*, 2008, No. 5, pp. 16–19.
11. Peskov S. N. Dalnost efirnogo priyoma, *Tele-Sputnik*, 2009, No. 10, pp. 34–38.
12. Peskov S. N. Analiticheskie metody rascheta napryagennosti polya, sozdavaemogo peredatchikom, *Tele-Sputnik*, 2008, No. 10, pp. 94–97.
13. Peskov S. N., Podolyanova A. N. Raschot napryazhonosti polya, sozdavayemoy peredatchikom. Chast' 1. Krivyie rasprostraneniya, *Tele-Sputnik*, 2008, No. 8, pp. 80–83.
14. Lokshin M. Osnovi planirovaniya nazemnykh setey televizionnogo i OVCH-CHM veschaniya. Zony obsluzhivaniya radiostantsiy, *Broadcasting*, 2006, No. 4, pp. 28–31.
15. Peskov S. N. Raschet zony pokritiya dlya tsifrovogo veschaniya DVB-T/H. Chast 2. Setevoye planirovanie dlya DVB-H veschaniya peredatchikom, *Tele-Sputnik*, 2008, No. 6, pp. 14–20.
16. Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06). Geneva – 2006.
17. Smirnov A. V., Peskin A. E. Tsifrovoe televidenie: ot teorii k praktike. Moscow, Gorjachaja liniya – Telekom, 2005, 352 p.
18. Omel'januk I.V. Model tsifrovoy radiovetschatelnoy seti DVB-T / H na baze IP tehnologiy. Pervii prakticheskie rezultati v Kieve, 625, *UA. Informatsijno-tehnicheskij gurnal*, 2006, No. 8, pp. 52–54.
19. Tsifrove efirne telebachennya Ukraini [Elektronic resource] ofits. sait. – URL: [http://www.efirt2.tv/index\\_ukr.html](http://www.efirt2.tv/index_ukr.html).
20. Metodika opredeleniya zony obsluzhivaya odinochnoy peredayushchey stantsii nazemnogo tsifrovogo TV-veschaniya standarta DVB-T2 / Federal'noye gosudarstvennoye unitarnoye predpriyatiye «Nauchno-issledovatel'skiy institut radio». – M., 2014. – 140 s.
21. Ob utverzhdenii metodiki raschota zony obsluzhivaniya RES nazemnogo tsifrovogo televizionnogo veschaniya standarta DVB-T2 dlya fiksirovannogo priyoma v polosakh chastot 174-230 MGts i 470-790 MGts (14–26–10) / Resheniye Gosudarstvennoy komissii po radiochastotam ot 22 iyulya 2014 g. № 14–26–10. – M., 2014.

<sup>1</sup>Аспірант кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

## ГІБРИДНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВІРТУАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖЕВИХ ФУНКЦІЙ

**Актуальність.** Проблема зростання мобільного трафіку даних та збільшення кількості сервісів набуває глобального рівня, крім того, збільшуються об'єми та частота надходження службового трафіку, що передається мережею, а тому виникає необхідність у його ефективному управлінні з метою забезпечення потрібної якості обслуговування користувачів та оптимального використання ресурсів мережі оператора зв'язку. В таких умовах навантаження на сервер, що створюється в процесі організації з'єднання та його обслуговування, має свої особливості. Динамічне управління ресурсами є корисним методом для роботи в умовах коливань, які спостерігаються у навантаженні систем зв'язку. Технологія віртуалізації дозволяє реалізувати даний підхід. Аналітична модель системи буде привабливою, оскільки вона зможе оцінити характеристики системи в широкому діапазоні умов і бути обчисленою порівняно легко. Вона також може залучати методи чисельної оптимізації для проектування системи.

**Мета.** Підвищення ефективності роботи мобільної мережі за допомогою оптимального виділення ресурсів у телекомунікаційному середовищі.

**Метод.** Аналіз відомих публікацій, присвячених віртуалізації мережеских функцій мобільної мережі, дав змогу виявити підхід до моделювання виділення ресурсів, а також показав відсутність рішень щодо важливих питань цього процесу (продуктивності управління, системи прогнозування навантаження).

**Результати.** Пропонується підхід до моделювання і дослідження системи гібридного динамічного управління ресурсами мережеских функцій, де ресурси віртуальним вузлам виділяються динамічно і опортуністично в залежності від передбачуваних потреб.

**Висновки.** У статті вирішено завдання побудови системи управління ресурсами для віртуалізованих мережеских функцій. Запропоновано метод адаптації величини інтервалу управління розподілом ресурсів мережеских функцій, який забезпечує динамічне налаштування роботи системи, що дозволяє зменшити кількість надлишкової службової інформації, яка передається в мережі, та розвантажити мережескі вузли. Побудовано модель системи обслуговування навантаження, за допомогою якої представлено метод прогнозування навантаження, який враховує як накопичені за довгий строк дані статистики, так і останні тенденції, які спостерігаються у мережі, що дозволяє досягати раціонального співвідношення затрат на управління та підсумкового значення якості обслуговування.

**Ключові слова:** Network Functions Virtualization, управління ресурсами, моніторинг, прогнозування навантаження.

### НОМЕНКЛАТУРА

CPU – Central Processing Unit;

NFV – Network Functions Virtualization;

NIC – Network Interface Card;

SDN – Software-Defined Networking;

SLA – Service Level Agreement;

VNE – Virtual Network Embedding;

$C_i$  – кількість ресурсів мережескої функції  $i$ ;

$d_i$  – цільовий час відповіді мережескої функції  $i$ ;

$I_{base}$  – базове значення інтервалу управління;

$K$  – константа нормалізації;

$q_i^0$  – довжина черги на початку вікна адаптації функції  $i$ ;

$q_i$  – середня довжина черги;

$s_i$  – середній час обслуговування запиту однією одиницею ресурсу;

$T_i$  – середній час відповіді;

$W$  – інтервал управління

$\lambda_{obs(t)}$  – реальна інтенсивність надходження навантаження протягом інтервалу  $t$ ;

$\lambda_{pred(t)}$  – передбачена інтенсивність надходження навантаження під час інтервалу  $t$ ;

$\lambda_{basepred(t)}$  – базова передбачена інтенсивність надходження навантаження під час інтервалу  $t$ ;

$\mu_i$  – оцінка інтенсивності обслуговування.

### ВСТУП

Проблема зростання мобільного трафіку даних та збільшення кількості сервісів набуває глобального рівня,

крім того, збільшуються об'єми та частота надходження службового трафіку, що передається мережею, а тому виникає необхідність у його ефективному управлінні з метою забезпечення потрібної якості обслуговування користувачів та оптимального використання ресурсів мережі оператора зв'язку. В таких умовах навантаження на сервер, що створюється в процесі організації з'єднання та його обслуговування має свої особливості.

Завдяки новим віртуалізованим архітектурам, заснованим на SDN і NFV, можна забезпечити нові, диференційовані схеми функціонування, які будуть прибутковими для оператора, та основою для динамічного використання ресурсів. Визначення ресурсів, необхідних для належного функціонування віртуалізованих мереж, у значній мірі залежить від точної оцінки характеристик обслуговування навантаження. Правильне управління ресурсами є складним завданням через коливання навантаження. Як правило, навантаження дата центрів мають дуже пульсуючий характер і часто значно змінюються протягом дня. Тим не менш, багато навантажень в дата центрах зазвичай мають періодичні шаблони. Якщо визначити ці шаблони в навантаженні, тоді зможемо внести зміни відповідно до них в розподіл ресурсів і, отже, підвищити точність надання ресурсів і знизити енергоспоживання.

Таким чином, з огляду на труднощі в прогнозуванні пікових навантажень, у віртуалізованій мережі слід використовувати комбінацію прогностичного і реактивного управління.

У цьому напрямку в статті пропонується підхід до моделювання і дослідження системи гібридного динамічного управління ресурсами мережевих функцій у мережі телекомунікаційного оператора, де замість того, щоб виділяти фіксовану кількість ресурсів для даного віртуалізованого мережевого функціонального блоку протягом всього його життєвого циклу, ресурси віртуальним вузлам виділяються динамічно і опортуністично в залежності від передбачуваних потреб. З цією метою використовується гібридний підхід, який виділяє ресурси віртуальним вузлам з використанням методики прогнозування.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою запропонованого методу надання ресурсів є виділення достатньої їх кількості для мережевих функцій, так що їх SLA можна задовольнити навіть у присутності пікового навантаження. В основі будь-якого алгоритму надання ресурсів лежать два питання: скільки надавати і коли.

Скільки надавати: для вирішення питання про те, скільки ресурсів виділити для кожної мережевої функції, будується аналітична модель. Представлена модель приймає в якості вхідних даних інтенсивність надходження вхідних запитів і вимоги обслуговування окремого запиту, і обчислює кількість ресурсів, необхідних кожному мережевому функціональному блоку, щоб впоратися з вимогами.

Коли надавати: рішення про те, коли надавати ресурси, залежить від динаміки навантажень. Телекомунікаційні навантаження зазнають довгострокових змін, таких як вплив години дня або сезонні ефекти, а також короткострокових коливань таких як спалахи навантаження. У той час як довгострокові коливання можуть бути передбачені заздалегідь, спостерігаючи за змінами в минулому, короткострокові коливання менш передбачувані, а в деяких випадках, не передбачувані. Запропонована методика використовує два різних методи для роботи в умовах змін, які спостерігаються в різних часових масштабах. Використовується прогностичне управління ресурсами для оцінки навантаження і відповідного управління, а також реактивне управління ресурсами для виправлення помилок у довгострокових прогнозах або для реагування на непередбачені спалахи навантаження.

Розглянемо мережу, в якій функціонує кілька мережевих функцій. Передбачається, що кожна така мережева функція вказує бажану вимогу до якості обслуговування (QoS); при цьому в даному випадку передбачаємо, що вимоги до QoS визначені в термінах цільового часу відповіді, аналогічно до [1]. Метою системи є забезпечення того, що середній час відповіді (або деякий процентиль часу відповіді), який спостерігається запитом мережевої функції не перевищує бажаний цільовий час відповіді. Загалом, кожен вхідний запит обслуговується декількома апаратними та програмними ресурсами на сервері, такими як CPU, NIC, диск і т. д. Припускаємо, що заданий цільовий час відповіді розділяється на кілька значень часу відповіді для конкретних ресурсів по одному для кожного такого ресурсу. Таким чином, якщо кожен запит на кожному ресурсі не витрачає часу більше, ніж призначене цільове значення, то загальний цільовий час відповіді для сервера буде задоволений [1]. Задача розді-

лення зазначеного значення часу відповіді сервера на значення часу відповіді для конкретного ресурсу виходить за рамки даного дослідження; у статті передбачається, що такі конкретні для ресурсу значення часу відповіді задані. Для простоти викладу припускаємо, що в системі наявний лише один тип ресурсу.

Формально,  $d_i$  позначає цільовий час відповіді мережевої функції  $i$  і  $T_i$  – спостережуваний середній час відповіді, тоді мережеві функції потрібно виділити таку кількість ресурсів, щоб  $T_i \leq d_i$ .

Використаємо таку постановку задачі щоб одержати механізм динамічного виділення ресурсів, який описано далі.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Хоча NFV обіцяє істотну економію коштів, гнучкість і простоту розгортання, потенційні проблеми в реалізації віртуалізованих мережевих елементів, які можуть підтримувати вимоги до продуктивності реального світу, і досі залишаються відкритим питанням, й в даній часті NFV все ще перебуває на початкових етапах реалізації.

Кілька дослідницьких праць були зосереджені на розробці адаптивних систем, які можуть реагувати на зміни у навантаженні в контексті систем зберігання, загальних операційних систем, мережевих сервісів, веб-серверів і Інтернет дата центрів (наприклад, [2]). У даній статті розглядається абстрактна модель серверного ресурсу і представляються методи динамічного розподілу ресурсів; запропоновані модель і методи розподілу ресурсів застосовні до багатьох сценаріїв, де система або ресурс можуть абстрагуватись за допомогою GPS сервера.

Одним з ключових аспектів у області віртуалізації мережі є виділення фізичних ресурсів віртуальним функціям мережі. Вбудовування Віртуальної Мережі (VNE) є добре вивченою задачею. Тим не менше, більшість сучасних рішень пропонують статичну схему розподілу ресурсів, в якій коли віртуальна мережа відображається, перерозподіл ресурсів не відбувається протягом всього її життєвого циклу. Існує обмежена кількість децентралізованих і динамічних рішень VNE (як [3] або [4]). І навіть підходи, які пропонують рішення по динамічному вбудовуванню віртуальної мережі, все одно виділяють фіксовану кількість ресурсів для віртуальних вузлів і каналів на увесь період існування. Оскільки мережевий трафік не є статичним, це може привести до неефективного використання загальних мережевих ресурсів, особливо якщо фізична мережа відхиляє запити на вбудовування нових віртуальних мережевих функцій, при цьому резервуючи ресурси для віртуальних мережевих функцій, які знаходяться в умовах низької завантаженості [5].

Більшість існуючих робіт по динамічному управлінню ресурсами засновані на трьох підходах: теорії управління, моделюванні динаміки роботи і прогнозуванні навантаження [5]. Серед адаптивних систем, що використовують метод на основі теорії управління, можна виділити роботу [6]. Серед робіт, що засновані на динаміці роботи, можливо назвати працю [7]. Автори [8] використовують прогнозування навантаження.

Підводячи підсумок, різниця між запропонованим у даній статті підходом і згаданими вище є те, що в ньому ресурси, зарезервовані для використання віртуальними

мережевими функціями, не залишаються незмінними протягом усього життя віртуальної мережі. Здійснюється моніторинг віртуальних вузлів, і на основі їх реальних потреб у ресурсах, ресурси перерозподіляються, і в цьому випадку невикористані ресурси повертаються до фізичної мережі для використання іншими віртуальними мережами.

В аспекті того, яким чином отримується інформація про поточну ситуацію в мережі, управління ресурсами в NFV мережах подібне до управління прикладними програмами в дата центрах і хмарах. Існуючі рішення управління ресурсами серверів можуть бути класифіковані як прогностичні і реактивні рішення. Прогностичне виділення ресурсів передбачає наявність передбачуваного і стабільного шаблону у вимогах і розподіляє об'єми, як правило, в масштабі часу декількох годин або днів на основі шаблону. Однак, великі, непередбачувані сплески вимог можуть викликати серйозні порушення SLA. Реактивне виділення ресурсів, з іншого боку, виділяє ресурси в короткі проміжки часу (наприклад, кожні кілька хвилин) у відповідь на зміни навантаження. Чисто реактивні політики потенційно можуть швидко реагувати на зміни навантаження, але такі проблеми, як непередбачуваність, нестабільність і високі витрати управління обмежують їх застосування на практиці [9].

Отже, прогнозувати пік навантаження прикладної програми та виділяти ресурси на основі оцінок найгіршого випадку вкрай складно [10]. З огляду на труднощі в прогнозуванні пікових навантажень, прикладна програма має використовувати комбінацію прогностичного і реактивного управління. У той час як прогностичні методи добре працюють для онлайн прогнозування на великих часових інтервалах від декількох хвилин до декількох годин, реактивні методи дозволяють прогнозувати навантаження на короткі часові інтервали до декількох хвилин і швидко реагувати на нестационарні перевантаження [1].

Існує кілька підходів, які поєднують в собі прогностичне і реактивне управління [9, 10]. Хоча ці підходи мають спільні риси з гібридним підходом, який пропонується у даній статті, вони розрізняються за кількома аспектами. Запропонований підхід спрямований на оптимізацію продуктивності, енергоспоживання і вартості виділення ресурсів одночасно. На основі гібридної системи управління ресурсами розроблено метод динамічного моніторингу для ефективного управління ресурсами мережі та зменшення кількості службової інформації – інтервали управління ресурсами мають змінну довжину, тоді як в інших підходах до управління використовуються прості фіксовані інтервали. В [9] схожим чином використовується змінна довжина інтервалів, однак на протиположному підходу, запропонований у статті підхід довжину інтервалів визначає динамічно в залежності від фактичної ситуації в мережі.

Основна мета полягає в тому, щоб розробити систему, яка може реагувати на перехідні зміни в навантаженні, в той час як теоретичний підхід на основі масового обслуговування намагається планувати запити, базуючись на стаціонарному навантаженні. Метод управління ресурсами на основі моделі було запропоновано в [1], що виконує розподіл ресурсів на основі моделювання ресурсу для співвіднесення метрик QoS і часток ресурсів,

що виділяються прикладній програмі. Робота [1] подібна до запропонованого у статті підходу, але у ньому модель масового обслуговування у часовій області адаптована до задачі віртуалізації мережевих функцій, а також доповнена механізмом вимірювання та передбачення.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Щоб виконати динамічне виділення ресурсів, засноване на вищевказаному формулюванні, на кожному сервері необхідно буде використовувати три компоненти, як вказано у [1]: (1) модуль моніторингу, який вимірює навантаження і показники продуктивності кожної мережевої функції (такі як інтенсивність надходження запитів, середній час відповіді тощо), (2) модуль прогнозування, який використовує вимірювання з модуля моніторингу для оцінки характеристик навантаження в найближчому майбутньому, і (3) модуль розподілення ресурсів, який використовує ці оцінки навантаження для визначення кількості ресурсів, яку необхідно виділити мережевим функціям. На рис. 1 показані ці три компоненти [1].

Використовуючи традиційні методи моніторингу стану ресурсів мережі, надлишкова службова інформація значно збільшується, що може негативно впливати на ефективність роботи мережі загалом через завантаженість каналів. Тому пропонується застосовувати механізм, суть якого полягає у динамічній зміні інтенсивності здійснення управління станом мережевого елемента залежно від різниці між передбаченим значенням навантаження і фактичним. Формула (1) описує принцип зміни частоти управління, де її значення розраховується з урахування певної базової величини  $I_{base}$  та історичних даних навантаження та його прогнозу:

$$W(t) = I_{base} - K \cdot \sum_{j=t-h}^{t-1} \frac{\max(0; \lambda_{obs}(j) - \lambda_{pred}(j))}{h} I_{base}. \quad (1)$$

На рис. 2 показано адаптацію частоти здійснення управління станом мережевого елемента до відхилення реального навантаження від передбаченого на мережевому елементі.

Модуль розподілу ресурсів викликається періодично (кожне вікно адаптації або при досягненні порогу) для динамічного розділення ресурсного об'єму між різними мережевими функціями, які працюють на загальних серверах в мережі. Як вже сказано, алгоритм адаптації запускається кожні  $W$  часові одиниці. Нехай  $q_i^0$  позначає довжину черги на початку вікна адаптації. Нехай  $\lambda_i$  позначає оцінку інтенсивності надходження заявок і  $\mu_i$  позначає оцінку інтенсивності обслуговування у наступному вікні адаптації (тобто, на наступні  $W$  часові одиниці). Тоді, припускаючи що значення  $\lambda_i$  і  $\mu_i$  є константними, довжина черги в будь-який момент часу  $t$  всередині наступного вікна адаптації задається формулою (2):

$$q_i(t) = \max(0; q_i^0 + (\lambda_i - \mu_i)t). \quad (2)$$

Оскільки ресурс моделюється як GPS сервер, інтенсивність обслуговування запиту мережевої функції дорівнює  $\mu_i = C_i / s_i$ . Середня довжина черги під час вікна адаптації визначається за формулою (3):

$$q_i = \frac{1}{W} \int_0^W q_i(t) dt. \quad (3)$$

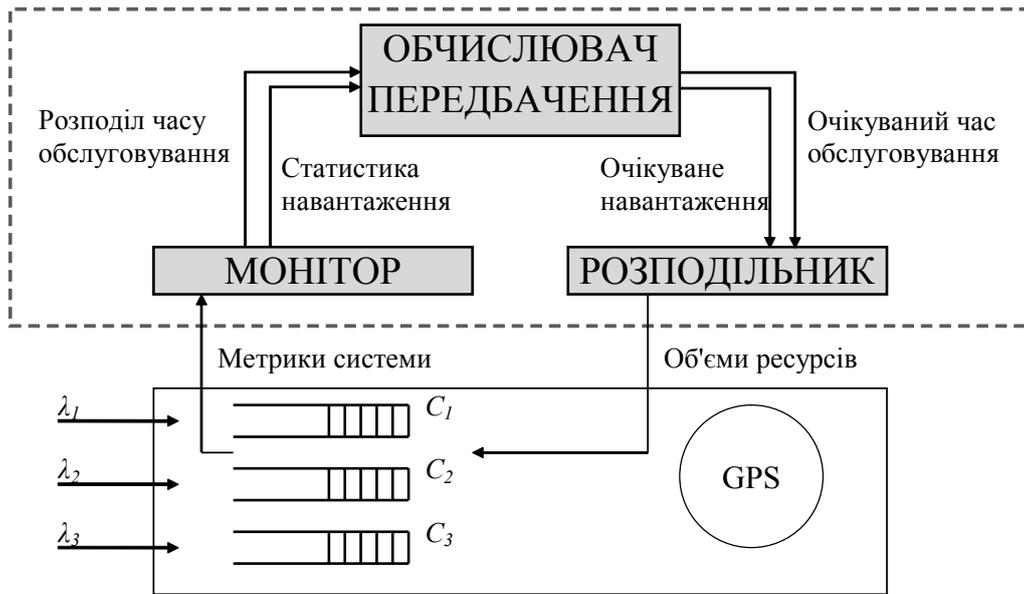
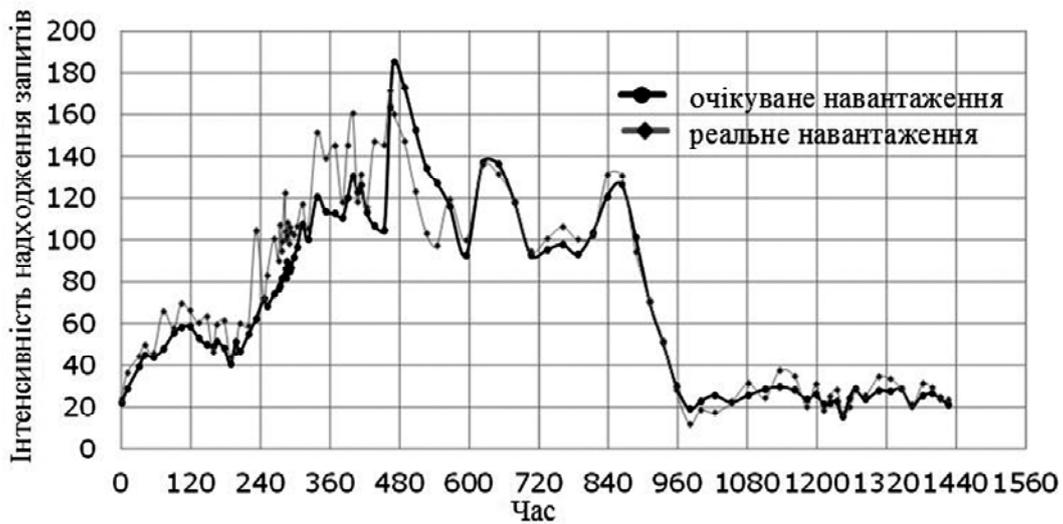
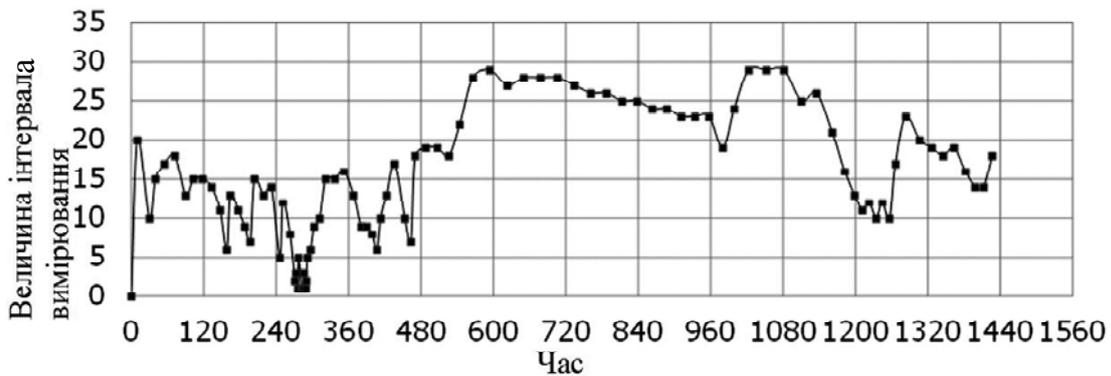


Рисунок 1 – Система динамічного виділення ресурсів [1]



а



б

Рисунок 2 – Динамічна зміна частоти адаптації:  
 а – навантаження мережевого елемента;  
 б – зміна інтенсивності адаптації відповідно до відхилення реального навантаження від очікуваного

Середній час відповіді  $T_i$  у той самий інтервал часу оцінюється за формулою (4):

$$T_i = \frac{q_i + 1}{\mu_i} \quad (4)$$

Параметри такої моделі залежать від її поточних характеристик, відповідно, ця модель застосовна в онлайн сценарії реагування на динамічні зміни в навантаженні.

Мережеві функції потрібно виділити кількість ресурсів, так що  $T_i \leq d_i$ , тоді кількість ресурсів, виділена мережеві функції  $C_i$  повинна задовольняти умову формули (5):

$$C_i \geq s_i \frac{q_i + 1}{d_i}. \quad (5)$$

Модифікований обчислювач передбачення інтенсивності надходження навантаження заснований на методиці, запропонованій в [10], використовує минулі спостереження за навантаженням, щоб передбачити пікову вимогу, яка буде зазнаватися протягом часу  $W$ .

Прогнозоване значення протягом наступного інтервалу  $\lambda_{pred}$  обчислюється відповідно до певного базового прогнозованого значення  $\lambda_{basepred}$  і коригується з використанням помилки, що спостерігається протягом певного історичного періоду  $h$ , відповідно до формули (6):

$$\lambda_{pred}(t) = \lambda_{basepred}(t) + \sum_{j=t-h}^{t-1} \frac{\lambda_{obs}(j) - \lambda_{pred}(j)}{h}. \quad (6)$$

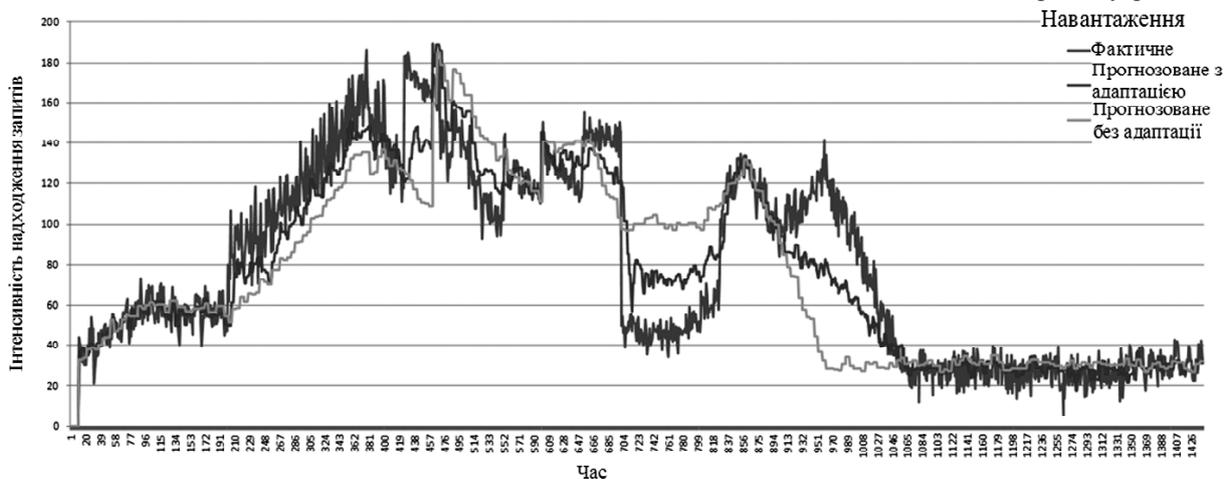


Рисунок 3 – Результати моделювання системи з динамічною адаптацією величини інтервала управління та прогнозом навантаження і системи без них



Рисунок 4 – Результати моделювання системи з 4 кроками управління

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо задачу в системі Mathcad. Розглянемо роботу одного блоку протягом одного дня (1440 хвилин) і будемо вважати заданою базову компоненту прогнозованої інтенсивності надходження заявок протягом кожної хвилини  $\lambda_{pred}$ , а також нехай відомо середнє значення часу обслуговування заявки однією одиницею ресурсу  $s_i$ , і воно не змінюється, також припускаємо наявність ресурсу одного типу. Нехай вікно адаптації динамічно визначається на основі його базового значення і чотирьох останніх значень з історії моніторингу, де базове значення вікна адаптації складає 5 хвилин. Обмежень на розмір черги не вводимо, однак для розрахунків приймаємо, що у кінці інтервалу адаптації теоретичне значення розміру черги в поточних умовах складає 40 запитів.

Проведено збір статистики навантаження протягом одного дня тижня для місяця роботи серверу сайту, в результаті чого було визначено прогнозовану базову компоненту інтенсивності надходження заявок протягом кожної хвилини цього дня.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Моделювання інтенсивності запитів на сервер сайту показало наступні результати.

На рис. 3 подано зміну величини інтервалу управління і зміни у прогнозованому значенні інтенсивності надходження навантаження у порівнянні з навантаженням, що фактично надійшло на сервер сайту протягом дня. З метою порівняння, на рис. 4 та рис. 5 подано результати моделювання для систем з іншими значеннями інтервалів управління.

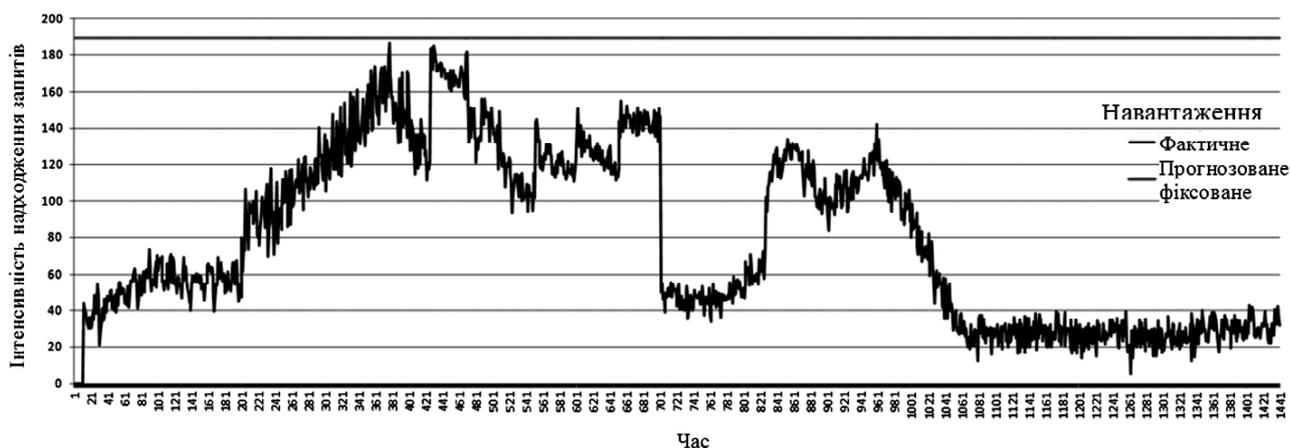


Рисунок 5 – Результати моделювання системи з фіксованим управлінням

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Для телекомунікаційної системи важливо забезпечити, з одного боку, бажану якість обслуговування користувачів, тобто виділити достатню кількість ресурсів для вузла, а з іншого боку – цінні ресурси потрібно використовувати доцільно, тобто не допускати зайвих їх витрат, що може впливати на витрати оператора та доступність ресурсів для інших віртуалізованих вузлів. З огляду на це, як «від’ємна», так і «додатня» помилка у прогнозуванні є небажаною.

Результати моделювання показали, що помилка у прогнозованому значенні у порівнянні з реальним може скласти 16%, при цьому «додатня» помилка складає 9% від реальної інтенсивності надходження заявок. Якщо не застосовувати систему динамічного регулювання величини вікна адаптації та систему врахування історичних даних при передбаченні, то помилка складатиме 26%, «додатня» помилка – 15%, з чого можна зробити ще і той висновок, що ресурси будуть застосовуватись вкрай неефективно. Для порівняння на рис. 4 також зображена система з усього лише 4 вікнами адаптації на день – для неї помилка у прогнозованому навантаженні складає вже аж 53%, додатково на рис. 5 оцінено систему без динамічного управління ресурсами, тобто де ресурси виділяються під найгірший випадок – тут помилка буде дорівнювати 235%.

## ВИСНОВКИ

Визначення характеристик застосування системи віртуалізації ресурсів мережі показало доцільність її використання для вирішення актуальних телекомунікаційних проблем, хоча такі фактори, як підвищена складність роботи і проблеми управління в порівнянні з перевагами даного підходу, повинні бути ретельно проаналізовані, перш ніж застосовувати його у системі зв’язку.

У статті обговорювалось те, що у присутності динамічно змінюваних навантажень, потрібні методи динамічного розподілу ресурсів, для того щоб забезпечити гарантії для віртуалізованих мережевих функцій, що працюють на загальних дата центрах. Для вирішення цієї проблеми представлено систему, яка поєднує в собі онлайн вимірювання з методами прогнозування і розподілу ресурсів. Зокрема, розроблено новий метод моніторингу та вимірювання, застосовуючи який можливо

зменшити кількість службової інформації, що циркулює у мережі, та уникнути негативних явищ перевантаження мережевих функцій. Для того, щоб захопити перехідну поведінку навантажень мережевих функцій, отримала подальший розвиток модель сервера GPS. Застосовано метод, який поєднує прогностичне і реактивне надання ресурсів: прогностичне надання ресурсів виділяє ресурси завчасно в очікуванні певного пікового навантаження, в той час як реактивне надання ресурсів вносить корективи після того, як спостерігалось аномальне збільшення навантаження.

Проведено оцінку методів з використанням моделювання в системі Mathcad. Результати показали, що ці методи можуть раціонально розподіляти ресурси системи, особливо при перехідних умовах перевантаження.

Система може застосовуватись для управління розгортанням віртуалізованих мережевих функцій на нижчорозташованій фізичній інфраструктурі для мінімізації витрат оператора зв’язку та покращення якості обслуговування абонентів.

У майбутньому планується оцінити компроміс між точністю та ефективністю використовуючи більш складні моделі аналізу часових рядів для прогнозування.

## ПОДЯКИ

Роботу проведено в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи «Технологія обробки сервісів з інтеграцією інформаційних ресурсів в системах підтримки операційної діяльності підприємств зв’язку» 0115U000217.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Chandra A. Dynamic resource allocation for shared data centers using online measurements / A. Chandra, W. Gong, P. Shenoy // Quality of service : 11th International Workshop, Berkeley, CA 2–4 June 2003 : proceedings. – Springer, 2003. – P. 381–398.
2. Sampaio L. R. Towards practical auto scaling of user facing applications / L. R. Sampaio, R. V. Lopes // Cloud Computing and Communications (LATIN CLOUD) : 2012 IEEE Latin America Conference, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil, 26–27 November 2012 : proceedings. – IEEE, 2012. – P. 60–65.
3. Virtual network embedding for evolving networks / [Z. Cai, F. Liu, N. Xiao et al.] // Global Telecommunications (GLOBECOM 2010) : conference, Miami, Florida, 6–10 December 2010 : proceedings. – IEEE, 2010. – P. 1–5.

4. A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests / [G. Sun, H. Yu, V. Anand, L. Li] // *Future Generation Computer Systems*. – 2013. – Vol. 29, № 5. – P. 1265–1277.
5. Design and Evaluation of Learning Algorithms for Dynamic Resource Management in Virtual Networks / [R. Mijumbi, J.-L. Gorricho, J. Serrat et al.] // *Network Operations and Management Symposium (NOMS), Krakow, 5–9 May 2014*. – IEEE, 2014. – P. 1–9.
6. Patikirikorala T. A multi-model framework to implement self-managing control systems for QoS management / [T. Patikirikorala, A. Colman, J. Han, and L. Wang] // *Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems: symposium, Waikiki, Honolulu, 21–28 May 2011: proceedings*. – New York: ACM, 2011. – P. 218–227.
7. Game Theoretic Distributed Dynamic Resource Allocation with Interference Avoidance in Cognitive Femtocell Networks / [W. Lai, M. Chiang, S. Lee, T. Lee] // *Wireless Communications and Networking: conference, Shanghai, 7–10 April 2013: proceedings*. – IEEE, 2013. – P. 3364–3369.
8. Prediction-Based Dynamic Resource Allocation for Video Transcoding in Cloud Computing / [F. Jokhio, A. Ashraf, S. Lafond et al.] // *Parallel, Distributed, and Network-Based Processing: 21st Euromicro International Conference, Belfast, 27 February – 1 March 2013: proceedings*. – IEEE, 2012. – P. 254–261.
9. Gandhi A. Minimizing Data Center SLA Violations and Power Consumption via Hybrid Resource Provisioning / [A. Gandhi, Y. Chen, D. Gmach and other] // *Green Computing: International Conference and Workshops, Orlando, FL, 25–28 July 2011: proceedings*. – IEEE, 2011. – P. 1–8.
10. Agile dynamic provisioning of multi-tier Internet applications / [B. Urgaonkar, P. Shenoy, A. Chandra and other] // *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*. – 2008. – Vol. 3, № 1. – P. 1–39.

Стаття надійшла до редакції 27.10.2016.

Після доробки 03.12.2016.

Сулима С. В.<sup>1</sup>, Скулиш М. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Аспирант кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна

#### ГИБРИДНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ РЕСУРСАМИ ДЛЯ ВИРТУАЛИЗИРОВАННЫХ СЕТЕВЫХ ФУНКЦИЙ

**Актуальность.** Проблема роста мобильного трафика данных и увеличения количества сервисов приобретает глобальный уровень, кроме того, увеличиваются объемы и частота поступления служебного трафика, передаваемого сетью, а поэтому возникает необходимость в его эффективном управлении с целью обеспечения требуемого качества обслуживания пользователей и оптимального использования ресурсов сети оператора связи. В таких условиях нагрузка на сервер, создаваемая в процессе организации соединения и его обслуживания, имеет свои особенности. Динамическое управление ресурсами является полезным методом для работы в условиях колебаний, наблюдаемых в нагрузке систем связи. Технология виртуализации позволяет реализовать данный подход. Аналитическая модель системы будет привлекательной, поскольку она сможет оценить характеристики системы в широком диапазоне условий и быть рассчитанной сравнительно легко. Она также может привлекать методы численной оптимизации для проектирования системы.

**Цель.** Повышение эффективности работы мобильной сети с помощью оптимального выделения ресурсов в телекоммуникационной среде.

**Метод.** Анализ известных публикаций, посвященных виртуализации сетевых функций мобильной сети, позволил выявить подход к моделированию выделения ресурсов, а также показал отсутствие решений по важным вопросам этого процесса (производительности управления, системы прогнозирования нагрузки).

**Результаты.** Предлагается подход к моделированию и исследованию системы гибридного динамического управления ресурсами сетевых функций, где ресурсы виртуальным узлам выделяются динамически и оппортунистически в зависимости от прогнозируемых потребностей.

**Выводы.** В статье решена задача построения системы управления ресурсами для виртуализированных сетевых функций. Предложен метод адаптации величины интервала управления распределением ресурсов сетевых функций, который обеспечивает динамическую настройку работы системы, что позволяет уменьшить количество избыточной служебной информации, передаваемой в сети, и разгрузить сетевые узлы. Построена модель системы обслуживания нагрузки, с помощью которой представлен метод прогнозирования нагрузки, учитывающий как накопленные за длительный срок данные статистики, так и последние тенденции, наблюдаемые в сети, что позволяет достигать рационального соотношения затрат на управление и итогового значения качества обслуживания.

**Ключевые слова:** Network Functions Virtualization, управление ресурсами, мониторинг, прогнозирование нагрузки.

Sulima S.<sup>1</sup>, Skulysh M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Past-graduate student of Department of Information and Telecommunication Networks, National University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information and Telecommunication Networks, National University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine

#### HYBRID RESOURCE PROVISIONING SYSTEM FOR VIRTUAL NETWORK FUNCTIONS

**Context.** The problem of growth of the mobile data traffic and the number of services becomes global, moreover, volume and frequency of control traffic transmitted through the network are increasing, and therefore there is a need for its effective management to ensure the quality of service required by users and optimal use of mobile network resources. In such circumstances, the load on the server that is created in the process of establishing the connection and its serving has its considerations. Dynamic resource provisioning is a useful technique for handling the variations seen in communication systems workloads. Virtualization technology allows to implement this approach. An analytic model of a system would be attractive as it would be able to evaluate system characteristics under a wide range of conditions, and to be computed comparatively easily. It is also can incorporate numerical optimization techniques for system design.

**Objective.** To improve the efficiency of mobile network through optimal resource allocation in telecommunication environment.

**Method.** Analysis of the known publications devoted to virtualization of network functions of mobile network has shown the modeling approach to resource allocation and also has shown the absence of decisions on important issues of this process (performance of management, load prediction system).

**Results.** An approach to model and investigate hybrid dynamic system of network functions resource management, where resources are provided to virtual nodes dynamically and opportunistically based on predicted needs, is proposed.

**Conclusions.** In the paper the problem of provisioning system design for virtualized network functions is solved. A method for adapting the size of network function's resource allocation control interval is proposed that provides dynamic configuration of the system, reducing excessive service data transmitted in the network, and decrease the load of network nodes. The workload service system model is built which outlines a method of workload forecasting, which takes into account long-term accumulated statistics and recent trends observed in a network that allows a rational level of management costs and final values of quality of service.

**Keywords:** Network Functions Virtualization, resource provisioning, monitoring, workload forecasting.

## REFERENCES

1. Chandra A., Gong W., Shenoy P. Dynamic resource allocation for shared data centers using online measurements, *Quality of service : 11th International Workshop, Berkeley, CA 2-4 June 2003 : proceedings*. Springer, 2003, pp. 381-398.
2. Sampaio L. R., Lopes R. V. Towards practical auto scaling of user facing applications, *Cloud Computing and Communications (LATIN CLOUD) : 2012 IEEE Latin America Conference, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil, 26-27 November 2012 : proceedings*, IEEE, 2012, pp. 60-65.
3. Cai Z., Liu F., Xiao N., Liu Q., and Wang Z. Virtual network embedding for evolving networks, *Global Telecommunications (GLOBECOM 2010) : conference, Miami, Florida, 6-10 December 2010 : proceedings*. IEEE, 2010, pp. 1-5.
4. Sun G., Yu H., Anand V., Li L. A cost efficient framework and algorithm for embedding dynamic virtual network requests, *Future Generation Computer Systems*, 2013, Vol. 29, No. 5, pp. 1265-1277.
5. Mijumbi R., Gorricho J.-L., Serrat J., Claeysy M., Turcky F. D., Latr S. Design and Evaluation of Learning Algorithms for Dynamic Resource Management in Virtual Networks, *Network Operations and Management Symposium (NOMS), Krakow, 5-9 May 2014*, IEEE, 2014, pp. 1-9.
6. Patikirikoralala T., Colman A., Han J., and Wang L. A multi-model framework to implement self-managing control systems for QoS management, *Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems : symposium, Waikiki, Honolulu, 21-28 May 2011 : proceedings*. New York, ACM, 2011, pp. 218-227.
7. Lai W., Chiang M., Lee S., Lee T. Game Theoretic Distributed Dynamic Resource Allocation with Interference Avoidance in Cognitive Femtocell Networks, *Wireless Communications and Networking : conference, Shanghai, 7-10 April 2013 : proceedings*. IEEE, 2013, pp. 3364-3369.
8. Jokhio F. Ashraf A., Lafond S., Porres I., Lilius J. Prediction-Based Dynamic Resource Allocation for Video Transcoding in Cloud Computing, *Parallel, Distributed, and Network-Based Processing : 21st Euromicro International Conference, Belfast, 27 February - 1 March 2013 : proceedings*. IEEE, 2012, pp. 254-261.
9. Gandhi A., Chen Y., Gmach D., Arlitt M., and Marwah M. Minimizing Data Center SLA Violations and Power Consumption via Hybrid Resource Provisioning, *Green Computing : International Conference and Workshops, Orlando, FL, 25-28 July 2011 : proceedings*. IEEE, 2011, pp. 1-8.
10. Urgaonkar B., Shenoy P., Chandra A., Goyal P., Wood T. Agile dynamic provisioning of multi-tier Internet applications, *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems (TAAS)*, 2008, Vol. 3, No. 1, pp. 1-39.

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 62-5:004.94

Кондратець В. О.<sup>1</sup>, Мацуй А. М.<sup>2</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

### ВІРТУАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ В ПІСКОВОМУ ЖОЛОБІ ОДНОСПІРАЛЬНИХ КЛАСИФІКАТОРІВ

**Актуальність.** Бідні залізні руди, які потребують збагачення, є сировинною основою чорної металургії. Їх подрібнення у перших стадіях в наслідок перевитрати електроенергії, сталевих куль і футеровки погіршує конкурентоспроможність продукції. Зменшити перевитрати можливо автоматизацією цих процесів, однак перепоною на цьому шляху є нерозв'язаність задачі отримання інформації про піськове навантаження з необхідною точністю, хоч проводились широкі та тривалі дослідження. Прогресивний віртуальний підхід відкриває перспективи вирішення даної проблеми.

**Метою** даної роботи є розробка математичної моделі віртуального визначення характеристик піського потоку на виході механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром, який достатньо просто, точно та безконтактно можливо виміряти порівняно недорогим технічним засобом.

**Метод.** Запропоновано метод графоаналітичного моделювання, де розглядається піськове тіло класифікатора (матеріал між двома сусідніми витками спіралі), яке подається горизонтальними та вертикальними шарами, створюючи вздовж висоти та довжини елементи  $\Delta h \times \Delta l$ , що дозволяє отримувати залежності об'єму пісків у вертикальних шарах від довжини піського тіла. Дані залежності при будь-якій висоті, кратній  $\Delta h$ , що мають мінімум і максимум, апроксимувалися математичними виразами у вигляді семи членів ряду Фур'є. Вони встановлюють зв'язок між їх конкретними складовими та висотою піського тіла. Використання даних зв'язків надає можливість знаходити миттєві об'ємні та масові витрати матеріалу в піському жолобі при будь-якому значенні висоти пісків.

**Результати.** Отримана математична модель процесу розвантаження пісків у вигляді трьох основних і двадцяти двох додаткових рівнянь дозволяє визначати характеристики піського потоку за висотою піського тіла класифікатора. Миттєве значення витрати змінюється за достатньо складною залежністю, яка зберігається при різних висотах піського тіла. При зростанні висоти закономірно збільшується як середнє, так і миттєве значення масової витрати пісків.

**Висновки.** Вперше отримано математичну модель, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у піський жолоб односпірального класифікатора за вимірною висотою піського тіла. Завдяки цьому можливо стабілізувати розрідження пульпи у кульовому млині, підвищити його продуктивність, якість подрібненого твердого та покращити експлуатаційні характеристики технологічного обладнання і, як наслідок, зменшити перевитрати при подрібненні руд.

**Ключові слова:** односпіральний класифікатор, миттєва масова витрата пісків, віртуальне визначення, математична модель.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$a_0$  – вільний член тригонометричного поліному;  
 $a_k$  – член тригонометричного поліному;  
 $B_C$  – крок спіралі класифікатора;  
 $b_k$  – член тригонометричного поліному;  
 $c$  – граничне значення кількості вертикальних шарів у піському тілі;  
 $D$  – символ операції перемноження;  
 $\Delta h$  – висота горизонтальних шарів піського тіла;  
 $h_C$  – висота нижньої частини піського тіла;  
 $h_{\max}$  – найбільше значення висоти піського тіла;  
 $h_p$  – висота робочих елементів спіралі;

$K_{1,2,\dots,7}$  – відповідно вільний член, коефіцієнти при другому, третьому, четвертому, п'ятому, шостому і сьомому членах;

$K_p$  – коефіцієнт розпушення;

$k$  – кількість пар гармонічних складових;

$\Delta l$  – довжина вертикальних шарів піського тіла;

$m$  – найбільша кількість пар гармонічних складових;

$n$  – порядковий номер горизонтальних шарів  $\Delta h$  матеріалу, який дорівнює 5, 6, ..., 11;

$p, q$  – проміжні значення параметра  $x$ ;

$Q_{MhT}$  – масова витрата пісків при певній висоті;

$Q_{VhT}$  – об'ємна витрата пісків при певній висоті;

© Кондратець В. О., Мацуй А. М., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-1-3

$R_c$  – радіус спіралі класифікатора;  
 $\Delta t$  – проміжок часу, за який сходять в пісковий жолоб один вертикальний шар матеріалу довжиною  $\Delta l = 0,05$  м;  
 $V(x)$  – інтерполяційний поліном;  
 $V_{1,2,\dots,7}$  – функції, що описують об’єм матеріалу у вертикальних шарах піскового тіла при східчастій зміні його висоти;  
 $V_{HT}$  – значення об’ємів у вертикальних шарах при певній висоті піскового тіла;  
 $x$  – порядковий номер вертикального шару матеріалу вздовж піскового тіла;  
 $y$  – функції змін об’єму пісків у вертикальних шарах піскового тіла;  
 $z$  – основа аргументу;  
 $\alpha$  – кут нахилу класифікатора до горизонталі;  
 $\delta_T$  – густина твердого;  
 1KCH-30 – тип механічного односпірального класифікатора.

### ВСТУП

Нині чорні метали в основному отримують з бідних залізних руд, які потребують збагачення, що передбачає їх подрібнення до розкриття вкраплин корисного компоненту. При подрібненні дроблених руд, яке здійснюється в перших стадіях у кульових млинах, що працюють у замкненому циклі з механічним односпіральним класифікатором, перевирачається велика кількість електроенергії та вартісних матеріалів у вигляді сталевих куль і футеровки. Це підвищує собівартість залізородного концентрату та зменшує конкурентоспроможність продукції на світовому ринку. Зважаючи на це дана проблема знаходиться під контролем на рівні державних управлінських структур. Зокрема, їй присвячена тематика держбюджетних наукових досліджень і Кіровоградського національного технічного університету.

Одним з основних напрямів зменшення вказаних перевитрат є автоматизація цих технологічних процесів. Автоматизацією перших стадій подрібнення-класифікації займаються достатньо давно як зарубіжні, так і вітчизняні вчені, однак до кінця проблема не вирішена. В той же час на важливість її розв’язання вказується і в теперішній ситуації. Вузьким місцем тут є відсутність певної інформації. У сучасних роботах вказується на відсутність надійних засобів контролю достатньої точності і необхідність розробки інформаційних засобів для даних технологічних процесів. Особливо важливим і складним для вимірювання є циркулююче навантаження в циклі подрібнення-класифікації або витрата пісків класифікатора у його пісковому жолобі, які являють собою недоподрібнений продукт, що повертається знову у кульовий млин, тобто, рухається у замкненому контурі. У класифікаторі крупне тверде з водяної ванни піднімається спіраллю, яка обертається, до розвантажувального кінця, обезводнюючись і займаючи простір між двома витками двозахідної спіралі, створюючи піскові тіла, об’єм матеріалу в яких залежить від величини циркулюючого навантаження. Не дивлячись на реалізацію багатьох підходів, тривалий час розробки, ця задача дотепер на задовільному рівні не розв’язана. Звертає на себе увагу і той факт, що такі дослідження майже не проводяться, хоч потреба у цьому інформаційному засобі зростає, а

інформація повинна бути більш точною і різноманітною. Тепер циркуляційне навантаження можливо визначити з похибкою, яка не менше  $\pm 10\%$ . В той же час нині прогресивний віртуальний підхід знаходження технологічних параметрів для цих цілей ніхто не застосовував, що відкриває перспективи успішного розв’язання даної задачі.

Метою даної роботи є розроблення математичної моделі віртуального визначення характеристик піскового потоку на виході з механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром, який достатньо просто, точно і безконтактно можливо виміряти порівняно недорогим технічним засобом в межах зміни циркулюючого навантаження у замкненому циклі подрібнення-класифікації.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай піскове тіло класифікатора, яке розташоване в просторі між двома сусідніми витками спіралі, буде поділене вертикальними площинами на  $x$  однакових частин  $\Delta l$ , а горизонтальними площинами – на  $n$  однакових частин  $\Delta h$ . Програмно моделюючи об’єм у вертикальних шарах піскового тіла, можливо отримати закономірність зміни об’єму  $V_{HT}(x)$  вздовж піскового тіла при довільній його висоті. Вона наближено являє собою періодичну функцію. Її аналітичне значення можливо отримати наближенням функцій. У даному випадку функцію  $V_{HT}(x)$  доцільно інтерполювати тригонометричним поліномом [1]:

$$V(x) = a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (1)$$

так, щоб

$$V(x_i) = V_{HT}(x_i), \quad (i = 0, 1, 2, \dots, c), \quad (2)$$

де  $0 \leq x_0 < x_1 < \dots < x_c$  – точки, що відповідають проміжку, який займає піскове тіло;  $a_0$  – вільний член тригонометричного поліному;  $k$  – кількість пар гармонічних складових.

Приймемо  $y_i = V_{HT}(x_i)$ , ( $i=0, 1, 2, \dots, c$ ). Необхідно підібрати коефіцієнти поліному (1) так, щоб виконувались наступні рівності:

$$\left. \begin{aligned} y_0 &= a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_0 + b_k \sin kx_0), \\ y_1 &= a_1 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_1 + b_k \sin kx_1), \\ &\dots \\ y_c &= a_0 + \sum_{k=1}^m (a_k \cos kx_c + b_k \sin kx_c) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Отже, отримано систему  $c+1$  лінійних рівнянь з  $c+1$  невідомими  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_c, b_c$ . Визначник цієї системи рівнянь дорівнює [2]:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & \cos x_0 & \sin x_0 & \dots & \cos mx_0 \\ 1 & \cos x_1 & \sin x_1 & \dots & \cos mx_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \cos x_c & \sin x_c & \dots & \cos mx_c \end{vmatrix} = 2m^2 D \sin \frac{x_q - x_p}{2}, \quad (4)$$

$$0 \leq p < q \leq c$$

і, як наслідок, відмінний від нуля для даної системи точок, для якої  $0 < x_q - x_p < c$ . Зважаючи на це, дана інтерполяційна задача має розв'язок, і при тому єдиний.

Це дозволяє знаходити аналітичні залежності об'єму пісків у вертикальних шарах вздовж піскового тіла при фіксованих значеннях його висоти та у загальному випадку – при довільній висоті, а також залежності параметрів цього рівняння від висоти піскового тіла, що слугує основою створення математичної моделі у формі алгебраїчних рівнянь, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у пісковий жолоб.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Засоби вимірювання циркулюючого навантаження в замкнених циклах подрібнення-класифікації розробляються давно як вітчизняними, так і зарубіжними вченими. Одними з перших розроблялися пристрої непрямого вимірювання циркулюючого навантаження. Вони включають вимірювання струму електродвигуна класифікатора або його активної потужності [3]. Точність цих засобів низька в наслідок впливу стану спіралі, постелі, підшипників спіралі, редуктора, електродвигуна [4]. Удосконалення цих пристроїв шляхом визначення змінної складової [5] або врахування додаткових параметрів, встановлення пружних елементів дозволяють підвищити точність визначення циркулюючого навантаження, але вона залишається недостатньою.

Практично в цей же час і дещо раніше запропоновані пристрої, які беруть свій початок з США, що засновані на безпосередньому неперервному зважуванні конвеєра або піскового жолоба класифікатора, якими піски подаються до кульового млина або класифікатора [4]. Дані пристрої складні і громіздкі. Вони мають низьку точність вимірювання циркулюючого навантаження в наслідок налипання матеріалу та ремонтних змін ваги.

Більш точними виявилися пристрої, які вимірюють пісковий потік безпосередньо в пісковому жолобі класифікатора. Першим з них був пристрій з зануреною в потік зірочкою що обертається за допомогою двигуна постійного струму [6]. Однак точність тут також невисока, оскільки на показання впливає розрідженість пульпи, її нерівномірність, стан зірочки та інше. Крім того, попадання скрапу або сторонніх предметів може приводити до аварійних режимів в наслідок забивання піскового жолоба і виходу з ладу зупиненого дорогого електродвигуна. Ліквідує цей недолік пристрій [7], який дозволяє надійно вимірювати об'ємну витрату пульпи у пісковому жолобі шляхом сканування поверхні рухомого матеріалу.

В кінці 90-х років минулого століття започатковані розрахункові методи визначення циркулюючого навантаження, які зафіксовані на рівні авторських свідоцтв СРСР. Запропоновані формули містять значну кількість параметрів, продукт оцінюється в межах спіралі класифікатора, але створюється запізнення в наслідок введення інформації і складних обчислень. Підходи відрізняються громіздкістю і не забезпечують отримання точних результатів в наслідок експлуатаційної зміни деяких параметрів.

Пристрої, що розроблялися на початку нового століття [8, 9] не дозволяють розв'язати задачу достатньо точно, оскільки спіраляється на застарілі методи вимірювання потужності або струму електродвигуна класифі-

катора. Вони дещо підвищують точність, але в основі залишаються з вже вказаними недоліками. Не дивлячись на це, вимушені і нині їх пропонувати для використання [10]. Роботи [11, 12] покращують характеристики пристрою [7] і дозволяють вимірювати об'ємні витрати пульпи з точністю  $\pm (3...4)\%$ .

Виходячи з актуальності даної проблеми слід відмітити, що за останні 25 років не з'явилося нових більш прогресивних підходів визначення циркулюючого навантаження, а попередньо розроблені засоби як технічні системи практично вичерпали свої можливості і їх удосконалити вже не можливо. Слід враховувати і те, що нині крім циркулюючого навантаження необхідно мати інформацію і про миттєві масові витрати пісків та інші параметри потоку. Встановити ці характеристики циркуляційного потоку на вході в пісковий жолоб можливо за допомогою віртуального підходу на основі піскового тіла механічного односпіралного класифікатора.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Спіраль найбільш розповсюдженого класифікатора КСН-30 має радіус  $R_c = 1,5$  м, крок  $B_c = 1,8$  м, виконана дво-західною і звичайно обертається зі швидкістю 3 об/хв. (0,05 об/с). Вона розташована паралельно днищу, яке нахилене до горизонту під кутом  $\alpha = 18^\circ 30'$ . Спіраль виконують зі змінних робочих елементів висотою  $h_p = 330$  мм. Піскове тіло класифікатора розташовується між двома витками спіралі і постіллю, яка створена крупним твердим і має циліндричну поверхню, що відповідає радіусу  $R_c$ . Воно має складну форму і при обертанні спіралі здійснює сходження вздовж циліндричної постелі в пісковий жолоб під дією поступального переміщення подавального витка. При цьому піски перевалюються через розвантажувальний поріг зі змінною витратою, оскільки їх розташування в пісковому тілі є нерівномірним. Уявлення про характер витрати пісків односпіралного класифікатора може дати розгляд піскового тіла у вертикальній і горизонтальній площинах. Розріз піскового тіла з фрагментом робочих елементів витків спіралі у вертикальній площині, що проходить через її вісь, показано на рис. 1. Піскове тіло можна подати нижньою 6 і верхньою 3 частинами. Нижня частина являє собою частину циліндра, а верхня – зрізану піраміду. В залежності від величини циркулюючого навантаження горизонтальна площина 7 піскового тіла буде змінювати своє положення, опускаючись при його зменшенні. Тому піскове тіло може визначатись або двома частинами, або лише однією нижньою. Пунктиром відмічена частина нижньої геометричної фігури, яка відповідає найменшому значенню піскового навантаження в циклі подрібнення-класифікації. Це буде нижня межа обмеження об'єму піскового тіла. Верхня межа обмеження встановлюється висотою  $h_p$  змінних робочих елементів спіралі, однак матеріал практично до цієї відмітки не доходить.

Піскова продуктивність визначається об'ємом піскового тіла. Його мірою може бути висота у кількох точках поперечного перерізу (рис. 1). В процесі математичного моделювання формування піскового тіла механічного односпіралного класифікатора отримана аналітична залежність об'єму твердого у міжвитковому просторі від його рівня вздовж вертикалі  $OO'$  на рис. 1, що проходить

через точку контакту постелі і подавального витка у самій нижній точці у вихідному положенні витків перед розвантаженням матеріалу. Ця залежність лінійна в межах зміни циркулюючого навантаження. Тому об'єм піскового тіла можливо визначати за його висотою вздовж вертикалі  $OO'$ . Даний підхід позбавлений вад, притаманних попереднім розробкам цього призначення, оскільки за показанням вимірювального пристрою, сигнал якого не пульсує, дозволяє судити про витрату твердого в циркулюючому контурі.

Піськове тіло односпірального класифікатора можливо подати горизонтальними шарами матеріалу однакової висоти  $\Delta h$  (рис. 2а). Враховуючи обмеження в даній задачі, кількість горизонтальних шарів у нижній частині піскового тіла повинна бути такою, щоб  $h_c$  вміщувало ціле число шарів. Висота відрізка циліндра

$$h_c = \frac{B_c}{2} \cdot \sin \alpha = 0,28557 \text{ м.}$$

Нехай в нижній частині піскового тіла буде розташовано дев'ять горизонтальних шарів, тоді висота кожного шару  $\Delta h = 0,0317$  м. Найбільше значення висоти піскового тіла  $h_{\max} = h_p \cdot \cos \alpha = 0,3129$  м. Якщо використовують робочі елементи  $h_p = 0,37$  м, то  $h_{\max} = 0,351$  м. Верхня частина піскового тіла (рис. 2а) розташовується на проміжку  $h_{\max} - h_c = 0,0653$  м. Тоді вона буде містити до двох шарів матеріалу висотою  $\Delta h$ . Зрозуміло, що такого заповнення спіралі практично ніколи не буде. Горизонтальні шари матеріалу дозволяють визначати їх об'єм за знайденою площею. Горизонтальні шари являють собою фігури, обмежені близькими до парабол лініями і прямими, які з'єднують їх кінці. При визначенні об'єму виникають крайові ефекти в наслідок криволінійних бокових поверхонь. Якщо гілки параболи замінити прямими, що проходять до точки на передньому витку, яка знаходиться на проекції осі спіралі на горизонтальний шар, то крайові ефекти при визначенні об'єму враховуються достатньо точно. Точність визначення об'єму піскового тіла буде задовільною при  $\Delta h = 0,0317$  м.

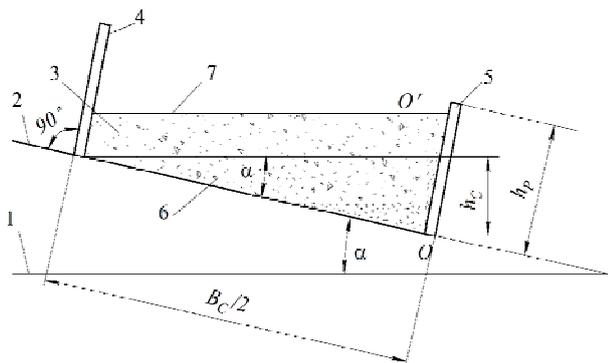


Рисунок 1 – Розріз піскового тіла у вертикальній площині, що проходить через вісь обертання, при найбільшому заповненні міжвиткового простору:

1 – горизонталь; 2 – днище постелі; 3 – верхня частина піскового тіла; 4, 5 – робочі елементи переднього і заднього (подавального) витків; 6 – нижня частина піскового тіла; 7 – горизонтальна площина піскового тіла

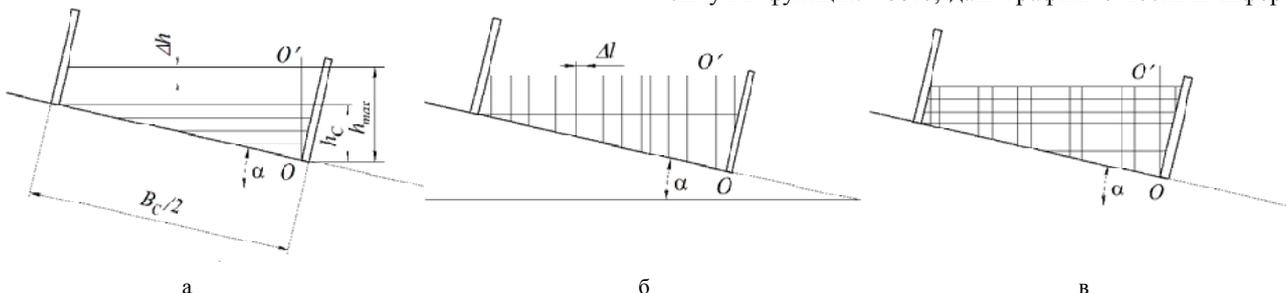


Рисунок 2 – Подання піскового тіла елементарними складовими:

а – горизонтальними шарами; б – вертикальними шарами; в – тілами, що утворюються взаємними перетинами горизонтальних і вертикальних площин

Якщо піськове тіло класифікатора подати вертикальними шарами (рис. 2б) матеріалу, то це буде відповідати сходженню пісків у пісковий жолоб. Піски односпірального класифікатора являють собою достатньо дрібний матеріал, однак наявність в них вологи робить їх в'язкими і вони відходять від піскового тіла під дією власної ваги достатньо широким шаром. На практиці такий шар підтримується близько 0,05 м. Тому при розбитті піскового тіла на вертикальні шари їх довжину слід приймати такою ж, тобто,  $\Delta l = 0,05$  м. Свій початок вони беруть від вертикалі  $OO'$  ліворуч і праворуч. Прийняте значення  $\Delta l$  дозволяє достатньо точно визначати об'єм матеріалу в окремих вертикальних шарах, знаючи їх площу у поперечному перерізі.

Ще більшого ефекту можливо досягти, розбивши піськове тіло на горизонтальні і вертикальні шари матеріалу, поклавши в основу елемент з поперечним перерізом  $\Delta h \times \Delta l$  (рис. 2в). На підставі такого подання піскового тіла розроблено підхід моделювання сходження матеріалу в пісковий жолоб класифікатора. Комп'ютерно моделюючи площі горизонтальних шарів і розташовуючи на них елементи площею  $\Delta h \times \Delta l$  та визначаючи їх довжини поперек осі піскового тіла програмно отримуємо об'єм матеріалу у вертикальних шарах. Точність у даному підході можливо збільшувати шляхом зменшення параметрів  $\Delta h$  і  $\Delta l$ .

Моделюючи піськове тіло односпірального класифікатора, отримувались залежності зміни об'єму пісків у вертикальних шарах від їх порядкового номера, тобто, від довжини піскового тіла. Такі залежності для висоти піскового тіла від 5 до 11 приведені на рис. 3, звідки видно, що вони однотипні. Залежності мають мінімум і максимум. Основна відмінність в отриманих залежностях полягає в тому, що при збільшенні висоти піскового тіла зростають як середні значення, так і значення мінімумів і максимумів функцій. Тобто, дані графіки є носіями інфор-

мації про майбутнє розвантаження піскового тіла у пісковий жолоб класифікатора.

Оскільки дану інформацію безпосередньо використати не можливо, графіки апроксимувалися математичними залежностями у вигляді ряду Фур'є. Апроксимація виконувалася в Curve Fitting Toolbox – наборі графічних інтерфейсів (GULs) і М-функцій для користувачів, які створені в обчислювальному середовищі MATLAB. При цьому отримані аналітичні залежності об'єму у функції довжини піскового тіла, поданій в одиницях  $\Delta l$  при різних значеннях його висоти. Встановлено, що сімома членами ряду можливо достатньо точно описати піскове тіло класифікатора за розташуванням матеріалу у вертикальних шарах. Самі функції мають такий вигляд:

$$V_1 = 0,6687 - 0,3472 \cos(0,2395x) + 0,1069 \sin(0,2395x) + 1,285 \cos(2 \cdot 0,2395x) + 0,9444 \sin(2 \cdot 0,2395x) + 0,5014 \cos(3 \cdot 0,2395x) - 0,4997 \sin(3 \cdot 0,2395x), \quad (5)$$

$$V_2 = 1,419 - 0,4 \cos(0,2448x) - 0,4278 \sin(0,2448x) + 1,411 \cos(2 \cdot 0,2448x) + 1,117 \sin(2 \cdot 0,2448x) + 0,538 \cos(3 \cdot 0,2448x) - 0,4006 \sin(3 \cdot 0,2448x), \quad (6)$$

$$V_3 = 2,404 - 0,6809 \cos(0,2582x) - 1,18 \sin(0,2582x) + 1,171 \cos(2 \cdot 0,2582x) + 1,306 \sin(2 \cdot 0,2582x) + 0,6515 \cos(3 \cdot 0,2582x) - 0,1448 \sin(3 \cdot 0,2582x), \quad (7)$$

$$V_4 = 2,46 - 1,15 \cos(0,2178x) + 1,259 \sin(0,2178x) + 3,586 \cos(2 \cdot 0,2178x) + 0,1199 \sin(2 \cdot 0,2178x) + 0,3 \cos(3 \cdot 0,2178x) - 0,8621 \sin(3 \cdot 0,2178x), \quad (8)$$

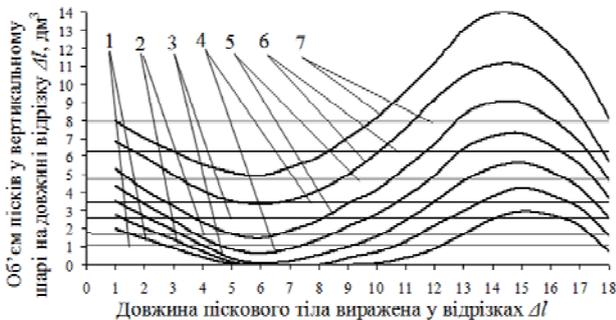


Рисунок 3 – Зміна об'єму матеріалу у вертикальних шарах відносно середнього значення вздовж піскового тіла при зростанні його висоти від  $5\Delta h$  до 11

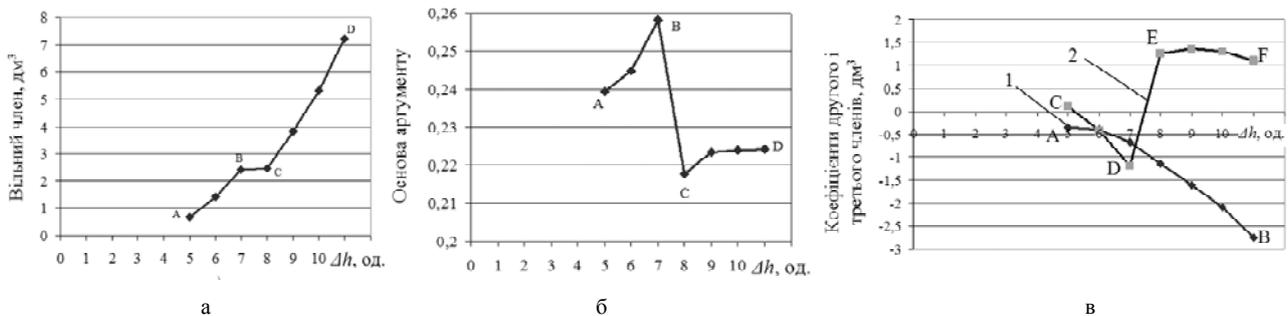


Рисунок 4 – Залежність вільного члена, основи аргументу, коефіцієнтів другого і третього членів рівнянь від висоти піскового тіла: а – вільний член; б – аргумент; в – коефіцієнти другого і третього членів; 1 – другого члена; 2 – третього члена

$$V_5 = 3,839 - 1,6 \cos(0,2235x) + 1,35 \sin(0,2235x) + 3,71 \cos(2 \cdot 0,2235x) + 0,2691 \sin(2 \cdot 0,2235x) + 0,217 \cos(3 \cdot 0,2235x) - 0,8263 \sin(3 \cdot 0,2235x), \quad (9)$$

$$V_6 = 5,321 - 2,098 \cos(0,2240x) + 1,298 \sin(0,2240x) + 3,831 \cos(2 \cdot 0,2240x) + 0,4 \sin(2 \cdot 0,2240x) + 0,1445 \cos(3 \cdot 0,2240x) - 0,7975 \sin(3 \cdot 0,2240x), \quad (10)$$

$$V_7 = 7,215 - 2,751 \cos(0,2242x) + 1,105 \sin(0,2242x) + 3,807 \cos(2 \cdot 0,2242x) + 0,4311 \sin(2 \cdot 0,2242x) + 0,0721 \cos(3 \cdot 0,2242x) - 0,8681 \sin(3 \cdot 0,2242x), \quad (11)$$

де  $x$  – порядковий номер вертикального шару матеріалу вздовж піскового тіла;  $V_1$  – при  $5\Delta h$ ;  $V_2$  – при  $6\Delta h$ ;  $V_3$  – при  $7$ ;  $V_4$  – при  $8\Delta h$ ;  $V_5$  – при  $9\Delta h$ ;  $V_6$  – при  $10\Delta h$ ;  $V_7$  – при  $11\Delta h$ .

Отримані рівняння (5), (6),..., (11) дозволяють знаходити об'єм матеріалу в вертикальних шарах вздовж піскового тіла при фіксованій висоті. Відповідно даним рівнянням для конкретного значення висоти піскового тіла можливо записати вираз у загальному виді:

$$V_{hT} = K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx, \quad (12)$$

де  $V_{hT}$  – значення об'ємів у вертикальних шарах при певній висоті піскового тіла;  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7$  – відповідно вільний член та коефіцієнти при другому, третьому, четвертому, п'ятому, шостому і сьомому членах;  $z$  – основа аргументу;  $x=1, 2, \dots, 18$  – значення довжини піскового тіла, виражені у одиницях  $\Delta l$ .

За рівняннями (5), (6),..., (11) також можливо встановити зв'язки між їх конкретними складовими і висотою піскового тіла. Закономірності зміни вільного члена, основи аргументу і коефіцієнтів другого і третього членів від висоти піскового тіла приведені на рис. 4.

Коефіцієнти четвертого, п'ятого, шостого і сьомого членів змінюються аналогічно залежності 2 на рис. 4в. Закономірності зміни даних параметрів можливо виразити рівняннями, які отримані апроксимуванням експериментальних залежностей і мають наступний вигляд:

$$K_{1AB}(n) = 0,1173n^2 - 0,5405n + 0,4377, \quad n = 5,6,7, \quad (13)$$

$$K_{1BC}(n) = 0,056n + 2,012, \quad n = 7,8, \quad (14)$$

$$K_{1CD}(n) = 0,1288n^2 - 0,871n + 1,2079, n = 8,9,\dots,11, \quad (15)$$

$$Z_{AB}(n) = 0,004n^2 - 0,0392n + 0,3345, n = 5,6,7, \quad (16)$$

$$Z_{BC}(n) = -0,0404n + 0,541, n = 7,8, \quad (17)$$

$$Z_{CD}(n) = 0,0008n^3 - 0,0247n^2 + 0,2475n - 0,603, n = 8,9,\dots,11, \quad (18)$$

$$K_2 = 0,0059n^3 - 0,1904n^2 + 1,4556n - 3,5897, n = 5,6,\dots,11, \quad (19)$$

$$K_{3CD} = -0,1118n^2 + 0,6946n - 0,5721, n = 5,6,7, \quad (20)$$

$$K_{3DE} = 2,445n - 18,301, n = 7,8, \quad (21)$$

$$K_{3EF} = -0,071n^2 + 1,2976n - 4,5777, n = 8,9,\dots,11, \quad (22)$$

$$K_{4AB} = -0,183n^2 + 2,139n - 4,835, n = 5,6,7, \quad (23)$$

$$K_{4BC} = 2,415n - 15,734, n = 7,8, \quad (24)$$

$$K_{4CD} = -0,0287n^3 + 0,7825n^2 - 6,9678n + 23,926, n = 8,9,\dots,11, \quad (25)$$

$$K_{5EF} = 0,008n^2 + 0,085n + 0,319, n = 5,6,7, \quad (26)$$

$$K_{5FG} = -1,1861n + 9,6087, n = 7,8, \quad (27)$$

$$K_{5GH} = -0,0295n^2 + 0,6674n - 3,334, n = 8,9,\dots,11, \quad (28)$$

$$K_{6AB} = 0,0385n^2 - 0,3864n + 1,4719, n = 5,6,7, \quad (29)$$

$$K_{6BC} = -0,3515n + 3,112, n = 7,8, \quad (30)$$

$$K_{6CD} = 0,0298n^3 - 0,8615n^2 + 8,1653n - 25,13, n = 8,9,\dots,11, \quad (31)$$

$$K_{7EF} = 0,0783n^2 - 0,7627n + 1,3553, n = 5,6,7, \quad (32)$$

$$K_{7FG} = -0,7173n + 4,8763, n = 7,8, \quad (33)$$

$$K_{7GH} = -0,0154n^3 + 0,4123n^2 - 3,6315n + 9,6875, n = 8,9,\dots,11, \quad (34)$$

де  $n$  – порядковий номер горизонтальних шарів  $\Delta h$  матеріалу, який дорівнює 5, 6, ..., 11.

Враховуючи, що двозахідна спіраль обертається зі швидкістю 0,05 об/с і має крок  $B_c=1,8$  м, за один оберт вона розвантажує у пісковий жолоб класифікатора два піскових тіла. Один вертикальний шар матеріалу довжиною  $\Delta l=0,05$  м сходять у пісковий жолоб за проміжок часу  $\Delta t=0,5555$  с. Поділимо ліву і праву частини рівняння (12) на  $\Delta t$  і отримаємо об'ємну витрату матеріалу у пісковий жолоб при сходженні конкретного вертикального шару піскового тіла:

$$Q_{VHT} = \frac{V_{HT}}{\Delta t} = (K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx) / \Delta t. \quad (35)$$

Відповідно залежності (35) можливо записати формулу для визначення миттєвої масової витрати пісків (циркулюючого навантаження):

$$Q_{MHT} = \delta_T (K_1 + K_2 \cos zx + K_3 \sin zx + K_4 \cos 2zx + K_5 \sin 2zx + K_6 \cos 3zx + K_7 \sin 3zx) / K_P \cdot \Delta t. \quad (36)$$

Таким чином, отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь. Рівняння (12), (35) і (36) є основними, а рівняння (13), (14), ..., (34) – допоміжними. Вони являють собою математичну модель, що дозволяє знаходити значення миттєвої масової витрати пісків до їх розвантаження при будь-якій висоті піскового тіла. Крім того, рівняння (12) і (35) дозволяють знаходити об'єм пісків у вертикальних шарах, миттєве значення об'ємної витрати матеріалу та об'єм піскового тіла.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальне дослідження проводилося на виготовленій фізичній моделі, яка являла собою фрагмент постелі і двох поряд розташованих витків спіралі, встановленій під кутом  $18^\circ 30'$  до горизонту. Макет виготовлявся за розмірами реального класифікатора ІКСН-30, але в ньому монтувалися тонкі вертикальні перегородки через 0,05 м, що відповідало довжині вертикальних шарів  $\Delta l$  при моделюванні. У перегородках виконувалися отвори на висоті  $6\Delta h$ ,  $8\Delta h$  і  $10\Delta h$ , нижні з яких заклеювалися. В самій нижній точці перед перегородками встановлювалися патрубки з гумовими відводами, які перекривалися. В експериментах створені перегородками ємкості заповнювалися водою спочатку на висоту  $10\Delta h$ , потім шляхом розгерметизації – на висоту  $8\Delta h$  і  $6\Delta h$ . У досліді у мірні ємкості зливалася вода з кожної створеної перегородками камери з наступним визначенням її об'єму. Результати порівнювалися з розрахунком об'ємів за формулами (6), (8) і (10). Розходження результатів не перевищувало  $\pm 3,0\%$ , за базовий рівень приймалися визначені об'єми води.

Перевірялася також відповідність об'єму піскового тіла, визначеного за запропонованими залежностями, реальним продуктивностям односпірального класифікатора ІКСН-30. При висоті пісків  $10\Delta h$  середній об'єм матеріалу у вертикальному шарі складає  $6,71$   $\text{дм}^3$ , що при сходженні його за  $0,5555$  с відповідає продуктивності  $12,1$   $\text{дм}^3/\text{с}$  або  $43,48$   $\text{м}^3/\text{год}$ . Піски являють собою дрібний матеріал і однорідну структуру, тому коефіцієнт розпушення в них буде практично незмінним і його можливо прийняти на рівні 1,1. Тоді при густині твердого  $3,3$   $\text{т}/\text{м}^3$  масова витрата пісків складає  $130,43$   $\text{т}/\text{год}$ , що відповідає реальному режиму роботи односпірального класифікатора.

Знаходилися також параметри рівняння масової витрати пісків у циклах розвантаження і самі масові витрати у функції висоти піскового тіла.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Основним результатом роботи є отримане в процесі моделювання рівняння (12), (35) і (36) та допоміжні рівняння (13), (14), ..., (34), які являють собою математичну модель процесу розвантаження пісків і дозволяють визначати миттєві значення їх об'ємної чи масової витрати у пісковий жолоб класифікатора та об'єм матеріалу у вер-

тикальних шарах піскового тіла. Параметри рівняння (36) за даними експерименту приведені в табл. 1. Розрахунки здійснювалися з використанням залежностей (13), (14),..., (34). З даних табл. 1 слідує, що в експерименті висота піскового тіла приймала значення практично в усьому діапазоні реальної зміни циркулюючого навантаження. Визначені за залежностями (13), (14),..., (34) параметри за висотою піскового тіла в одиницях  $\Delta h$  також змінюються в широкому діапазоні.

Миттєві значення масової витрати пісків у пісковий жолоб односпірального класифікатора при висоті піскового тіла, яка мала місце у експериментах, в процесі його сходження приведені на рис. 5. З рис. 5 слідує, що при збільшенні висоти піскового тіла миттєві значення масової витрати твердого зростають. Витрати змінюються за достатньо складною закономірністю. З ростом рівня піскового тіла закономірність зберігається. При збільшенні висоти піскового тіла зростають також і середні значення масової витрати твердого, які відповідно становлять 12,6001  $\text{дм}^3/\text{с}$ , 18,5198  $\text{дм}^3/\text{с}$  та 26,0447  $\text{дм}^3/\text{с}$ .

**6 ОБГОВОРЕННЯ**

В результаті теоретичних досліджень була отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь, які описують піскові тіла різної висоти, яка змінюється з заданим кроком. Показано, що між членами цих рівнянь існують зв'язки, які виражені алгебраїчними рівняннями відповідно кожному показнику. Це дозволило подати модель визначення об'єму у вертикальному шарі основним алгебраїчним рівнянням з семи членів, яке передбачає знаходження його параметрів за допомогою запропонованих допоміжних алгебраїчних рівнянь. Основне рівняння математичної моделі може подаватись стосовно визначення об'єму пісків у вертикальних шарах піскового тіла або миттєвих значень об'ємної чи масової їх витрати при розвантаженні. На підставі миттєвих витрат пісків можливо визначати інші характеристики піскового потоку.

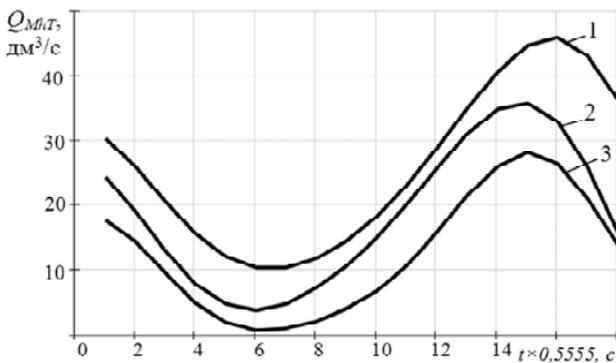


Рисунок 5 – Миттєві значення масової витрати пісків у пісковий жолоб односпірального класифікатора в процесі сходження піскового тіла при різній його висоті:

1 – 6,75 $\Delta h$ ; 2 – 7,90 $\Delta h$ ; 3 – 8,8 $\Delta h$

Таблиця 1 – Параметри рівняння (36), що відповідають умовам експерименту

Висота піскового тіла в мм і одиницях $\Delta h$	Основа аргументу $z$	Параметри рівняння, $\text{дм}^3$						
		$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$	$K_5$	$K_6$	$K_7$
213,98 / 6,75	0,2522	2,1338	-0,6250	-0,9774	1,2653	1,2572	0,6179	-0,2254
250,40 / 7,90	0,2219	2,4544	-1,0644	1,0145	3,3445	0,2385	0,3352	-0,7904
278,96 / 8,80	0,2075	3,5174	-1,5043	1,3432	3,6488	0,5096	0,3181	-0,8359

Оскільки визначені за допомогою математичної моделі об'єми пісків співпадають з експериментальними даними, а в цьому технологічному процесі матеріал не ушілюється, запропонований підхід знаходження характеристик піскового потоку забезпечує достатньо високу точність.

Даний метод забезпечує знаходження миттєвих значень витрати саме твердого в той час, коли інші підходи визначають лише середні характеристики потоку твердого разом з водою. Інші методи мають пульсуючий сигнал, а у запропонованому він має певне незмінне середнє значення лише витрати твердого. Крім того, він забезпечує випередження отриманої інформації на 10 с і отримання ряду допоміжних характеристик потоку.

Запропонований метод визначення миттєвих значень масової витрати потоку дозволяє реалізувати системи автоматичної стабілізації розрідження пульпи у пісковому жолобі, яких у даний час не існує і кульові млини не можуть забезпечити найкращі показники подрібнення руди.

**ВИСНОВКИ**

В роботі розв'язана задача віртуального визначення характеристик піскового потоку на виході з механічного односпірального класифікатора за технологічним параметром – висотою піскового тіла, яку можливо достатньо просто, точно і безконтактно виміряти порівняно недорогим технічним засобом в межах зміни циркулюючого навантаження циклу подрібнення-класифікації.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Вперше отримано зв'язок між об'ємом матеріалу у вертикальних шарах піскового тіла і його довжиною та висотою, що дозволило створити математичну модель процесу сходження пісків у пісковий жолоб і визначення їх загального об'єму за відомою висотою.

2. Вперше отримана математична модель у формі алгебраїчних рівнянь, яка описує значення миттєвої витрати пісків в процесі їх розвантаження у пісковий жолоб односпірального класифікатора за визначеною висотою піскового тіла, що дозволяє підвищити продуктивність кульового млина та якість подрібнення твердого шляхом стабілізації розрідження пульпи.

Встановлено, що отримана математична модель дозволяє визначати ряд додаткових характеристик піскового потоку – середнє значення масової витрати, об'єм піскового тіла, значення екстремумів витрати у циклі розвантаження та інше.

Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що наявність запропонованої математичної моделі дозволяє покращити експлуатаційні характеристики технологічного обладнання, зменшити перевитрати електроенергії, куль і футеровки при подрібненні руди на збагачувальних фабриках.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетних науково-дослідних тем Кіровоградського національного технічного університету «Автоматизація процесів керування розділенням твердого по крупності у механічних спіральних класифікаторах» (номер державної реєстрації 0115U003602), «Моделювання технологічних процесів у механічних спіральних класифікаторах з метою вдосконалення математичних моделей» (номер державної реєстрації 0115U003962) та спрямована на реалізацію пріоритетних напрямів програми Європейського Союзу з досліджень та інновацій «Horizon-2020».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Демидович Б. П. Численные методы анализа / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М. : Наука, 1967. – 368 с.
2. Гончаров В. Л. Теория интерполирования и приближения функций / В. Л. Гончаров. – М. : Гостехиздат, 1954. – 327 с.
3. Ковин Г. М. Оператор пульты управления на обогатительных фабриках / Г. М. Ковин. – М. : Недра, 1987. – 304 с.
4. Троп А. Е. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А. Е. Троп, В. З. Козин, Е. В. Прокофьев. – М. : Недра, 1986. – 303 с.
5. Виноградов В. С. Автоматизация технологических процессов на горнорудных предприятиях / В. С. Виноградов. – М. : Недра, 1984. – 167 с.

6. Автоматизация процессов обогащения руд / [Марюта А. Н., Давидкович А. С., Гуленко Т. И., Кондратец В. А.]. – К. : Техніка, 1972. – 140 с.
7. Кондратец В. А. Обеспечение идентификации соотношения руда/вода в мельницах с циркулирующей нагрузкой / В. А. Кондратец // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 11. – С. 95–102.
8. Улитенко К. Я. Определение циркулирующей нагрузки измельчительных агрегатов в АСУТП / К. Я. Улитенко, Р. П. Маркин // Обогащение руд. – 2005. – № 2. – С. 42–46.
9. Дмитриев В. И. Исследование динамических характеристик спирали классификатора для задач автоматического контроля / В. И. Дмитриев // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – 2007. – № 28. – С. 14–24.
10. Разработка и применение автоматизированных систем управления процессами обогащения полезных ископаемых / [Морозов В. В., Топчаев В. П., Улитенко К. Я. и др.]. – М. : Изд. дом «Руда и Металлы», 2013. – 512 с.
11. Кондратец В. О. Теоретичне дослідження сканування поверхні відкритих матеріальних потоків променями незмінної довжини / В. О. Кондратец // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 35. – С. 174–178.
12. Кондратец В. О. Теоретичне дослідження активного і пасивного сканування поверхні відкритих матеріальних потоків / В. О. Кондратец, А. М. Мацуї // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 100. – С. 52–57.

Стаття надійшла до редакції 14.12.2016.

Після доробки 23.12.2016.

Кондратец В. А.<sup>1</sup>, Мацуї А. Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Кіровоградського національного технічного університету, Кропивницький, Україна

## ВИРТУАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ПЕСОЧНОМ ЖЕЛОБЕ ОДНОСПИРАЛЬНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ

**Актуальность.** Бедные железные руды, которые требуют обогащения, являются сырьевой основой черной металлургии. Их измельчение в первых стадиях из-за перерасхода электроэнергии, стальных шаров и футеровки снижает конкурентоспособность продукции. Уменьшить перерасход возможно автоматизацией этих процессов, однако преградой здесь является неразрешенность задачи получения информации о песочной нагрузке с необходимой точностью, хотя проводились широкие и длительные исследования. Прогрессивный виртуальный подход открывает перспективы решения этой проблемы.

**Целью** данной работы является разработка математической модели виртуального определения характеристик песочного потока на выходе механического односпирального классификатора по технологическому параметру, который достаточно просто, точно и бесконтактно возможно измерить сравнительно дешевым техническим средством.

**Метод.** Предложен метод графоаналитического моделирования, где рассматривается песочное тело классификатора (материал между двумя соседними витками спирали), которое подается горизонтальными и вертикальными слоями, образуя по высоте и длине элементы  $\Delta h \times \Delta l$ , что позволяет получать зависимости объема песков в вертикальных слоях от длины песочного тела. Эти зависимости при определенной высоте, кратной  $\Delta h$ , имеющие минимум и максимум, аппроксимировались математическими выражениями в виде семи членов ряда Фурье. Они устанавливают связь между их конкретными составляющими и высотой песочного тела. Использование данных связей представляет возможность находить мгновенные объемный и массовый расходы материала в песочный желоб при любом значении высоты песков.

**Результаты.** Полученная математическая модель процесса разгрузки песков в виде трех основных и двадцати двух дополнительных уравнений позволяет определять характеристики песочного потока по высоте песочного тела классификатора. Мгновенное значение расхода изменяется по достаточно сложной закономерности, которая сохраняется при различных высотах песочного тела. С увеличением высоты закономерно возрастают как средние, так и мгновенные значения массового расхода песков.

**Выводы.** Впервые получена математическая модель, которая описывает значения мгновенного расхода песков в процессе их разгрузки в песочный желоб односпирального классификатора по измеренной высоте песочного тела. Благодаря этому возможно стабилизировать разрежение пульпы в шаровой мельнице, повысить ее производительность, качество измельченного твердого и улучшить эксплуатационные характеристики технологического оборудования и, как следствие, уменьшить перерасходы при измельчении руд.

**Ключевые слова:** односпиральный классификатор, мгновенный массовый расход песков, виртуальное определение, математическая модель.

Kondratets V. A.<sup>1</sup>, Matsui A. N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Automation of Production Processes Kirovohrad National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Automation of Production Processes Kirovohrad National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

#### VIRTUAL DETERMINATION OF CHARACTERISTICS OF SINGLE-SPIRAL CLASSIFIERS FLOW SAND CHUTE

**Context.** Poor iron ore which requires enrichment are the raw material basis for the steel industry. Their grinding in the early stages due to cost overruns electricity, steel balls and the lining reduces the competitiveness of products. Reduce the cost overruns is possible by automation these processes, however, an obstacle here is the unresolved problem of obtaining information about a load of sand with the required accuracy, although carried out a broad and long-term studies. Progressive virtual approach offers the prospect of solving this problem.

**The objective** of this work is to develop a mathematical model of the virtual characterization of sandy stream at the output of the mechanical single-spiral classifier on technological parameter, which is quite simply, accurately and without contact is possible to measure relatively cheap technical means.

**Method.** A method of graphic-analytical modeling, which examines the sand body of the classifier (the material between two adjacent turns of the spiral), which is supplied with horizontal and vertical layers, forming the height and length of the elements  $\Delta h \times \Delta l$ , which allows to obtain, depending sand volume in the vertical layers of sand-body length. These relationships at a certain height, fold  $\Delta h$ , having a minimum and maximum were approximated mathematical expressions in the form of seven members of the Fourier series. They establish a link between their individual components and a height of sand bodies. The use of these links gives the possibility to find instant volume and mass of material costs in the sand chute for any value of the height of the sand.

**Results.** The resulting mathematical model of unloading sand in the form of three main and twenty-two additional equations allows to determine the characteristics of the sand flow adjustment sand classifier body. The instantaneous flow rate varies in a rather complex pattern, which is stored at different altitudes sand bodies. With increasing height naturally increase as the average and instantaneous values of the mass flow of sand.

**Conclusions.** For the first time it produced a mathematical model that describes the values of instantaneous flow of sand in the process of unloading in the sand chute single-spiral classifier from the measured height of the sand body. This makes it possible to stabilize the dilution of the pulp in a ball mill, to increase its productivity, quality and divided solid improve the performance of the process equipment and, consequently, reduce the cost overruns during grinding ore.

**Keywords:** single-spiral classifier, instantaneous mass flow of sand, virtual determination, mathematical model.

#### REFERENCES

1. Demidovich B. P., Maron I. A., Shuvalova E. Z. Chislennyye metody analiza. Moscow, Nauka, 1967, 368 p.
2. Goncharov V. L. Teoriya interpolirovaniya i priblizheniya funktsii. Moscow, Gostekhizdat, 1954, 327 p.
3. Kovin G. M. Operator pul'ta upravleniya na obogatitel'nykh fabrikakh. Moscow, Nedra, 1987, 304 p.
4. Trop A. E., Kozin V. Z., Prokof'ev E. V. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabrik. Moscow, Nedra, 1986, 303 p.
5. Vinogradov V. S. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov na gornorudnykh predpriyatiyakh. Moscow, Nedra, 1984, 167 p.
6. Maryuta A. N., Davidkovich A. S., Gulenko T. I., Kondratets V. A. Avtomatizatsiya protsessov obogashcheniya rud. Kiev, Tekhnika, 1972, 140 p.
7. Kondratets V. A. Obespechenie identifikatsii sootnosheniya ruda/voda v mel'nitsakh s tsirkuliruyushchei nagruzkoi, *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, No. 11, pp. 95–102.
8. Ulitenko K. Ya., Markin R. P. Opredelenie tsirkuliruyushchei nagruzki izmel'chitel'nykh agregatov v ASUTP, *Obogashchenie rud*, 2005, No. 2, pp. 42–46.
9. Dmitriev V. I. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik spirali klassifikatora dlya zadach avtomaticheskogo kontrolya, *Zbirnik naukovikh prats' Natsional'nogo gornichnogo universitetu*, 2007, No. 28, pp. 14–24.
10. Morozov V. V., Topchaev V. P., Ulitenko K. Ya. i dr. Razrabotka i primeneniye avtomatizirovannykh sistem upravleniya protsessami obogashcheniya poleznykh iskopaemykh. Moscow, Izd. dom «Ruda i Metally», 2013, 512 p.
11. Kondratec' V. O. Teoretychne doslidzhennja skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv promenjamy nezminnoi' dovzhyny, *Visnyk Kryvoriz'kogo nacional'nogo universytetu*, 2013, Vyp. 35, pp. 174–178.
12. Kondratec' V. O., Macuj A. M. Teoretychne doslidzhennja aktyvnogo i pasyvnoho skanuvannja poverhni vidkrytyh material'nyh potokiv, *Girnychyj visnyk*, 2015, Vyp. 100, pp. 52–57.

## МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ ФУНКЦИЙ С ПОМОЩЬЮ РАЗДЕТЕРМИНИЗАЦИИ

**Актуальность.** При моделировании организационно-технических систем в ряде случаев возникают сложности в исследовании функционирования таких систем, если они формализованы на основе аналитико-детерминированных функций. В работе предложен новый метод – раздетерминизация, созданный для решения проблемы вычисления детерминированных функций, имеющих так называемые особые точки, в которых у функции не существует определенного значения.

**Цель.** Целью является работка подхода, позволяющего осуществлять деление на нуль и тем самым исключать особые точки функций.

**Метод.** Предложенный в статье метод заключается в переходе от проблематичной, с точки зрения вычисления, детерминированной функции к соответствующей недетерминированной, а именно, интервальной функции, путем замены детерминированных параметров функции соответствующими интервальными параметрами. Благодаря этой замене значения функции в особых точках становятся интервальными и вполне определенными значениями. Последнее и позволяет решить проблему вычисления функции.

**Результат.** Путем вырезания интервальной функции выведены рабочие формулы, основанные на основных положениях интервальной математики и позволяющие легко вычислять значения этой функции. Предложенный в статье подход к решению проблемы вычисления функций с особыми точками имеет важное значение для всех классов прикладных систем, в которых эта проблема реально существует. Речь здесь идет о тех системах, функции-характеристики которых имеют некоторое число особых точек. Такие системы встречаются чаще всего в телеметрии, теории и практике надежности, гуманитарной сфере и ряде других областей. Особенности этих областей в том, что в них не всегда применимы классические методы детерминистской математики, что побуждает разрабатывать новые подходы к решению возникающих здесь задач.

**Выводы.** Решение проблемы вычисления функции достигается легализацией деления на нуль путем интервализации вычислений. При этом используется принцип вырезания окрестности нуля из интервала, являющегося делителем интервальной дроби, представляющей исследуемую функцию.

**Ключевые слова:** интервал, интервальная функция, интервальные вычисления, раздетерминизация, деление на нуль.

### НОМЕНКЛАТУРА

$x$  – вещественная независимая переменная;

$y$  – вещественная зависимая переменная;

$a_i, b_i$  – вещественные числа;

$\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  – интервальные числа;

$f_1, f_2, \dots$  – вещественные детерминированные функции;

$\tilde{f} = [f_1, f_2]$  – интервальная функция;

$f = f_1 / f_2$  – дробная детерминированная функция;

$\tilde{f} = \tilde{f}_1 / \tilde{f}_2$  – дробная интервальная функция.

### ВВЕДЕНИЕ

Появление в XX веке разнообразных сложных систем (системы управления экономикой, ракетно-космические системы, атомная энергетика и др.) выдвинуло новые сложные задачи по их изучению. Современная наука и практика обработки информации вполне успешно справляется с задачами исследования различных сложных систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Эти задачи обычно формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза тех или иных функций с детерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками изучаемых систем. Но на практике часто встречаются другие системы – системы с неточно известными, т.е. неполностью определенными (недетерминированными) параметрами. Причины появления таких систем заключаются в естественной неопределенности, свойственной многим реальным процессам, происходящим в системах; в неточном задании параметров большинства систем из-за неизбежных погрешностей при их измерении или вы-

числениями; в изменении во времени параметров систем; в необходимости или целесообразности совместного исследования целых семейств однотипных систем, имеющих типовые функции-характеристики и различающихся лишь значениями параметров этих функций. Учет неопределенности систем очень важен при их проектировании, так как полная определенность в работе системы появляется лишь на последних этапах ее создания.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Все эти задачи значительно сложнее их вышеупомянутых детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными параметрами. Это усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел сложнее алгебры детерминированных чисел. В связи с этим для решения указанных задач приходится применять тот или иной специализированный математический аппарат: теорию вероятностей [1], теорию нечетких множеств [2], интервальную математику [3], многозначные функции [4]. Применение этого аппарата позволяет строить и исследовать более адекватные математические модели сложных систем с недетерминированными параметрами, учитывающие неопределенность поведения таких систем [5–13].

Однако на практике встречаются еще более трудные для изучения классы сложных систем, в которых даже математические модели с детерминированными параметрами приводят к задачам, не имеющим определен-

ного решения. Таковы, например, сложные системы, изучение которых сводится к решению системы линейных уравнений, определитель которой в некоторых случаях может быть равен нулю. Именно для таких систем раздетерминизация, т.е. переход к соответствующей недетерминированной системе позволяет получить необходимое решение. Так, для сложных систем, изучение которых сводится к решению системы линейных уравнений (с возможно нулевым определителем), определитель после раздетерминизации становится численно равным интервалу, включающему, кроме нуля, также ненулевые значения, что открывает возможность получения решения.

В настоящей статье рассматриваются задачи изучения именно таких классов сложных систем. В качестве раздетерминизации используется процедура перехода от системы с детерминированными параметрами к системе с недетерминированными – интервальными параметрами. В качестве математического аппарата используется интервальная алгебра. Раздетерминизация является процедурой, обратной по отношению к детерминизации, широко используемой в работах автора по изучению поведения неопределенных систем [14–19].

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Имеется некоторая практическая задача, сводящаяся с математической точки зрения к исследованию (расчету и анализу поведения) некоторой детерминированной функции одной независимой переменной – характеристики изучаемой системы

$$y = f(x), \quad (1)$$

однозначно отображающей заданное множество  $X = \{x\}$  независимых переменных  $x$  в заданное множество  $Y = \{y\}$  зависимых переменных  $y$ , в соответствии с законом  $f$ , который называется функцией. Хорошо известно, что задача расчета (вычисления значений) функции (1) принципиально всегда решается с помощью адекватного этой задаче математического аппарата алгебры вещественных чисел, с использованием подходящих методов вычислений, а задача анализа поведения функции (1) – с помощью адекватного ей математического аппарата классического дифференциального исчисления.

Рассмотрим далее распространенную ситуацию, когда изучаемая детерминированная функция (1) имеет вид дроби

$$f(x) = f_1(x)/f_2(x) \quad (2)$$

с числителем – функцией  $f_1(x)$  и знаменателем – функцией  $f_2(x)$ . В этой ситуации расчет и анализ поведения функции (1) затрудняется, поскольку в каждой точке с нулевым знаменателем эта функция не существует (если в этой точке числитель не равен нулю) либо принимает бесконечное множество значений, т.е. не имеет определенного значения (если в этой точке числитель равен нулю). Очевидно, что для функций с указанными точками (их естественно называть особыми) должны быть разработаны специальные методы расчета и анализа поведения функций, позволяющие исключить эффект влияния особых точек. Задача состоит в построении двух

систематических процедур, связанных с изучением поведения детерминированных функций вида (2). А именно: 1) процедура расчета (т.е. вычисления значений) детерминированной функции типа (2), содержащей особые точки; 2) процедура анализа поведения такой же детерминированной функции.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Ниже мы будем изучать поведение детерминированных функций типа (2), содержащих особые точки, имея в виду преодоление трудности, связанной с наличием таких точек, путем раздетерминизации, т.е. перехода от функции (2) к соответствующей недетерминированной функции (т.е. функции с недетерминированными, а точнее – с интервальными параметрами). В связи с этим представляет интерес обзор научной литературы посвященной изучению различных неопределенных объектов.

Проблема изучения объектов, характеризующихся той или иной неопределенностью, возникла впервые в начале Второй мировой войны, в связи с необходимостью управления огнем зенитной артиллерии, в условиях случайного движения воздушных целей. Соответствующими задачами занимались выдающиеся математики-вероятностники Н. Винер [5] и А.Н. Колмогоров [6] и их многочисленные последователи. Однако широкое развитие исследований по изучению гражданских объектов, работающих в условиях неопределенности, началось только в конце 1950-х – начале 1960-х гг., в рамках математической статистики и ее новых направлений – обработки данных и планирование экспериментов [7, 8].

Исследования, выполненные в 1970-е–80-е гг., привели к более широкому пониманию неопределенности, включавшей теперь не только случайность, но и незнание возможных исходов, их неединственность, неопределенность целей, многокритериальность при решении оптимизационных задач. В связи с этим появились и новые подходы к описанию неопределенности, такие как теория нечетких множеств, принцип недоопределенной модели, принятие решений в многокритериальных задачах [2, 9, 10].

С 1980-х годов начал интенсивно применяться подход к описанию неопределенности, базирующийся на интервальной математике, позволяющей получать оценки характеристик неопределенных систем с гарантированной точностью [11–18]. При этом указанный подход применялся сначала в метрологии для определения интервального значения известной функции при интервальных значениях аргументов. Затем его развитие шло по двум направлениям. За рубежом интервальный подход развивался как средство автоматического учета ошибок округления при численном решении задач на компьютерах, в то время как в СССР и России ученые развивали его с целью нахождения области возможных значений результата вычислений с учетом структуры данных и функций, заданных в символьном виде.

Наконец, с 1990-х годов начала изучаться очень важная в практических приложениях задача исследования поведения произвольной недетерминированной функции с интервальными параметрами, являющейся аналогом известной задачи математического анализа – исследования поведения детерминированной функции средствами дифференциального исчисления [20].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Сначала изложим основную идею предлагаемого метода. Рассмотрим детерминированную функцию вида дроби (2), с возможными особыми точками, т.е. точками, в которых знаменатель функции (2) равен нулю. В таких точках, как уже говорилось в п. 1, функция (2) либо не существует, либо не имеет определенного значения. Мы предлагаем метод, позволяющий придать функции (2) одно определенное значение во всех ее точках, включая и особые, тем самым исключается влияние особых точек на характер поведения функции. Предлагаемый метод состоит в переходе от детерминированной функции (2) к соответствующей недетерминированной – интервальной функции

$$\tilde{f}(x) = \tilde{f}_1(x) / \tilde{f}_2(x) \quad (3)$$

путем замены всех точно заданных параметров исходной функции соответствующими интервальными параметрами. Эту процедуру естественно назвать *раздетерминизацией*. В результате раздетерминизации все точные значения числителя  $y_1 = f_1(x)$  и знаменателя  $y_2 = f_2(x)$  исходной функции  $f(x)$  переходят в интервальные значения  $\tilde{y}_1 = \tilde{f}_1(x)$ ,  $\tilde{y}_2 = \tilde{f}_2(x)$ , где  $\tilde{y}_1$ ,  $\tilde{y}_2$  – интервалы  $\tilde{y}_1 = [y_{11}, y_{12}]$ ,  $\tilde{y}_2 = [y_{21}, y_{22}]$ , а все точные значения самой исходной функции  $y = f(x)$  – в соответствующие интервальные значения этой функции  $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ , где  $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ . При этом все особые точки исходной функции после раздетерминизации можно исключить из рассмотрения. Действительно, в каждой такой точке знаменатель  $f_2(x)$  исходной функции равен нулю, но раздетерминируемый знаменатель  $\tilde{f}_2(x)$  в этой точке равен уже не нулю, а интервалу, содержащему нуль. Деление на такой интервал в интервальной математике не рассматривается и предполагается невозможным [3]. Однако это ошибочная точка зрения, поскольку, если вырезать из интервала малый подынтервал, содержащий нуль, то оставшаяся, большая часть интервала уже не будет содержать нуля и деление на такой интервал по методологии интервальной математики окажется вполне возможным. Таким образом, использование метода раздетерминизации исходной детерминированной функции (2) в сочетании с вырезанием нуля из интервала возможных значений раздетерминируемого знаменателя этой функции позволяет ликвидировать все особые точки исходной функции (2) и применить к изучению поведения этой функции обычные методы изучения поведения интервальной функции [3, 11, 14, 19, 20]. Разумеется, предлагаемый нами метод изучения поведения детерминированной функции, содержащей особые точки, является приближенным, поскольку при вырезании интервала, содержащего нуль, отбрасывается часть возможных значений подфункции – знаменателя изучаемой функции. Однако погрешность такого приближения может быть сделана как угодно малой путем уменьшения ширины вырезаемого интервала.

Опишем теперь метод раздетерминизации подробнее. Как известно из интервальной математики [3], лю-

бая операция над интервалами вводится как теоретическое обобщение соответствующей операции над точными вещественными числами. Т.е. если  $a$ ,  $b$  – точные вещественные числа,  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ ,  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  – интервалы,  $\bullet$  – операция над точными вещественными числами,  $\circ$  – соответствующая операция над интервалами, по определению имеем

$$\tilde{a} \circ \tilde{b} \equiv [a_1, a_2] \circ [b_1, b_2] \equiv \{a \cdot b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (4)$$

Также получаем формулу для операции деления двух интервалов

$$\tilde{a} / \tilde{b} \equiv [a_1, a_2] / [b_1, b_2] \equiv \{a / b | a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, 0 \notin \tilde{b}. \quad (5)$$

Дополнительное требование относительно нуля в этой формуле связано с невозможностью деления вещественного числа на нуль. Так как деление вещественных чисел обратно умножению, формулу (5) можно переписать в терминах операции умножения

$$\tilde{a} / \tilde{b} \equiv [a_1, a_2] / [b_1, b_2] \equiv [a_1, a_2] \cdot [1/b_1, 1/b_2], 0 \notin \tilde{b}. \quad (6)$$

Однако операция умножения интервалов, как известно из интервальной математики [3], выполняется по формуле следующего вида

$$\tilde{c} \cdot \tilde{d} \equiv [c_1, c_2] \cdot [d_1, d_2] = [\min_{i,j}(c_i \cdot d_j), \max_{i,j}(c_i \cdot d_j)]. \quad (7)$$

Соединяя вместе формулы (6), (7), мы получаем окончательную формулу для выполнения операции деления двух интервалов

$$\tilde{a} / \tilde{b} \equiv [a_1, a_2] / [b_1, b_2] = [\min_{i,j}(a_i / b_j), \max_{i,j}(a_i / b_j)], 0 \notin \tilde{b}. \quad (8)$$

Эта формула, однако, пригодна для выполнения операции деления двух интервалов только в тех случаях, когда интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  не содержит нуля. А что делать, если он содержит нуль? Интервальная математика не отвечает на этот вопрос [3].

Мы предлагаем следующий ответ на него. Будем считать, что интервал-делитель содержит нуль внутри себя (а не на одном из концов). Вырежем из интервала-делителя  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  в формуле (8) деления интервалов некоторый достаточно малый подынтервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$ , содержащий нуль, тем самым заменив интервал  $\tilde{b}$  биинтервалом

$$\tilde{b}''' = \tilde{b} / \tilde{b}^* = \tilde{b}' \cup \tilde{b}'' , \quad (9)$$

где  $\tilde{b}' = [b_1, b'_1]$ ,  $\tilde{b}'' = [b'_2, b_2]$  (см. рис. 1).

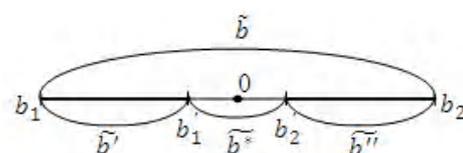


Рисунок 1.

Произведенную выше операцию естественно назвать операцией вырезания подынтервала из указанного интервала. Объективный смысл этой операции – это приближение исходного интервала  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  биинтервалом (объединением двух непересекающихся интервалов) вида  $\tilde{b}' \cup \tilde{b}''$ , выражающимся по формуле (9), таким образом, чтобы полученный биинтервал не содержал неприемлемого для нас множества точек. В данном случае это множество – интервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$ , содержащий нуль. Так, если мы хотим разделить интервал  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, то надо заменить в общей формуле деления (5) интервал  $\tilde{b}$  биинтервалом  $\tilde{b}'''$  вида (9), не содержащим нуля. Явный вид этой формулы найдем, используя общий принцип теоретико-множественного обобщения операций над точными вещественными числами (4). Имеем

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &\approx \tilde{a}/(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = \tilde{a}/(\tilde{b}' \cup \tilde{b}'') = \\ &= \{a/b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}' \cup \tilde{b}''\} = \{(a/b') \cup (a/b'') \mid a \in \tilde{a}, \\ &b' \in \tilde{b}', b'' \in \tilde{b}''\} = \{a/b' \mid a \in \tilde{a}, b' \in \tilde{b}'\} \cup \\ &\cup \{a/b'' \mid a \in \tilde{a}, b'' \in \tilde{b}''\} = (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}''). \end{aligned}$$

Итак, деление интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ , содержащий нуль, можно выполнить по приближенной формуле

$$\tilde{a}/\tilde{b} = (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}''), \quad (10)$$

где  $\tilde{b}'$  и  $\tilde{b}''$  – подынтервалы интервала  $\tilde{b}$ , не содержащие нуля, объединение которых приближенно равно  $\tilde{b}$  (рис. 1). Поскольку  $\tilde{b}'$  и  $\tilde{b}''$  не содержат нуля, обе скобки правой части (10) можно вычислять по формуле (8). В развернутом виде формула (10) переписывается как

$$[a_1, a_2]/[b_1, b_2] \equiv [a_1, a_2]/[b_1, b'_1] \cup [a_1, a_2]/[b'_2, b_2]. \quad (11)$$

#### 4 РАБОЧИЕ ФОРМУЛЫ ДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛА НА ИНТЕРВАЛ, СОДЕРЖАЩИЙ НУЛЬ

Общую формулу (10) деления на интервал, содержащий нуль, или эквивалентную ей формулу (11) можно значительно упростить и конкретизировать, рассмотрев возможные типы области делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  (рис. 2). В процессе упрощения используем соотношения для делителя  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  (рис. 1)

$$\underbrace{b_1 < b'_1}_{<0} < \underbrace{b'_2 < b_2}_{>0}. \quad (12)$$

Случай 1:

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0. \quad (13)$$

этом случае, вычисляя скобки в правой части формулы (10) по формуле (8), найдем формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, в виде

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= \underbrace{[a_2/b'_1, a_1/b_1]}_{<0} \cup \underbrace{[a_1/b_2, a_2/b'_2]}_{>0}, \\ \text{при } \tilde{a} &= [a_1, a_2] \geq 0. \end{aligned} \quad (14)$$

Случай 2:

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0. \quad (15)$$

Здесь, вычисляя аналогично предыдущему скобки в правой части формулы (10) по формуле (8), получим формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, в виде биинтервала

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= \underbrace{[a_1/b'_2, a_2/b_2]}_{<0} \cup \underbrace{[a_2/b_1, a_1/b'_1]}_{>0}, \\ \text{при } \tilde{a} &= [a_1, a_2] \leq 0. \end{aligned} \quad (16)$$

Случай 3:

$$\tilde{a} = [a_1, a_2] \text{ такой, что } a_1 < 0 < a_2. \quad (17)$$

В этом случае, вычисляя аналогично предыдущему скобки в правой части (10) по формуле (8), получим формулу деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , содержащий нуль, сначала в виде объединения 4 интервалов

$$\begin{aligned} \tilde{a}/\tilde{b} &= (\tilde{a}/\tilde{b}') \cup (\tilde{a}/\tilde{b}'') = [a_1, a_2]/[b_1, b'_1] \cup [a_1, a_2]/[b'_2, b_2] = \\ &= [a_1, 0]/[b_1, b'_1] \cup [0, a_2]/[b_1, b'_1] \cup [a_1, 0]/[b'_2, b_2] \cup [0, a_2]/ \\ &/[b'_2, b_2] = [0, a_1/b'_1] \cup [a_2/b'_1, 0] \cup [a_1/b'_2, 0] \cup [0, a_2/b'_2], \end{aligned}$$

после объединения одинаково подчеркнутых интервалов, в виде объединения 2 интервалов

$$\tilde{a}/\tilde{b} = \underbrace{[a_1/b'_2, a_1/b'_1]}_{<0} \cup \underbrace{[a_2/b'_1, a_2/b'_2]}_{>0},$$

и, наконец, используя операции непрерывной логики

$$\wedge = \min, \vee = \max, \quad (18)$$

в виде одного интервала

$$\tilde{a}/\tilde{b} = [a_1/b'_2 \wedge a_2/b'_1, a_1/b'_1 \vee a_2/b'_2]. \quad (19)$$

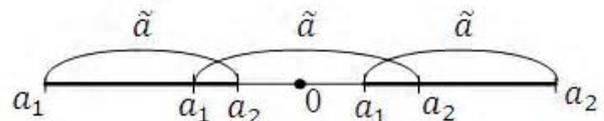


Рисунок 2.

#### 5 СЛУЧАЙ ДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛОВ, СИММЕТРИЧНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО НУЛЯ

Особый практический интерес представляет подслучай случая 3, когда оба интервала – делимое  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  и делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  – расположены симметрично относительно нуля, в соответствии с чем естественно и выре-

заемый из интервала  $\tilde{b}$  подынтервал  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$  сделать симметричным относительно нуля. Условия симметричности интервалов относительно нуля:

$$a_2 = -a_1, b_2 = -b_1, b'_2 = -b'_1. \quad (20)$$

Подставляя соотношения (20) в формулу (19), найдем

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= [a_1, a_2] / ([b_1, b'_1] \cup [b'_2, b_2]) = \\ &= \underbrace{[(-a_2 / b'_2) \wedge (a_2 / -b'_2)]}_{<0} \cup \underbrace{[(-a_2 / -b'_2) \vee (a_2 / b'_2)]}_{>0}. \end{aligned}$$

Окончательно

$$\tilde{a} / \tilde{b} = [a_1, a_2] / ([b_1, b'_1] \cup [b'_2, b_2]) = [-a_2 / b'_2, a_2 / b'_2]. \quad (21)$$

Как видно из (21), деление интервальных чисел, симметричных относительно нуля, дает интервальное число, симметричное относительно нуля.

Интерпретацию формулы (21) легко дать, учитывая, что  $a_2$  – это полуширина интервала делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ , а  $b'_2$  – полуширина интервала – выреза  $\tilde{b}^* = [b'_1, b'_2]$  в интервале-делителе  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ , обеспечивающего отсутствие в этом интервале нуля и тем самым – возможность деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ . Итак, математический смысл формулы (21) таков: частное от деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$ , содержащий нуль (в случае, если эти интервалы симметричны относительно нуля, как и вырез в интервале  $\tilde{b}$ , обеспечивающий отсутствие в нем нуля), равно интервалу (также симметричному относительно нуля), левая граница которого равна частному от деления ширины интервала-делимого  $\tilde{a}$  на ширину интервала-выреза  $\tilde{b}^*$ , взятому со знаком минус, а правая граница – этому же частному, но взятому уже со знаком плюс.

Формуле (21) можно придать наиболее понятную форму, в которой числитель и знаменатель вычисляемой интервальной дроби представлены в явном виде. Для этого обозначим ширину интервала-делимого  $\tilde{a}$  через  $a$ , ширину интервала-делителя  $\tilde{b}$  через  $b$ , ширину интервала-выреза  $\tilde{b}^*$  через  $b^*$ . Далее, обозначим через  $\beta$  долю ширины выреза  $b^*$  от ширины  $b$  всего интервала, в котором производится вырез ( $0 < \beta < 1$ ) (коэффициент вырезания). Тогда величины в правой части (21) выражаются в виде

$$a_2 = a / 2, b'_2 = b^* / 2 = \beta b / 2,$$

и формула (21) принимает искомую форму

$$\tilde{a} / \tilde{b} = [-0,5a, 0,5a] / [-0,5b, 0,5b] = [-a / \beta b, a / \beta b]. \quad (22)$$

Коэффициент  $\beta$  в формуле (22) должен выбираться достаточно близким к нулю, так как чем он ближе к нулю, тем точность приближенной формулы (22) выше.

**Пример 1.** Вычислить дробь  $[-2,2] / [-5,5]$ , полученную делением двух интервалов, симметричных относительно нуля. Примем коэффициент вырезания  $\beta = 0,1$ .

Далее, учтем, что в нашем случае ширина интервала-делимого равна  $a = 2 - (-2) = 4$ , а ширина интервала-делителя  $b = 5 - (-5) = 10$ , тогда по формуле (22) получим

$$[-2,2] / [-5,5] = [-4 / (0,1 \cdot 10), 4 / (0,1 \cdot 10)] = [-4 / 1].$$

Как и следовало ожидать, результатом деления оказалось также интервальное число, симметричное относительно нуля.

## 6 СЛУЧАЙ ДЕЛЕНИЯ ИНТЕРВАЛА НА ИНТЕРВАЛ С НУЛЕМ НА КОНЦЕ

В пп. 3, 4, 5 мы рассмотрели случай, когда интервал-делитель содержит нуль внутри себя. Если нуль находится на одном из концов интервала-делителя, формулы деления интервалов изменяются. Это связано с тем, что в этом случае интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  приобретает одну из двух конкретных форм, отличных от ранее рассмотренной формы, указанной на рис. 1, и эти две формы таковы

$$1) \tilde{b} = [0, b] \text{ или } 2) \tilde{b} = [b, 0]. \quad (23)$$

Они даны на рис. 3. Последующий вывод рабочих формул деления интервала  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  на интервал  $\tilde{b}$  делаем отдельно для каждого возможного сочетания типа интервала  $\tilde{a}$  и типа интервала  $\tilde{b}$ . Исходная приближенная формула для выполнения операции деления интервала  $\tilde{a}$  на интервал  $\tilde{b}$  такова

$$\tilde{a} / \tilde{b} = \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*). \quad (24)$$

Формула (24) имеет для рассматриваемого здесь случая тот же смысл, что и формула (10) для случая нахождения нуля внутри интервала-делителя. Вывод рабочих формул деления начинаем со случая формы 1 интервала-делителя  $\tilde{b}$  (рис. 3). Здесь скобка в формуле (24) равна

$$(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [0, b] \setminus [0, b'] = [b', b], \text{ где } 0 < b' < b. \quad (25)$$

Как видно из (25), интервал-делитель в правой части (24) не содержит нуля. Поэтому в данной формуле деление можно выполнять по формуле (8). Получение соответствующих рабочих формул проведем отдельно для возможных трех типов интервала-делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ .

1)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0$ . Тогда по формуле (8) получаем из формулы (24) следующую рабочую формулу для деления:

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = \\ &= [a_1 / b, a_2 / b'] = [a_1 / b, a_2 / \beta b], \end{aligned} \quad (26)$$

где  $\beta = b' / b$  – коэффициент ширины выреза  $b'$  в интервале-делителе  $\tilde{b}$ ;

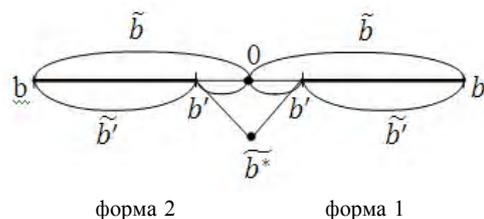


Рисунок 3.

2)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0$ . Тогда по формуле (8) получаем из формулы (24) такую рабочую формулу для операции деления:

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = \\ &= [a_1 / b', a_2 / b] = [a_1 / \beta b, a_2 / b], \end{aligned} \quad (27)$$

в которой  $\beta$  – тот же коэффициент.

3)  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  такой, что  $a_1 < 0 < a_2$ . Тогда из формулы (24) по формуле (8) получаем следующую рабочую формулу

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b', b] = \\ &= [a_1 / b', a_2 / b'] = [a_1 / \beta b, a_2 / \beta b], \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\beta$  – тот же коэффициент.

Теперь сделаем ту же процедуру для случая формы 2 интервала-делителя  $\tilde{b}$  (эта форма изображена на рис. 3). В этом случае скобка в формуле (24) равна

$$(\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [b, 0] \setminus [b', 0] = [b, b'], \text{ где } b < b' < 0. \quad (29)$$

Как видно из (29), интервал-делитель в правой части формулы (24) и в этом случае не содержит нуля. Поэтому деление и здесь можно выполнять по формуле (8). Как и в случае формы 1 интервала-делителя  $\tilde{b}$ , рассматриваем возможные 3 типа интервала-делимого  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ .

1)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \geq 0$ . По формуле (8) из формулы (24) получаем следующую рабочую формулу для операции деления:

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = \\ &= [a_2 / b', a_1 / b] = [a_2 / \beta b, a_1 / b], \end{aligned} \quad (30)$$

где  $\beta = b' / b$  – коэффициент ширины выреза  $b'$  в интервале-делителе  $\tilde{b}$ ;

2)  $\tilde{a} = [a_1, a_2] \leq 0$ . По формуле (8) из (24) получаем такую рабочую формулу:

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = \\ &= [a_2 / b, a_1 / b'] = [a_2 / b, a_1 / \beta b], \end{aligned} \quad (31)$$

в которой  $\beta$  – тот же коэффициент:

3)  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  такой, что  $a_1 < 0 < a_2$ . По формуле (8) получаем из (24) такую рабочую формулу для операции деления:

$$\begin{aligned} \tilde{a} / \tilde{b} &= \tilde{a} / (\tilde{b} \setminus \tilde{b}^*) = [a_1, a_2] / [b, b'] = \\ &= [a_2 / b', a_1 / b'] = [a_2 / \beta b, a_1 / \beta b], \end{aligned} \quad (32)$$

где  $\beta$  – тот же коэффициент.

Сравнение рабочих формул деления интервалов (26) с (30), (27) с (31) и (28) с (32) показывает, что эти двойственные формулы (в них интервал-делимое  $\tilde{a} = [a_1, a_2]$  одного и того же типа, а интервал-делитель  $\tilde{b} = [b_1, b_2]$  противоположного типа) различаются лишь тем, что

выражение для нижней границы результата деления в одной формуле является выражением для верхней границы результата деления в другой формуле и наоборот.

### 7 АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ПОСТАВЛЕННЫХ ЗАДАЧ

Обратимся к двум задачам, поставленным в п. 1. Будем решать эти задачи в условиях, когда обычные методы математического анализа, основанные на понятии предельного перехода в особую точку, не работают, ввиду отсутствия предела, так что получить решение невозможно даже для простейших особых точек – вида  $0/0$ . Поэтому для получения решения используем здесь принципиально иной подход, основанный на интервальной раздетерминизации, т.е. переходе от исходной детерминированной функции к соответствующей недетерминированной – интервальной путем замены детерминированных параметров исходной функции соответствующими интервальными параметрами. В полученной таким образом интервальной функции особым точкам вида  $0/0$  и  $a/0$  ( $a \neq 0$ ) исходной детерминированной функции соответствуют особые интервальные точки такого вида:  $\tilde{0} / \tilde{0}$  и  $\tilde{a} / \tilde{0}$  ( $\tilde{0}$  – интервал, содержащий 0,  $\tilde{a}$  – интервал, не содержащий 0). После этого для решения задачи расчета функции следует вычислить значения функции во всех ее интервальных неособых точках, используя общеизвестные методы вычисления интервальных функций [3], и во всех интервальных особых точках, используя изложенные выше специальные методы вычислений. После этого совокупность проведенных вычислений с помощью предложенных ранее методов анализа [20] дает нам осуществить анализ поведения имеющейся функции. Из всех указанных процедур новыми являются только процедуры вычисления интервальных функций в интервальных особых точках с помощью специальных методов вычислений, изложенных выше в пп.4, 5, 6, поэтому ниже мы ограничимся демонстрацией выполнения только указанных процедур при решении прикладных задач.

**Пример 2.** Пусть требуется вычислить решение следующей детерминированной системы линейных уравнений

$$\begin{cases} 3x_1 + 4x_2 = 5 \\ 3x_1 + 4x_2 = 6 \end{cases} \quad (33)$$

Сразу видно, что в заданной детерминированной постановке система уравнений (33) не имеет решений, поскольку при равенстве левых частей обоих уравнений их правые части различны, так что уравнения противоречивы. О том же говорит и алгебра: определитель системы

$$D = \begin{vmatrix} 3 & 4 \\ 3 & 4 \end{vmatrix} = 3 \cdot 4 - 3 \cdot 4 = 0,$$

а производные от него определители  $D_1, D_2$ , полученные заменой 1-го и 2-го столбцов столбцом свободных членов,

$$D_1 = \begin{vmatrix} 5 & 4 \\ 6 & 4 \end{vmatrix} = 5 \cdot 4 - 6 \cdot 4 = -4, \quad D_2 = \begin{vmatrix} 3 & 5 \\ 3 & 6 \end{vmatrix} = 3 \cdot 6 - 3 \cdot 5 = 3,$$

не равны 0, так что система (33) несовместна, т.е. не имеет решений. Однако система (33) может быть вполне реалистичной, например, представлять собой результат повторных измерений объекта, т.е. процесс последовательного накопления информации в некотором реальном объекте. Поэтому система уравнений (33) может иметь реальное решение, если постановку задачи изменить, приблизив ее к реальности. Этим изменением может быть более близкая к реальности совокупность недетерминированных (интервальных) коэффициентов уравнений, например, такая: вместо  $3 \rightarrow [2,4]$ , вместо  $4 \rightarrow [3,5]$ , вместо  $5 \rightarrow [4,6]$ , вместо  $6 \rightarrow [5,7]$ . Тогда система (33) запишется в виде

$$\begin{cases} [2,4]\tilde{x}_1 + [3,5]\tilde{x}_2 = [4,6] \\ [2,4]\tilde{x}_1 + [3,5]\tilde{x}_2 = [5,7] \end{cases} \quad (34)$$

Под решением интервальной линейной системы уравнений (34) будем понимать интервальную версию выражений Крамера для решения этой системы (33), т.е.

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= \frac{\begin{vmatrix} [4,6] & [3,5] \\ [5,7] & [3,5] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix}}, \\ \tilde{x}_2 &= \frac{\begin{vmatrix} [2,4] & [4,6] \\ [2,4] & [5,7] \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix}}. \end{aligned} \quad (35)$$

С использованием общих методов вычисления интервальной функции [3] вычисляем определители в правых частях (35)

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} [2,4] & [3,5] \\ [2,4] & [3,5] \end{vmatrix} &= [2,4] \cdot [3,5] - [2,4] \cdot [3,5] = \\ &= [2 \cdot 3,4 \cdot 5] - [2 \cdot 3,4 \cdot 5] = [6,20] - [6,20] = [-14,14]; \\ \begin{vmatrix} [4,6] & [3,5] \\ [5,7] & [3,5] \end{vmatrix} &= [4,6] \cdot [3,5] - [5,7] \cdot [3,5] = \\ &= [4 \cdot 3,6 \cdot 5] - [5 \cdot 3,7 \cdot 5] = [12,30] - [15,35] = [-23,15]; \\ \begin{vmatrix} [2,4] & [4,6] \\ [2,4] & [5,7] \end{vmatrix} &= [2,4] \cdot [5,7] - [2,4] \cdot [4,6] = \\ &= [2 \cdot 5,4 \cdot 7] - [2 \cdot 4,4 \cdot 6] = [10,28] - [8,24] = [-14,20]. \end{aligned}$$

Подставляя вычисленные определители в выражения (35) для  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ , используя формулу (19) для деления интервалов, содержащих в себе нуль, и учитывая тот факт, что в выражении для  $\tilde{x}_1$  у делимого  $a_1 = -23$ ,  $a_2 = 15$ , в выражении для  $\tilde{x}_2$  — у делимого  $a_1 = -14$ ,  $a_2 = 20$  и в обоих выражениях ширина делителя имеет значение  $b_2 - b_1 = 14 - (-14) = 28$ , принимая ширину выреза нуля в 10% от ширины делителя и симметрично относительно нуля, т.е. имеем значение  $b'_2 - b'_1 = \beta(b_2 - b_1) = 0,1 \cdot 28 = 2,8$ , так что  $b'_1 = -1,4$ ,  $b'_2 = 1,4$ , находим значения  $\tilde{x}_1$ ,  $\tilde{x}_2$ :

$$\begin{aligned} \tilde{x}_1 &= [-23,15]/[-14,14] = [(-23/1,4) \wedge (15/-1,4), \\ & \quad (-23/-1,4) \vee (15/1,4)] = [-16,4;16,4]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{x}_2 &= [-14,20]/[-14,14] = [(-14/1,4) \wedge (20/-1,4), \\ & \quad (-14/-1,4) \vee (20/1,4)] = [-14,3;14,3]. \end{aligned} \quad (36)$$

Мы видим, что система линейных уравнений, у которой в детерминированном варианте (33) отсутствовало решение, после интервальной раздетерминизации приобретает форму (34), которая уже имеет решение (36).

## 8 ОБСУЖДЕНИЕ

Выше мы убедились в том, что предложенная процедура раздетерминизации, т.е. переход от модели детерминированной системы к модели недетерминированной интервальной системы придает изучаемой системе новое важное свойство: в точках, в которых знаменатель функции-характеристики прежней системы обращался в нуль (особые точки), из-за чего характеристика в этих точках не существовала, знаменатель функции-характеристики новой системы равен интервалу, включающему кроме нуля, бесконечное множество ненулевых значений, что делает возможным существование характеристики системы и в особых точках. Благодаря этому свойству предложенная очень простая процедура раздетерминизации, заключающаяся в замене детерминированных параметров характеристики изучаемой системы соответствующими интервальными параметрами позволяет изучать исчерпывающим образом системы, характеристики которых в базовой детерминированной модели не везде существуют. Примерами подобных систем могут служить разнообразные неклассические информационные системы, используемые в телеметрии, надежности, гуманитарной сфере и т.д. Их особенность заключается в том, что они не могут быть описаны средствами классической детерминированной математики. Поэтому для их адекватного описания нужно либо придумать новый, адекватный проблеме математический аппарат, либо придумать новую математическую модель системы, поддающуюся адекватному описанию средствами какого-нибудь известного математического аппарата. Примером первого подхода может служить предложенный для описания гуманитарных систем аппарат нечетких множеств [2]. Примером второго подхода служит предложенный в этой статье раздетерминизационный подход.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен метод раздетерминизации для решения проблемы вычисления детерминированных функций, имеющих так называемые особые точки, в которых определенного значения у функции не существует. Предложенный метод состоит в переходе от проблемной детерминированной функции к соответствующей недетерминированной (интервальной) функции путем замены детерминированных параметров функции интервальными параметрами. Благодаря этому значения функции в особых точках становятся вполне определенными интервальными значениями, что и позволяет решить проблему. Решение проблемы достигается легализацией деления на нуль путем интервализации вычислений. Предложенный подход к решению проблемы вычисления функций с особыми точками имеет важное

значення для некоторых классов прикладных систем, в которых эта проблема существует. Такие системы встречаются в телеметрии, надежности, гуманитарной сфере и некоторых других областях, в которых не всегда применимы классические методы детерминистской математики, что и заставляет искать новые подходы к решению возникающих здесь задач.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М. : Наука, 2004. – 350 с.
- Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
- Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер. – М. : Мир, 1987. – 360 с.
- Горбань И. И. Феномен статистической устойчивости / И. И. Горбань. – К. : Наукова думка, 2014. – 370 с.
- Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series / N. Wiener. – New-York: Technology Press and Wiley, 1949. – 180 p.
- Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей / А. Н. Колмогоров // Известия АН СССР. Серия : математика. – 1941. – № 5. – С. 3–14.
- Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л. В. Канторович // Сибирский математический журнал. – 1962. – Т. 3, № 5. – С. 3–14.
- Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М. : Наука, 1971. – 320 с.
- Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний / А. С. Нариньяни // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 5. – С. 3–28.
- Hyvonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach / E. Hyvonen // Artificial Intelligence. – 1992. – Vol. 58. – P. 19.
- Вошинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров. – М. : МЭИ, София, Техника, 1989. – 226 с.
- Вошинин А. П. Интервальный анализ данных / А. П. Вошинин, А. Ф. Бочков, Г. Р. Сотиров // Заводская лаборатория. – 1990. – № 7. – С. 76–81.
- Куржанский А. Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А. Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 75–89.
- Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях неопределенности / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 7. – С. 97–106.
- Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 7. – С. 111–122.
- Левин В. И. Интервальное дискретное программирование / В. И. Левин // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – № 6. – С. 92–103.
- Левин В. И. Нелинейная оптимизация в условиях интервальной неопределенности / В. И. Левин // Кибернетика и системный анализ. – 1999. – № 2. – С. 138–146.
- Левин В. И. Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2012. – № 4. – С. 52–59.
- Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2014. – № 5. – С. 14–21.
- Левин В. И. Анализ поведения неточно заданных функций с помощью интервально-дифференциального исчисления / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2015. – Т. 21. – № 3. – С. 163–170.

Статья поступила в редакцию 04.09.2016.

После доработки 25.10.2016.

Левін В. І.

Д-р техн. наук, професор Пензенського державного технологічного університету, Пенза, Росія

### МЕТОД МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕДІНКИ ФУНКЦІЙ З ДОПОМОГОЮ РОЗДЕТЕРМІНАЦІЇ

**Актуальність.** При моделюванні організаційно-технічних систем в низці випадків виникають складності дослідження функціонування таких систем, якщо вони формалізовані на основі аналітико-детермінованих функцій. У роботі запропоновано новий метод - роздетермінація, створений для вирішення проблеми обчислення детермінованих функцій, що мають так звані особливі точки, в яких у функції не існує визначеного значення.

**Мета.** Метою є розробка підходу, що дозволяє здійснювати поділ на нуль і тим самим виключати особливі точки функцій.

**Метод.** Запропонований у статті метод полягає в переході від проблематичної, з точки зору обчислення, детермінованої функції до відповідної недетермінованої, а саме, інтервальної функції, шляхом заміни детермінованих параметрів функції відповідними інтервальними параметрами. Завдяки цій заміні значення функції в особливих точках стають інтервальними і цілком визначеними значеннями. Останнє і дозволяє вирішити проблему обчислення функції.

**Результат.** Шляхом вирізання інтервальної функції виведені робочі формули, засновані на основних положеннях інтервальної математики, які дозволяють легко обчислювати значення цієї функції. Запропонований у статті підхід до вирішення проблеми обчислення функцій з особливими точками має важливе значення для всіх класів прикладних систем, в яких ця проблема реально існує. Мова тут йде про ті системи, функції-характеристики яких мають деяке число особливих точок. Такі системи зустрічаються найчастіше в телеметрії, теорії та практиці надійності, гуманітарній сфері та низці інших областей. Особливості цих областей полягають у тому, що в них не завжди застосовні класичні методи детерміністської математики, що спонукає розробляти нові підходи до вирішення завдань, що тут виникають.

**Висновки.** Вирішення проблеми обчислення функції досягається легалізацією ділення на нуль шляхом інтервалізації обчислень. При цьому використовується принцип вирізання околиці нуля з інтервалу, що є дільником інтервального дробу, що подає досліджувану функцію.

**Ключові слова:** інтервал, інтервальна функція, інтервальні обчислення, роздетермінація, ділення на нуль.

Levin V. I.

Dr. Sc., Professor of Mathematical Department of Penza State Technological University, Penza, Russia

### METHOD OF MODELING OF BEHAVIOR OF FUNCTION BY DEDETERMINATION

**Context.** In this paper we propose the dedetermination as the new method designed to solving a problem of calculation of deterministic functions with the so-called singular points where the function does not take a certain value.

**Objective.** The approach is developed that allows for division by zero and thus exclude singular points of functions.

**Method.** The method proposed in this article is to move from the problematic (from point of view of calculating) determined function to the corresponding not determined (interval) function by replacing determined function parameters by corresponding interval parameters. Due to this change values of the function at the singular points will be well-defined interval and values.

**Results.** The latter allows you to solve the problem of calculating the function. For the simplified by cutting out interval function the effective formulas are derived based on main provisions of interval mathematics and make it easy to calculate value of this function. The proposed in the article approach to the problem of calculating functions with singular points is important for all those classes of systems in which the problem really exists. It is about the systems which functions have any number of specific points. Such systems are found mostly in telemetry, reliability theory and practice, humanitarian and others areas. The features of these areas is that they do not always apply the classical methods of deterministic mathematics. This leads us to search for new approaches to solving problems that arise here.

**Conclusions.** The solution to this problem is achieved by legalization division by zero by intervalization of calculations. It uses the principle of cutting out a neighborhood of zero in the interval being the denominator of the fraction representing studied function.

**Keywords:** interval, interval function, interval calculation, dedetermination, division by zero.

## REFERENCES

1. Gnedenko B. V. *Kurs Teorii Veroyatnostey*. Moscow, Nauka, 2004, 350 p.
2. Zadeh L. A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, *Information Sciences*, 1975, No. 8; 9, pp. 199–249, 301–357; 43–80.
3. Alefeld G., Herzberger J. *Introduction to Interval Computations*. N.Y., Academic Press, 1983, 352 p.
4. Gorban I. I. *Fenomen Statisticheskoy Ustoychivosti*. Kiev, Naukova Dumka, 2014, 370 p.
5. Wiener N. *Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series*. New-York, Technology Press and Wiley, 1949, 180 p.
6. Kolmogorov A. N. *Interpolirovanie i Extrapolirovanie Stacionarnykh Sluchaynykh Posledovatelnostey*, *Izvestiya AN SSSR. Matematika*, 1941, No. 5, pp. 3–14.
7. Kantorovich L. V. *O Nekotorykh Novykh Podhodah k Vychislitelnim Metodam i Obrabotke Nablyudeniyy, Sibirskiy Matematicheskii Zhurnal*, 1962, Vol. 3, No. 5, pp. 3–14.
8. Nalimov V. V., Chernova N. A. *Teoriya Experimenta*. Moscow, Nauka, 1971, 320 p.
9. Narin'yani A. S. *Nedopredelennost' v Sisteme Predstavleniya i Obrabotki Znaniy*, *Izvestiya AN SSSR. Tehnicheskaya Kibernetika*, 1986, No. 5, pp. 3–28.
10. Hyvonen E. *Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach*, *Artificial Intelligence*, 1992, Vol. 58, P. 19.
11. Voschinin A. P., Sotirov G. R. *Optimizaciya v Usloviyakh Neopredelennosti*. Moscow, MEI; Sofia, Tehnika, 1989, 226 p.
12. Voschinin A. P., Bochkov A. F., Sotirov G. R. *Intervalnyi Analiz Dannykh, Zavodskaya Laboratoriya*, 1990, No. 7, pp. 76–81.
13. Kurzhanskiy A. B. *Identification Problem – Theory of Guaranteed Estimates*, *Automation and Remote Control*, 1991, Vol. 52, No. 4, pp. 447–465.
14. Levin V. I. *Discrete Optimization under Interval Uncertainty*, *Automation and Remote Control*, 1992, Vol. 53, No. 7, pp. 1039–1047.
15. Levin V. I. *Boolean Linear Programming with Interval Coefficients*, *Automation and Remote Control*, 1994, Vol. 55, No. 7, pp. 1019–1028.
16. Levin V. I. *Interval Discrete Programming*, *Cybernetics and Systems Analysis*, 1994, Vol. 30, No. 6, pp. 866–874.
17. Levin V. I. *Nonlinear Optimization under Interval Uncertainty*, *Cybernetics and Systems Analysis*, 1999, Vol. 35, No. 2, pp. 297–306.
18. Levin V. I. *Metody Optimizacii Sistem v Usloviyakh Intervalnoy Neopredelennosti Parametrov*, *Informacionnye Tehnologii*, 2012, No. 4, pp. 52–59.
19. Levin V. I. *Metodologiya Optimizacii v Usloviyakh Neopredelennosti Metodod Determinizacii*, *Informacionnye Tehnologii*, 2014, No. 5, pp. 14–21.
20. Levin V. I. *Analiz Povedeniya Netochno Zadannykh Funkciy s Pomoschy Intervalno-Differencialnogo Ischisleniya*, *Informacionnye Tehnologii*, 2015, Vol. 21, No. 3, pp. 163–170.

Маслак А. А.<sup>1</sup>, Моисеев С. И.<sup>2</sup>, Осипов С. А.<sup>3</sup>, Поздняков С. А.<sup>4</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математики, информатики и методики их преподавания, зав. лабораторией объективных измерений, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Россия<sup>2</sup>Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры прикладной информатики и математики, Институт менеджмента, маркетинга и финансов, г. Воронеж, Россия<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математики, информатики и методики их преподавания, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Россия<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математики, информатики и методики их преподавания, Филиал Кубанского государственного университета в г. Славянске-на-Кубани, г. Славянск-на-Кубани, Россия

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЛАТЕНТНОЙ ПЕРЕМЕННОЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДИАПАЗОНА ВАРЬИРОВАНИЯ НАБОРА ИНДИКАТОРОВ

**Актуальность.** Важным практическим аспектом является увеличение точности измерения латентной переменной, поскольку от этого зависит эффективность принимаемых решений. Одним из возможных способов увеличения точности измерения является выбор наилучшего расположения диапазона набора индикаторов относительно латентной переменной.

**Цель.** Целью работы является исследование влияния расположения набора индикаторов относительно латентной переменной на точность ее измерения. Для достижения поставленной цели необходимо сгенерировать матрицы данных на основе модели Раша; получить оценки латентной переменной; сравнить полученные оценки латентной переменной с теми значениями, которые использовались при моделировании.

**Метод.** Учитывая то, что модель измерения латентной переменной является нелинейной, аналитическое решение затруднено. Поэтому исследование проводилось на основе имитационного моделирования в рамках теории измерения латентных переменных. Данные имитационного эксперимента описывались моделью Раша для дихотомических индикаторов и обрабатывались в диалоговой системе «Измерение латентных переменных».

**Результаты.** В рамках теории латентных переменных на основе имитационного моделирования проведено исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от расположения диапазона варьирования индикаторов. На основе дисперсионного анализа показано, что уменьшение диапазона индикаторов внутри диапазона варьирования латентной переменной повышает точность ее измерения при прочих равных условиях. Точность измерения латентной переменной выше в центре диапазона ее варьирования, чем по краям независимо от диапазона варьирования индикаторов.

**Выводы.** Предложена методика анализа точности измерения латентной переменной в зависимости от расположения диапазона индикаторов. В отличие от существующей точки зрения, что диапазон варьирования индикаторов должен покрывать диапазон варьирования латентной переменной, показано, что наибольшая точность измерения латентной переменной достигается при варьировании индикаторов в середине диапазона латентной переменной при прочих равных условиях. Полученные результаты использованы для выбора оптимального алгоритма адаптивного тестирования. Представляет интерес расширить исследование и оценить влияние других диапазонов варьирования латентной переменной и набора индикаторов на точность измерения.

**Ключевые слова:** латентная переменная, дихотомическая модель Раша, точность измерения, имитационное моделирование.

### НОМЕНКЛАТУРА

$P_{ij}$  – вероятность правильного ответа («1»)  $i$ -го студента на  $j$ -е задание ( $i = 1, 2, \dots, 40; j = 1, 2, \dots, 40$ );

$\beta_i$  –  $i$ -е значение латентной переменной;

$\delta_j$  – значение  $j$ -го индикатора;

$x_{ij}$  – элемент матрицы тестирования, состоящий из единиц и нулей;

$\text{Int}(Y)$  – целая часть числа  $Y$ ;

$\text{Rnd}$  – случайное число в интервале (0; 1);

$\hat{\beta}_i$  – оценка  $i$ -го значения латентной переменной;

$|\beta - \hat{\beta}_i|$  – абсолютная ошибка измерения;

$\text{SE}$  – среднее квадратическое отклонение (стандартная ошибка);

Логит – единица измерения латентной переменной.

### ВВЕДЕНИЕ

Трудно переоценить значимость измерений, измерение является неотъемлемым компонентом научного познания. Важность измерений в научных исследованиях

объясняется следующим. Одной из самых главных функций науки является прогноз, который возможен только на основе найденных закономерностей. А чтобы найти закономерности надо научиться измерять интересные нас величины. Если мы не можем измерять напряжение, силу тока и сопротивление, мы не можем установить закон Ома.

Здесь уместно привести высказывания знаменитых ученых:

– «Наука начинается с тех пор, как начинают измерять» (Д. И. Менделеев);

– «Если вы можете измерить то, о чем говорите, и выразить это числом, вы что-то знаете об этом. Но если вы не можете это измерить, не можете выразить это числом, ваше знание является скудным и недостаточным» (Уильям Томсон, лорд Кельвин).

Теория измерения латентных переменных как раз и позволяет формализовать (операционально определить) важные в предметной области конструкты (латентные переменные), которые и являются необходимой основой для установления закономерностей. Именно отсут-

стве таких формализованных конструкторов является одной из причин того, что многие социальные науки до сих пор являются преимущественно описательными.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от диапазона варьирования индикаторов. Учитывая то, что модель измерения латентной переменной (логистическая модель) является нелинейной, аналитическое решение затруднено. Поэтому исследование проводилось на основе имитационного моделирования в рамках теории измерения латентных переменных.

Не снижая общности исследования, для удобства интерпретации в качестве значений латентной переменной выбирается уровень подготовленности студентов, а в качестве индикаторов тестовые задания. Использовалась модель Раша для дихотомических индикаторов:

$$P_{ij} = \frac{e^{\beta_i - \delta_j}}{1 + e^{\beta_i - \delta_j}},$$

где  $P_{ij}$  – вероятность правильного ответа  $i$ -ого студента на  $j$ -ое тестовое задание,  $\beta_i$  – уровень подготовленности  $i$ -го студента,  $\delta_j$  – трудность задания. Отметим, что в рамках теории латентных переменных измерения латентных переменных осуществляются в логитах [1].

В исследовании латентная переменная варьируется в диапазоне  $[-4,0; +4,0]$  логит, число значений латентной переменной (число студентов) выбрано равным 40, которые равномерно распределены в этом диапазоне. Трудность индикаторов (число тестовых заданий) варьируется в диапазонах  $[-0,5; +0,5]$ ,  $[-1,0; +1,0]$ ,  $[-1,5; +1,5]$ , ...,  $[-6,0; +6,0]$ . Число индикаторов выбрано равным 40, которые также равномерно распределены в этих интервалах варьирования.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- сгенерировать матрицы данных в выбранных интервалах варьирования;
- получить оценки латентной переменной для измеряемых объектов;
- сравнить полученные оценки латентной переменной с теми значениями, которые использовались при моделировании;
- дать рекомендации по использованию интервалов варьирования индикаторов для измерения латентной переменной.

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Теория измерения латентных переменных находит все более широкое применение в образовании и других социальных системах [1–5]. Исследованию точности измерения латентных переменных уделялось большое внимание с самого начала разработки теории измерения латентных переменных [6]. Точность измерения латентной переменной является важным аспектом измерения, так как от этого зависит корректность принимаемых решений [7, 8]. Практика показывает, что точность измерения латентных переменных зависит от множества факторов. Проведенные исследования позволили установить

зависимости точности измерения латентных переменных от числа индикаторов, числа уровней, на которых варьируются индикаторы, от коррелированности индикаторов и других факторов [9–13].

Необходимо отметить, что от точности измерения латентной переменной зависит и выбор алгоритмов адаптивного тестирования [14–15].

Распространено мнение, что диапазон варьирования индикаторов должен соответствовать диапазону варьирования измеряемой латентной переменной [16]. Однако, практика показывает, что это не всегда так [17]. Это и обусловило проведение данного исследования.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для имитационного моделирования матрицы результатов тестирования использовалась диалоговая система RMD [18]. В целях удобства интерпретации результатов моделирования прием Процедура имитационного моделирования состоит в следующем. Прежде всего, вычисляется  $p_{ij}$  – вероятность правильной ответа  $i$ -го студента на  $j$ -ое задание по формуле (1). Затем на основе вычисленных вероятностей генерируются результаты тестирования:

$$x_{ij} = \text{Int}(P_{ij} - \text{Rnd} + 1), \quad (2)$$

где  $\text{Int}(Y)$  – целая часть числа  $Y$ ,  $\text{Rnd}$  – случайное число в интервале  $(0; 1)$ .

Для увеличения точности исследования имитационный эксперимент был проведен в трех кратной повторности.

Обработка данных осуществлялась в рамках теории измерения латентных переменных. Для оценки латентной переменной использовалась диалоговая система ИЛП [19, 20].

### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Фрагмент матрицы результатов тестирования для диапазона варьирования индикаторов  $[-2,0; +2,0]$  представлен в табл. 1.

Оценки и ошибки измерения латентной переменной для выше приведенного фрагмента данных (табл. 1) представлены в табл. 2.

В столбце 2 этой таблицы представлены истинные значения латентной переменной (которые использовались при моделировании), в столбце 3 – оценки латентной переменной, в столбце 4 – среднее квадратическое отклонение оценок латентной переменной. В столбце 5 показана абсолютная разность между истинным значением латентной переменной и ее оценкой.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Обобщенные результаты измерения латентной переменной представлены на рис. 1.

В верхней части рис. 1 находится гистограмма, показывающая распределение оценок измеряемых объектов, в нижней части рисунка показано распределение оценок индикаторов на той же самой шкале латентной переменной.

Исходя из представленной на этом рисунке информации, можно сделать следующие выводы:

- диапазон варьирования оценок объектов оказался несколько большим, чем использовался при моделировании  $[-4,0; +4,0]$  логит;

Таблица 1 – Фрагмент матрицы тестирования

№	Латентная переменная (логит)	Индикаторы (логит)									
		-2,00	-1,90	-1,79	-1,69	-1,59	-1,49	-1,38	-1,28	-1,18	-1,08
1	4,00	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	3,79	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	3,59	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	3,38	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	3,18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	2,97	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	2,77	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	2,56	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
9	2,36	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	2,15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1,95	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1,74	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1,54	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1,33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1,13	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0
16	0,92	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1
17	0,72	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	0,51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	0,31	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
20	0,10	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0
21	-0,10	1	0	1	1	1	0	1	1	0	1
22	-0,31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
23	-0,51	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
24	-0,72	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1
25	-0,92	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0
26	-1,13	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
27	-1,33	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0
28	-1,54	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0
29	-1,74	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0
30	-1,95	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1

Таблица 2 – Фрагмент оценок латентной переменной

№ п/п	Значение латентной переменной $\beta_i$	Оценка латентной переменной $\hat{\beta}_i$	Среднеквадратическое отклонение SE	Абсолютная ошибка $ \beta - \hat{\beta}_i $
1	4,000	3,575	0,771	0,425
2	3,795	4,125	1,050	0,331
3	3,590	4,125	1,050	0,536
4	3,385	2,820	0,579	0,565
5	3,179	3,156	0,650	0,024
6	2,974	4,125	1,050	1,151
7	2,769	4,125	1,050	1,356
8	2,564	2,820	0,579	0,255
9	2,359	2,820	0,579	0,461
10	2,154	2,062	0,473	0,092
11	1,949	1,314	0,413	0,635
12	1,744	1,857	0,452	0,113
13	1,538	0,992	0,397	0,546
14	1,333	2,062	0,473	0,729
15	1,128	0,992	0,397	0,136
16	0,923	0,546	0,382	0,377
17	0,718	1,150	0,405	0,432
18	0,513	0,403	0,379	0,110
19	0,308	0,263	0,377	0,045
20	0,103	0,263	0,377	0,160
21	-0,103	0,123	0,375	0,226
22	-0,308	0,840	0,391	1,147
23	-0,513	-0,153	0,374	0,360
24	-0,718	-0,430	0,377	0,288
25	-0,923	-1,007	0,393	0,084
26	-1,128	-0,713	0,382	0,416
27	-1,333	-1,160	0,400	0,173
28	-1,538	-1,662	0,432	0,124
29	-1,744	-2,051	0,469	0,308
30	-1,949	-2,051	0,469	0,103

Для досягнення проведення цілей дослідження нижче проводиться аналіз абсолютної помилки вимірювання латентної змінної в залежності від інтервала варіювання індикаторів. В термінах планування експеримента досліджуються наступні фактори:

- фактор А – підготовленість студентів, варіюється на 40 рівнях;
- фактор В – діапазон варіювання індикаторів, варіюється на 12 рівнях;
- блок-фактор С варіюється на трьох рівнях.

Для зручності інтерпретації впливу факторів і їх взаємодії в якості методу статистичкої обробки використовується дисперсійний аналіз. Результати дисперсійного аналізу представлені в табл. 3.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проінтерпретируем полученные результаты дисперсионного анализа.

1. Результаты дисперсионного анализа (табл. 3) свидетельствуют о том, что фактор А является статистически значимым на очень высоком уровне ( $p < 0,001$ ). Это означает, что в среднем по всем интервалам варьирования

индикаторов и повторений точность измерения латентной переменной зависит от ее значения. Соответствующие средние значения представлены в табл. 4.

Иллюстрация этого эффекта представлена на рис. 2.

Этот рисунок свидетельствует о том, что наибольшая точность измерения латентной переменной в середине исследуемого диапазона варьирования латентной переменной и наименьшая – по краям.

2. Фактор В также значим на очень высоком эмпирическом уровне значимости ( $p = 0,016$ ). Это означает то, что в среднем для всех значений латентной переменной точность измерения зависит от интервала варьирования индикаторов (рис. 3). Соответствующие средние ошибки представлены в табл. 5.

3. Необходимо отметить незначимость взаимодействия АВ ( $p = 0,169$ ). С одной стороны, это означает, что зависимость точности измерения латентной переменной в зависимости от ее значения одна и та же для всех интервалов варьирования индикаторов. С другой стороны, величина сдвига набора индикаторов одинаково влияет на точность измерения латентной переменной на всем диапазоне ее варьирования.

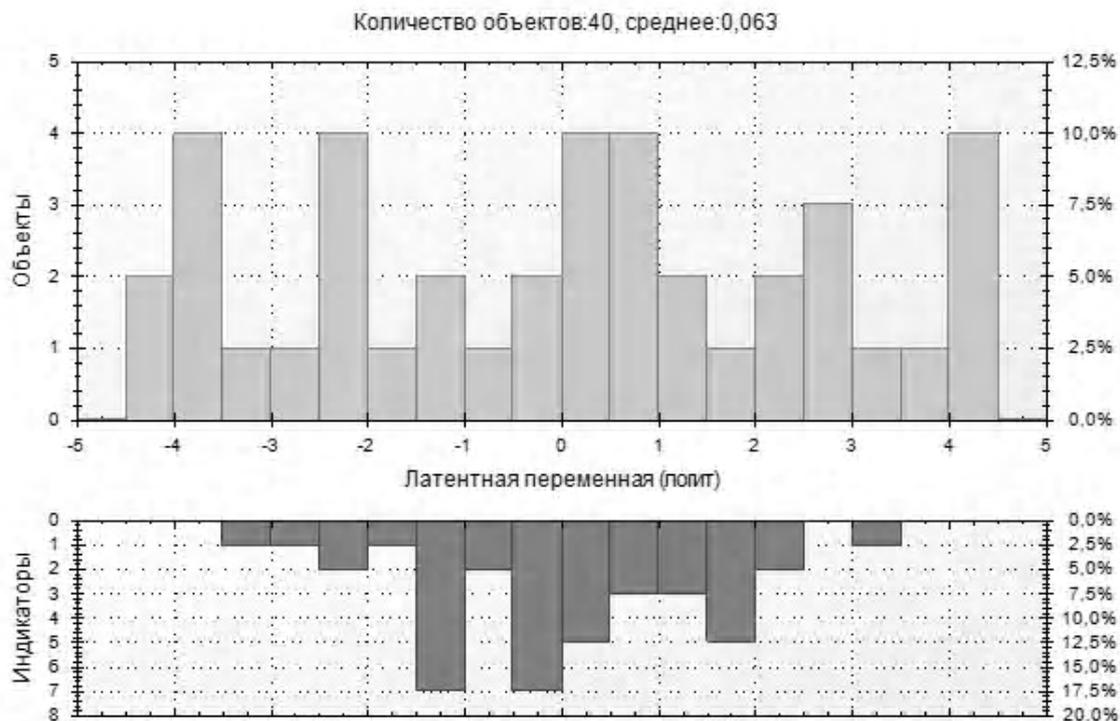


Рисунок 1 – Результаты измерения объектов и индикаторов на шкале латентной переменной

Таблица 3 – Результаты дисперсионного анализа абсолютной ошибки измерения латентной переменной

Источник дисперсии	Сумма квадратов	Степени свободы	Средний квадрат	$F_{\text{эсп}}$	$p$
Фактор А	8,692	39	0,223	2,221	<0,001
Фактор В	2,364	11	0,215	2,142	0,016
Взаимодействие АВ	43,266	429	0,101	1,005	0,472
Блок-фактор С	0,248	2	0,124	1,237	0,291
Взаимодействие АС	7,488	78	0,096	0,957	0,586
Взаимодействие ВС	2,026	22	0,092	0,918	0,571
Ошибка	86,097	858	0,100		
Всего	150,181	1439			

Таблица 4 – Ошибка измерения латентной переменной в зависимости от ее значения

№ п/п	Значение латентной переменной	Средняя ошибка (логит)	Среднеквадратическое отклонение (логит)	95% доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
1	-4,000	0,545	0,053	0,441	0,649
2	-3,795	0,558	0,053	0,455	0,662
3	-3,590	0,458	0,053	0,355	0,562
4	-3,385	0,528	0,053	0,425	0,632
5	-3,179	0,471	0,053	0,367	0,574
6	-2,974	0,455	0,053	0,352	0,559
7	-2,769	0,464	0,053	0,360	0,567
8	-2,564	0,402	0,053	0,299	0,506
9	-2,359	0,438	0,053	0,334	0,542
10	-2,154	0,431	0,053	0,327	0,535
11	-1,949	0,453	0,053	0,350	0,557
12	-1,744	0,397	0,053	0,293	0,500
13	-1,538	0,346	0,053	0,242	0,449
14	-1,333	0,380	0,053	0,276	0,484
15	-1,128	0,376	0,053	0,273	0,480
16	-0,923	0,347	0,053	0,244	0,451
17	-0,718	0,398	0,053	0,294	0,501
18	-0,513	0,310	0,053	0,207	0,414
19	-0,308	0,440	0,053	0,336	0,543
20	-0,103	0,319	0,053	0,216	0,423
21	0,103	0,352	0,053	0,248	0,455
22	0,308	0,393	0,053	0,289	0,497
23	0,513	0,389	0,053	0,286	0,493
24	0,718	0,297	0,053	0,194	0,401
25	0,923	0,379	0,053	0,276	0,483
26	1,128	0,309	0,053	0,205	0,412
27	1,333	0,315	0,053	0,212	0,419
28	1,538	0,359	0,053	0,255	0,462
29	1,744	0,344	0,053	0,240	0,447
30	1,949	0,327	0,053	0,223	0,431
31	2,154	0,329	0,053	0,225	0,432
32	2,359	0,507	0,053	0,403	0,610
33	2,564	0,409	0,053	0,305	0,513
34	2,769	0,473	0,053	0,370	0,577
35	2,974	0,398	0,053	0,294	0,501
36	3,179	0,502	0,053	0,399	0,606
37	3,385	0,458	0,053	0,354	0,561
38	3,590	0,499	0,053	0,396	0,603
39	3,795	0,560	0,053	0,456	0,663
40	4,000	0,594	0,053	0,491	0,698

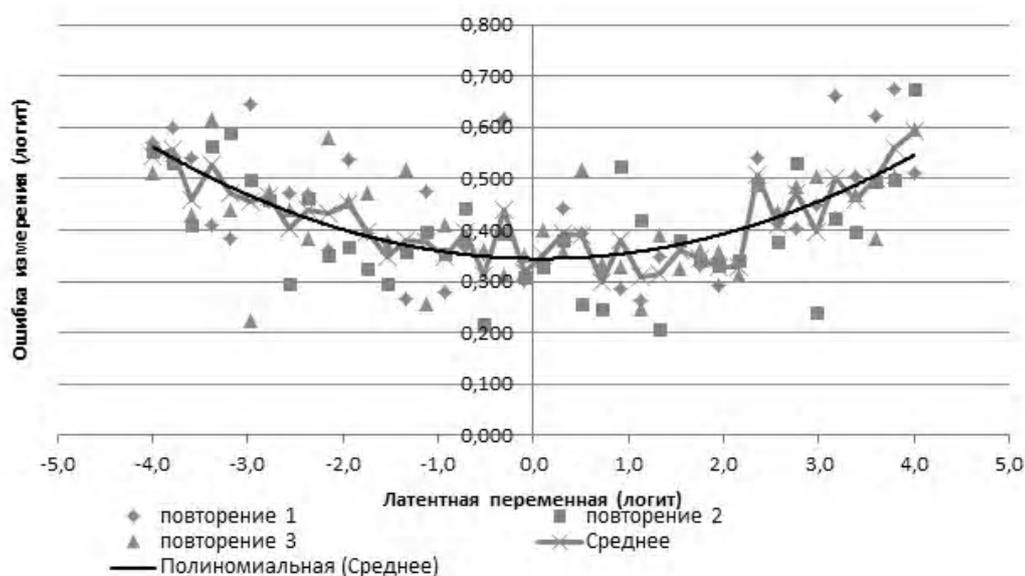


Рисунок 2 – Точность измерения латентной переменной в зависимости от ее значения

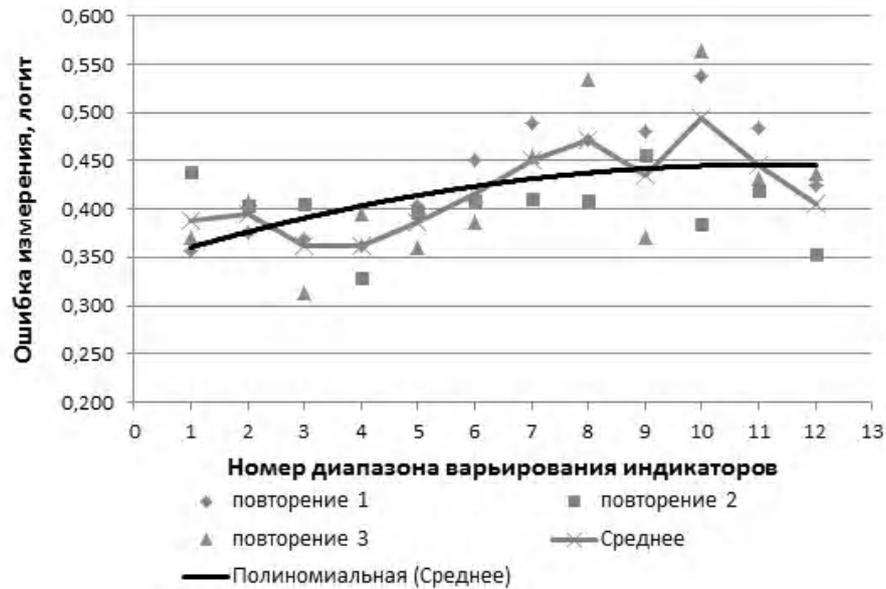


Рисунок 3 – Точность измерения латентной переменной в зависимости от диапазона варьирования набора индикаторов

Таблица 5 – Ошибка измерения латентной переменной в зависимости от диапазона варьирования индикаторов

Номер диапазона	Диапазон индикаторов	Средняя ошибка (логит)	Среднеквадратическое отклонение (логит)	95% доверительный интервал	
				Нижняя граница	Верхняя граница
1	[-0,5; +0,5]	0,388	0,029	0,332	0,445
2	[-1,0; +1,0]	0,396	0,029	0,339	0,452
3	[-1,5; +1,5]	0,362	0,029	0,306	0,419
4	[-2,0; +2,0]	0,361	0,029	0,305	0,418
5	[-2,5; +2,5]	0,387	0,029	0,330	0,443
6	[-3,0; +3,0]	0,416	0,029	0,359	0,473
7	[-3,5; +3,5]	0,452	0,029	0,395	0,508
8	[-4,0; +4,0]	0,471	0,029	0,415	0,528
9	[-4,5; +4,5]	0,435	0,029	0,378	0,492
10	[-5,0; +5,0]	0,495	0,029	0,438	0,551
11	[-5,5; +5,5]	0,445	0,029	0,388	0,502
12	[-6,0; +6,0]	0,405	0,029	0,348	0,462

## ВЫВОДЫ

1. В рамках теории латентных переменных на основе имитационного моделирования проведено исследование точности измерения латентных переменных в зависимости от диапазона варьирования индикаторов.

2. Показано, что концентрация индикаторов внутри диапазона варьирования латентной переменной в целом увеличивает точность измерения латентной переменной.

3. Точность измерения латентной переменной выше внутри диапазона варьирования, чем по краям независимо от диапазона варьирования индикаторов.

4. Полученные результаты использованы для выбора оптимального алгоритма адаптивного тестирования.

Представляет интерес расширить исследование и оценить влияние других диапазонов варьирования латентной переменной и набора индикаторов на точность измерения латентной переменной.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта проведения научных исследований № 16-06-00494 «Разработка методики оценки эффективности компьютерного адаптивного тестирования».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bond Trevor G. Applying the Rasch Model : Fundamental Measurement in the Human Sciences / Trevor G. Bond & Christine M. Fox. – Mahwah, New Jersey, 2001. – 255 p.
- Wright B. D. Making measures / B. D. Wright, M. Y. Stone. – The Phaneron Press, Chicago, 2004. – 127 p.
- Rasch Measurement in Health Sciences. Ed. Bezruczko N. JAM Press, Maple Grove, Minnesota. 2005. – 483 p.
- Маслак А. А. Теория и практика измерения латентных переменных в образовании : монография / А. А. Маслак. – М. : Издательство Юрайт, 2016. – 255 с.
- Дроздов В. И. Использование современной теории тестологии при оценке качества АПИМ / В. И. Дроздов, А. А. Маслак, Ю. М. Новиков // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2008. – № 4 (25). – С. 87–95.
- Rasch G. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests / G. Rasch. – Copenhagen, Denmark: Danish Institute for Educational Research. (Expanded edition, 1980. Chicago: University of Chicago Press), 1960. – 199 p.
- Feinberg G. The Rationale for Precision Measurements / G. Feinberg // Rasch Measurement Transactions. – 2000. – 14:3. – P. 7645.
- Linacre J. M. Estimation Methods for Rasch Measures / Ed. Smith E. V., Smith R. M. // In Introduction to Rasch Measurement. Theory, Models and Applications. – JAM Press, Maple Grove, Minnesota, 2004. – 25. – 47 p.

9. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от числа дихотомических индикаторных переменных / [Т. С. Анисимова, А. А. Маслак, С. А. Осипов и др.] // Вестник СГПИ. – 2005. – № 1. – С. 136–144.
10. Данилов А. А. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от числа градаций индикаторных переменных / А. А. Данилов, А. А. Маслак // Вестн. Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2009. – Т. 5, № 11. – С. 106–114.
11. Анисимова Т. С. Исследование точности измерения латентной переменной в зависимости от коррелированности индикаторных переменных / Т. С. Анисимова, А. А. Маслак, С. А. Поздняков // Вестник СГПИ. – 2005. – № 1 (1). – С. 126–136.
12. Алейникова А. А. Анализ точности измерения латентной переменной в зависимости от сдвига набора тестовых заданий / А. А. Алейникова, А. А. Маслак // Теория и практика измерения латентных переменных в образовании : материалы XXIV Всерос. науч.-практ. конф., (г. Славянск-на-Кубани, 28–29 апр. 2016 г.) / под ред.: А. А. Маслака, С. А. Позднякова, С. А. Осипова. – Славянск-на-Кубани : Филиал Кубанского гос. ун-та в г. Славянске-на-Кубани, 2016. – С. 7–12.
13. Поздняков С. А. Исследование точности измерения латентных переменных в образовании : монография / С. А. Поздняков. – Славянск-на-Кубани : Издательский центр СГПИ, 2007. – 118 с.
14. Leroux A. J. A Comparison of Stopping Rules for Computerized Adaptive Screening Measures Using the Rating Scale Model / A. J. Leroux, B. G. Dodd // Journal of Applied Measurement. – 2014. – Vol. 15, No. 3. – P. 213–226.
15. Riley B. R. Relative Precision, Efficiency and Construct Validity of Different Starting and Stopping Rules for a Computerized Adaptive Test / B. R. Riley, K. J. Conrad, N. Bezruczko, and M. L. Dennis // The GAIN Substance Problem Scale. Journal OF Applied Measurement. – 2007. – 8(1). – P. 48–64.
16. Аванесов В. С. Критерии качества педагогических измерений / В. С. Аванесов // Педагогические измерения. – 2012. – № 1. – С. 51–63.
17. Летова Л. В. Исследование влияния неравномерного распределения тестовых заданий в центре измерительной шкалы на стандартную ошибку измерения объектов / Л. В. Летова, А. А. Маслак, С. А. Осипов // Дистанционное и виртуальное обучение. – 2014. – № 5 (83). – С. 104–116.
18. Поздняков С. А. Свидетельство о регистрации электронного ресурса № 14115 «Генерирование наборов данных на основе модели измерения RMD\_Simulation v.2.0 (Rasch Model Data Simulation)» / С. А. Поздняков, А. А. Маслак // Объединенный фонд электронных ресурсов «Наука и образование». Дата регистрации 21 июля 2009 года.
19. Осипов С. А. Основные функции диалоговой системы «Измерение латентных переменных» / С. А. Осипов, А. А. Маслак // Теория и практика измерения и мониторинга компетенций и других латентных переменных в образовании : материалы XIX (04–05 февр. 2013 г.), XX (24–25 июня 2013 г.) Всерос. (с междунар. участием) науч.-практ. конф. – Славянск-на-Кубани : Филиал КубГУ в г. Славянске-на-Кубани, 2013. – С. 89–98.
20. Маслак А. А. Модель Раша оценки латентных переменных и ее свойства : монография / А. А. Маслак, С. И. Моисеев. – Воронежский филиал РЭУ им. Г. В. Плеханова. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. – 177 с.

Статья поступила в редакцию 09.12.2016.

После доработки 25.12.2016.

Маслак А. А.<sup>1</sup>, Моисеев С. И.<sup>2</sup>, Осипов С. О.<sup>3</sup>, Поздняков С. О.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Д-р. техн. наук, профессор, профессор кафедры математики, информатики і методики їхнього викладання, зав. лабораторією об'єктивних вимірів, Філія Кубанського державного університету в м. Слов'янськ-на-Кубані, м. Слов'янськ-на-Кубані, Росія

<sup>2</sup>Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри прикладної інформатики і математики, Інститут менеджменту, маркетингу і фінансів, м. Воронеж, Росія

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математики, информатики і методики їхнього викладання, Філія Кубанського державного університету в м. Слов'янськ-на-Кубані, м. Слов'янськ-на-Кубані, Росія

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математики, информатики і методики їхнього викладання, Філія Кубанського державного університету в м. Слов'янськ-на-Кубані, м. Слов'янськ-на-Кубані, Росія

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРУ ЛАТЕНТНОЇ ЗМІННОЇ У ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ДІАПАЗОНУ ВАРІОВАННЯ НАБОРУ ІНДИКАТОРІВ

**Актуальність.** Важливим практичним аспектом є збільшення точності вимірювання латентної змінної, оскільки від цього залежить ефективність прийнятих рішень. Одним з можливих способів збільшення точності вимірювання є вибір найкращого розташування діапазону набору індикаторів щодо латентної змінної.

**Мета.** Метою роботи є дослідження впливу розташування набору індикаторів щодо латентної змінної на точність її вимірювання. Для досягнення поставленої мети необхідно згенерувати матриці даних на основі моделі Раша; отримати оцінки латентної змінної; порівняти отримані оцінки латентної змінної з тими значеннями, які використовувалися при моделюванні.

**Метод.** З огляду на те, що модель вимірювання латентної змінної є нелінійною, аналітичне рішення ускладнене. Тому дослідження проводилося на основі імітаційного моделювання в межах теорії вимірювання латентних змінних. Дані імітаційного експерименту описувалися моделлю Раша для дихотомічних індикаторів і оброблялися в діалоговій системі «Вимірювання латентних змінних».

**Результати.** В межах теорії латентних змінних на основі імітаційного моделювання проведено дослідження точності вимірювання латентної змінної в залежності від розташування діапазону варіювання індикаторів. На основі дисперсійного аналізу показано, що зменшення діапазону індикаторів всередині діапазону варіювання латентної змінної підвищує точність її вимірювання при інших рівних умовах. Точність вимірювання латентної змінної вище в центрі діапазону її варіювання, ніж по краях незалежно від діапазону варіювання індикаторів.

**Висновки.** Запропоновано методику аналізу точності вимірювання латентної змінної в залежності від розташування діапазону індикаторів. На відміну від існуючої точки зору, що діапазон варіювання індикаторів повинен покривати діапазон варіювання латентної змінної, показано, що найбільша точність вимірювання латентної змінної досягається при варіюванні індикаторів в середині діапазону латентної змінної за інших рівних умов. Отримані результати використані для вибору оптимального алгоритму адаптивного тестування. Цікавим є розширити дослідження і оцінити вплив інших діапазонів варіювання латентної змінної і набору індикаторів на точність вимірювання.

**Ключові слова:** латентна змінна, дихотомічна модель Раша, точність вимірювання, імітаційне моделювання.

Maslak A. A.<sup>1</sup>, Moiseev S. I.<sup>2</sup>, Osipov S. A.<sup>3</sup>, Pozdnyakov S. A.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Sciences, Professor, Head of Laboratory for Objective Measurement, Chapter of Kuban State University at Slavyansk-on-Kuban, Russia

<sup>2</sup>Associate Professor of Information Technologies in Economy, PhD, Voronezh Branch of «Plekhanov Russian University of Economics», Russia

<sup>3</sup>Associate Professor of Mathematics, Informatics and Teaching Technique, PhD, Chapter of Kuban State University at Slavyansk-on-Kuban, Russia

<sup>4</sup>Associate Professor of Mathematics, Informatics and Teaching Technique, PhD, Chapter of Kuban State University at Slavyansk-on-Kuban, Russia

#### INVESTIGATION OF MEASUREMENT PRECISION OF LATENT VARIABLE DEPENDING ON THE RANGE OF VARIATION OF INDICATORS SET

**Context.** An important practical aspect of measurement of a latent variable is precision because the efficacy of accepted decisions depends on it. One of possible ways of increasing precision of measurement of latent variables is the choice of best location of a set of indicators.

**Objective.** The objective is the investigation of precision of measurement of a latent variable depending on location of a set of indicators. In order to achieve this goal it is necessary to generate matrices of data based on Rasch model, to obtain estimations of latent variable, and to compare the obtained estimations of a latent variable to those values which were used for modelling.

**Method.** Taking into account that the model of measurement of latent variable is nonlinear, the analytical decision is complicated. Therefore, research was conducted through the simulation experiment within the framework of the theory of measurement of latent variables. Data from the simulation experiment was described by Rasch model for dichotomic indicators and processed using the dialogue system «Measurement of latent variables».

**Results.** Investigation of precision of measurement of latent variable depending on location of a set of indicators was carried out within the framework of the theory of latent variables based on simulation experiment. The analysis of variance has shown that narrowing the range of indicators compared to variation of latent variable raises precision of its measurement with other things being equal. Precision of measurement of latent variable is higher at its center of variation than on the edges irrespective of range of variation of indicators.

**Conclusions.** The technique of the analysis of precision of measurement of latent variable depending on location of indicators is presented. Unlike the existing point of view, that the range of variation of indicators should cover range of variation of latent variable, it is shown that the greatest precision of measurement of latent variable is reached at location of indicators in the middle of range of latent variable with other things being equal. The obtained results are used for the choice of optimum algorithm of adaptive testing. It is of interest to expand research and to estimate influence of other ranges of variation of latent variable and location of set of indicators on precision of measurement.

**Keywords:** latent variable, Rasch dichotomic model, precision of measurement, simulation experiment.

#### REFERENCES

1. Bond Trevor G. Applying the Rasch Model : Fundamental Measurement in the Human Sciences. Trevor G. Bond & Christine M. Fox. Mahwah, New Jersey, 2001, 255 p.
2. Wright B. D., Stone M. Y. Making measures. The Phaneron Press, Chicago, 2004, 127 p.
3. Rasch Measurement in Health Sciences. Ed. Bezruczko N. JAM Press, Maple Grove, Minnesota, 2005, 483 p.
4. Maslak A. A. Teoriya i praktika izmereniya latentnykh peremennykh v obrazovanii : monografiya. Moscow, Izdatel'stvo Yurajt, 2016, 255 p.
5. Drozdov V. I., Maslak A. A., Novikov Yu. M. Ispol'zovanie sovremennoj teorii testologii pri ocenke kachestva APIM, *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta*, 2008, No. 4 (25), pp. 87–95.
6. Rasch G. Probabilistic models for some intelligence and attainment tests. Copenhagen, Denmark, Danish Institute for Educational Research. (Expanded edition, 1980. Chicago, University of Chicago Press), 1960, 199 p.
7. Feinberg, G. The Rationale for Precision Measurements. Rasch Measurement Transactions. 2000, 14:3, P. 7645.
8. Linacre J. M. Ed. Smith E. V., Smith R. M. Estimation Methods for Rasch Measures, *In Introduction to Rasch Measurement. Theory, Models and Applications*. JAM Press, Maple Grove, Minnesota, 2004, 25, 47 p.
9. Anisimova T. S., Maslak A. A., Osipov S. A., Evdokimova V. V., Ulitenko E. V. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoj peremennoj v zavisimosti ot chisla dixotomicheskix indikatornykh peremennykh, *Vestnik SGPI*, 2005, No. 1, pp. 136–144.
10. Danilov A. A., Maslak A. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoj peremennoj v zavisimosti ot chisla gradacij indikatornykh peremennykh, *Vestn. Voronezh. gos. texn. un-ta*, 2009, Vol. 5, No. 11, pp. 106–114.
11. Anisimova T. S., Maslak A. A., Pozdnyakov S. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnoj peremennoj v zavisimosti ot korrelirovannosti indikatornykh peremennykh, *Vestnik SGPI*, 2005, No. 1 (1), pp. 126–136.
12. Alejnikova A. A., Maslak A. A. pod red.: A. A. Maslaka, S. A. Pozdnyakova, S. A. Osipova Analiz tochnosti izmereniya latentnoj peremennoj v zavisimosti ot sdviga nabora testovykh zadaniy, *Teoriya i praktika izmereniya latentnykh peremennykh v obrazovanii : materialy XXIV Vseros. nauch.-prakt. konf.*, (g. Slavyansk-na-Kubani, 28–29 apr. 2016 g.). Slavyansk-na-Kubani, Filial Kubanskogo gos. un-ta v g. Slavyanske-na-Kubani, 2016, pp. 7–12.
13. Pozdnyakov S. A. Issledovanie tochnosti izmereniya latentnykh peremennykh v obrazovanii: Monografiya. Slavyansk-na-Kubani, Izdatel'skij centr SGPI, 2007, 118 p.
14. Leroux A. J., Dodd B. G. A Comparison of Stopping Rules for Computerized Adaptive Screening Measures Using the Rating Scale Model, *Journal of Applied Measurement*, 2014, Vol. 15, No. 3, pp. 213–226.
15. Riley B. R., Conrad K. J., Bezruczko N., and Dennis M. L. Relative Precision, Efficiency and Construct Validity of Different Starting and Stopping Rules for a Computerized Adaptive Test, *The GAIN Substance Problem Scale. Journal OF Applied Measurement*, 2007, 8(1), pp. 48–64.
16. Avanesov V. S. Kriterii kachestva pedagogicheskix izmerenij, *Pedagogicheskie izmereniya*, 2012, No. 1, pp. 51–63.
17. Letova L. V., Maslak A. A., Osipov S. A. Issledovanie vliyaniya neravnomernogo raspredeleniya testovykh zadaniy v centre izmeritel'noj shkaly na standartnyu oshibku izmereniya ob'ektov, *Distancionnoe i virtual'noe obuchenie*, 2014, No. 5 (83), pp. 104–116.
18. Pozdnyakov S. A., Maslak A. A. Svidetel'stvo o registracii e'lektronnogo resursa № 14115 «Generirovanie naborov dannykh na osnove modeli izmereniya RMD\_Simulation v.2.0 (Rasch Model Data Simulation)», *Ob'edinennyj fond e'lektronnykh resursov «Nauka i obrazovanie»*. Data registracii 21 iyulya 2009 goda.
19. Osipov S. A., Maslak A. A. Osnovnye funkicii dialogovoj sistemy «Izmerenie latentnykh peremennykh», *Teoriya i praktika izmereniya i monitoringa kompetencij i drugix latentnykh peremennykh v obrazovanii : materialy XIX (04–05 fevr. 2013 g.), XX (24–25 iyunya 2013 g.) Vseros. (s mezhdunar. uchastiem) nauch.-prakt. konf. Slavyansk-na-Kubani, Filial KubGU v g. Slavyanske-na-Kubani*, 2013, pp. 89–98.
20. Maslak A. A., Moiseev S. I. Model' Rasha ocenki latentnykh peremennykh i ee svoystva : monografiya, Voronezhskij filial RE'U im. G. V. Plexanova. Voronezh, Izdatel'sko-poligraficheskij centr «Nauchnaya kniga», 2016, 177 p.

# НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.93'1

Авраменко В. В.<sup>1</sup>, Шелехов И. В.<sup>2</sup>, Зарецкий Н. А.<sup>3</sup><sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных наук, Сумского государственного университета, Сумы, Украина<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета, Сумы, Украина<sup>3</sup>Студент кафедры. компьютерных наук Сумского государственного университета, Сумы, Украина

#### ОПЕРАТИВНОЕ РАСПОЗНАВАНИЕ ЭТАЛОННОГО СИГНАЛА ПРИ ЕГО ИСКАЖЕНИИ НЕЛИНЕЙНЫМ УСТРОЙСТВОМ С ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОЙ СТАТИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

**Актуальность.** Распознавание эталонных сигналов, которые подверглись нелинейным преобразованиям устройствами с неизвестными параметрами статической характеристики, является актуальным для решения многих практических задач. Кроме того, актуальным является требование, чтобы система распознавания была инвариантной по отношению к амплитуде сигнала и распознавала его оперативно.

**Цель.** Рассмотрена задача оперативного распознавания эталонного сигнала при его искажении нелинейным устройством с экспоненциальной статической характеристикой. Один из заданного множества сигналов поступает на вход нелинейного объекта. Необходимо по искаженному сигналу на его выходе распознать эталонный сигнал при условии, что характеристики нелинейности, а также амплитуда входного сигнала неизвестны. Предполагается, что сигнал не выходит за пределы нелинейного участка статической характеристики объекта.

**Метод.** Предложен метод, позволяющий решить задачу по мгновенным значениям искаженного сигнала на выходе нелинейного объекта. Он основан на использовании функции непропорциональности по значению первого порядка для числовых функций, заданных параметрически. Если между двумя функциями существует пропорциональная зависимость, то вычисленная для них функция непропорциональности по значению первого порядка равняется нулю при любом значении коэффициента пропорциональности.

Вначале выдвигается предположение о том, какой из эталонных сигналов искажается. Затем этот сигнал вместе с искаженным сигналом используется при вычислении функции непропорциональности. Если предположение правильное, то полученная непропорциональность равняется нулю. Иначе – непропорциональность ненулевая.

**Результаты.** Компьютерное моделирование работы системы распознавания осуществлялось для узкополосных эталонных сигналов. Результаты показывают, что система успешно распознает незначительно отличающиеся между собой сигналы при разных значениях параметров экспоненциальной статической характеристики нелинейного объекта.

**Выводы.** Предлагаемый метод позволяет распознавать слабые сигналы в случае, если статическая характеристика нелинейного объекта является экспоненциальной в области начала координат. При этом параметры нелинейности и амплитуда сигнала – неизвестные. Такая ситуация, например, имеет место, когда ослабленный сигнал для дистанционного управления объектом поступает на р-п переход полупроводникового устройства.

**Ключевые слова:** эталонные сигналы, распознавание сигналов, нелинейные объекты, экспоненциальная статическая характеристика, оперативное распознавание, функции непропорциональностей.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$A$  – коэффициент передачи для экспоненциальной статической функции;

$c$  – коэффициент;

$f_j(t), f'_j(t), f''_j(t)$  –  $j$ -й эталонный сигнал и его производные;

$j$  – номер эталонного сигнала:  $j = 1, 2, \dots, m$ ;

$k$  – амплитуда входного сигнала;

$m$  – количество эталонных сигналов;

$t$  – время;

$h$  – шаг изменения времени;

$T_j$  – область определения  $j$ -й функции;

$v_{11}(t), v_{21}(t), v_{31}(t)$  – функции непропорционально-

сти по значению 1-го порядка, вычисленные по функции  $f_1(t)$  на первом, втором и третьем этапах;

$v_{1j}(t), v_{2j}(t), v_{3j}(t)$  – функции непропорциональности по значению 1-го порядка, вычисленные по  $j$ -й функции на первом, втором и третьем этапах;

$w_{11}(t), w_{21}(t), w_{31}(t)$  – промежуточные функции при распознавании сигнала  $f_1(t)$ ;

$w_{1j}(t), w_{2j}(t), w_{3j}(t)$  – промежуточные функции при распознавании сигнала  $f_j(t)$ ;

$q$  – постоянная составляющая искаженного сигнала;  
 $y(t), y'(t)$  – искаженный сигнал и его производная;  
 $\alpha$  – параметр экспоненциальной статической характеристики;

$\delta_{11}(t), \delta_{21}(t)$  – разности функций на 1-м и 2-м этапах распознавания  $f_1(t)$ ;

$\varphi(t), \psi(t)$  – функции, заданные параметрически;

$@v_{\psi(t)}^{(1)}\varphi(t)$  – это value одной функции  $\varphi(t)$  по функции  $\psi(t)$ , здесь  $@$  – символ вычисления непропорциональности,  $v$  – означает, что непропорциональность по значению («value»), а в скобках указан ее порядок (первый).

$\tau_1$  – сдвиг во времени между искаженным сигналом и  $f_1(t)$ .

## ВВЕДЕНИЕ

Существует класс задач, для решения которых требуется распознавание эталонных сигналов. Необходимость в таком распознавании возникает, в частности, при дистанционном управлении объектом, если командные сигналы отличаются по форме. Так при ретрансляции радиосигналов в автоматическом режиме осуществляется их сканирование для того, чтобы распознать один из заданных звуковых образов [1]. В зависимости от обнаруженного эталонного образа вырабатываются команды для изменения режима работы ретранслятора.

В [2] распознаются акустические импульсные сигналы на фоне техногенных помех. Используются образцы сейсмоакустических импульсов и импульсов промышленных помех, а также звуковые записи процесса добычи угля. В дефектоскопии существуют характерные особенности формы сигнала в зависимости от типа дефекта [3]. Также следует упомянуть о задачах распознавания речевых сигналов.

На практике часто эталонные сигналы проходят через нелинейные элементы или устройства и искажаются. В частности, статические характеристики многих элементов, через которые проходит эталонный сигнал, квазистационарные и в начале координат нелинейные. Обычно текущие характеристики этих нелинейностей неизвестны. Это обстоятельство, а также тот факт, что текущая амплитуда сигнала на входе нелинейного объекта, как правило, также неизвестна, сильно усложняет распознавание искаженного сигнала. Поэтому разработка методов распознавания сигналов для приведенных условий является актуальной задачей.

Целью работы является решение задачи распознавания эталонного сигнала по результату его искажения

нелинейным объектом с экспоненциальной статической характеристикой, параметры которой неизвестны. Неизвестна также амплитуда сигнала, поступающего на вход объекта. Однако предполагается, что сигнал не выходит за пределы нелинейного участка статической характеристики. Такая ситуация, например, имеет место, когда ослабленный сигнал поступает на p-n переход полупроводникового устройства. Также ставится условие осуществлять распознавание оперативно, по текущим данным.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дано конечное множество функций  $f_j(t), (j = 1, 2, \dots, m)$ ,  $t \in [0, T_j]$ , описывающих эталонные сигналы.

На нелинейное устройство, статическая характеристика которого имеет вид  $A(e^{\alpha x} - 1)$ , поступает принадлежащий этому множеству сигнал  $f_1(t)$  с коэффициентом  $k$ .

В общем случае параметры нелинейности  $A, \alpha$  и коэффициент  $k$  могут неконтролируемо изменяться во времени. Будем считать, что эти изменения происходят медленно и можно считать их постоянными на интервале времени, требуемом для распознавания сигнала.

Обозначим

$$c = k.$$

Таким образом, на выходе нелинейного устройства анализируется сигнал:

$$y(t) = Ae^{cf_1(t+\tau_1)} + q, \quad (1)$$

где коэффициенты  $A, c, a$  также и  $q$  – неизвестные.

Постоянная составляющая  $q$  включает в себя не только  $A$ , но также свойственный для некоторых электронных устройств т.н. «дрейф нуля» и тоже квазистационарная.

С целью упростить изложение метода рассматривается случай, когда сдвиг во времени  $\tau_1 = 0$ .

Эталонные функции гладкие и имеют необходимые для вычислений производные. Кроме того, будем считать, что анализируемый сигнал очищен от помех.

По текущим значениям  $y(t)$  и его производных нужно распознать сигнал  $f_1(t)$ .

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Распознаванию искаженных изображений посвящено много работ, подробный обзор и классификация которых приведена в [4].

Однако все они требуют наблюдения за сигналом на определенном отрезке времени, что не позволяет реализовать оперативное распознавание.

В принципе, можно получить математическую модель нелинейного объекта и по ней восстановить входной сигнал. С этой целью можно реализовать перспективную концепцию управляемого динамического насыщения [5]. Использование функций динамического насыщения для представления модели делает более удобной нормализацию эталонного сигнала по его искажению с целью последующего распознавания.

Однако, практическая реализация этого подхода для непрерывного получения текущей математической модели не всегда может быть оправдана.

Существуют задачи, для решения которых можно использовать менее универсальные подходы, когда функции, описывающие математическую модель известны, но параметры модели вследствие квазистационарного характера нелинейности и амплитуды сигнала изменяются во времени. Так в [6] решается задача распознавания эталонного сигнала для случая, когда нелинейный участок статической характеристики объекта может быть представлен степенным рядом с неизвестными коэффициентами при слагаемых. Для этого предложен метод, основанный на использовании функций непропорциональностей [7, 8].

Однако есть объекты, у которых статическая характеристика в районе нуля экспоненциальная. Примером является вольт-амперная характеристика р-п перехода [9]. Обычно ее текущие параметры в районе нуля неизвестны. Во избежание появления нелинейных искажений при расчете полупроводниковых устройств этот участок вольтамперной характеристики рекомендуется не использовать [9]. Для подобных объектов представление нелинейности степенным рядом при решении поставленной задачи может потребовать высокой степени полинома. Поэтому в данной работе предлагается отдельный метод для рассмотренного случая.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый алгоритм основан на вычислении функций непропорциональностей по значению 1-го порядка [7, 8]. Для заданных параметрически числовых функций  $\varphi(t)$  и  $\psi(t)$  эта непропорциональность функции  $\varphi(t)$  по функции  $\psi(t)$  имеет вид:

$$\textcircled{v}_{\psi(t)}^{(1)}\varphi(t) = \varphi(t) - \psi(t) \frac{d\varphi/dt}{d\psi/dt}, \quad (2)$$

В случае, когда между функциями существует пропорциональная зависимость

$$\varphi(t) = k\psi(t), \quad (3)$$

непропорциональность (2) равняется нулю независимо от значения  $k$  в (3).

Предположим, проверяется гипотеза, что  $y(t)$  является результатом искажения сигнала  $f_1(t)$  при его прохождении через указанную нелинейность. Находим непропорциональность (2) анализируемого сигнала  $y(t)$  по  $f_1(t)$  и разность  $\delta_{11}(t)$ :

$$\begin{aligned} v_{11}(t) &= \textcircled{v}_{f_1(t)}^{(1)}y(t) = y(t) - \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}y'(t), \\ \delta_{11}(t) &= y(t) - v_{11}(t) = \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}y'(t) = cA f_1(t) e^{cf_1(t)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Эту разность возводим в квадрат и вычисляем логарифм:

$$w_{11}(t) = \ln(\delta_{11}^2(t)) = \ln(cA)^2 + \ln f_1^2(t) + 2cf_1(t). \quad (5)$$

Вычислим непропорциональность (2) функции  $w_{11}(t)$  по  $f_1(t)$  и разность  $\delta_{21}(t)$ :

$$\begin{aligned} v_{21}(t) &= \textcircled{v}_{f_1(t)}^{(1)}w_{11}(t) = w_{11}(t) - \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}w_{11}'(t), \\ \delta_{21}(t) &= w_{11}(t) - v_{21}(t) = \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}w_{11}'(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Учитывая, что

$$w_{11}'(t) = \frac{1}{f_1^2(t)} 2f_1(t)f_1'(t) + 2cf_1'(t), \quad (7)$$

подставим (7) в (6) и находим:

$$\delta_{21}(t) = 2 + 2cf_1(t).$$

Вычислим разность

$$w_{21}(t) = \delta_{21}(t) - 2 = 2cf_1(t). \quad (8)$$

Из (8) следует, что между  $w_{21}(t)$  и  $f_1(t)$  существует пропорциональная зависимость.

Вычислим непропорциональность (2) функции  $w_{21}(t)$  по  $f_1(t)$ :

$$\begin{aligned} v_{31}(t) &= \textcircled{v}_{f_1(t)}^{(1)}w_{21}(t) = w_{21}(t) - \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}w_{21}'(t) = \\ &= 2cf_1(t) - \frac{f_1(t)}{f_1'(t)}2cf_1'(t) = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Теперь для сравнения рассмотрим вариант, когда проверяется общее условие, что искажается сигнал  $f_j(t)$ . В этом случае

$$w_{2j}(t) = \delta_{2j}(t) - 2 = 2cf_1' \frac{f_j(t)}{f_j'(t)} - \frac{f_j(t)f_j''(t)}{[f_j'(t)]^2} + \frac{f_j(t)f_1''(t)}{f_j'(t)f_1'(t)}. \quad (10)$$

Если в (10) вместо  $f_j(t)$ ,  $f_j'(t)$ ,  $f_j''(t)$  подставить соответственно  $f_1(t)$ ,  $f_1'(t)$ ,  $f_1''(t)$  то получим формулу (8). Однако в отличие от (8) выражение (10) описывает связь между  $w_{2j}(t)$  и  $f_j(t)$ , которая в общем случае отличается от пропорциональной. Это обстоятельство приводит к тому, что непропорциональность

$$v_{3j}(t) = \textcircled{v}_{f_j(t)}^{(1)}w_{2j}(t) = w_{2j}(t) - \frac{f_j(t)}{f_j'(t)}w_{2j}'(t) \neq 0. \quad (11)$$

Неравенство нулю  $v_{3j}(t)$  (11) свидетельствует о том, что  $f_j(t)$  не проходит через нелинейное устройство и не входит в анализируемый сигнал  $y(t)$ .

В то же время для  $f_1(t)$  непропорциональность  $v_{31}(t)$  (8) равняется нулю. Это означает, что  $y(t)$  представляет собой результат искажения эталонного сигнала  $f_1(t)$ .

Следовательно, для каждого из эталонных сигналов  $f_j(t)$  необходимо вычислять непропорциональность (11) и сравнивать ее с нулем. В случае успешного распознавания  $v_{3j}(t)$  (11) равняется нулю.

Таким образом, по текущим значениям  $y(t)$  и его производных осуществляется распознавание эталонного сигнала из заданного множества при его искажении нелинейным устройством с экспоненциальной статической характеристикой.

После того, как сигнал распознан, при необходимости, из выражений (8), (4), (1) можно вычислить неизвестные коэффициенты  $c$  и  $A$  а также постоянную составляющую  $q$ :

$$c = \frac{w_2(t)}{2f_1(t)};$$

$$A = \frac{\delta_1(t)}{cf_1(t)e^{cf_1(t)}};$$

$$y(t) = Ae^{c \sin(\omega t + \varphi)} + q.$$

Моделирование происходило для следующих параметров экспоненциальной статической характеристики:  $\alpha = 0,25$ ,  $A = 10$ . Параметры сигнала и время – относительные по некоторым заданным максимальным значениям:  $\omega = 0,5$ ,  $\varphi = 0,25$ ,  $k = 1$ ,  $c = \alpha k = 0,25$ ,  $q = 0,5$ . Шаг изменения времени  $h = 0,0628$ . Производные вычислялись численным методом по разностям 6-го порядка [10].

Моделировалось поведение  $v_{3j}(t)$  (12) в зависимости от отклонения от сигнала, который реально искажался нелинейным устройством.

Параметры сигнала и время – относительные по некоторым заданным максимальным значениям. Конкретно отклонялась частота сигнала при постоянной фазе, а также отклонялась фаза при постоянной частоте.

Также рассмотрен еще один пример, когда исследовалась работа метода при разных значениях параметров нелинейности  $\alpha$  и  $A$  для двух эталонных сигналов:

$$f_1(t) = \sin^2(\omega t + \varphi)e^{\cos(0,25\omega t + \varphi)}, \quad (13)$$

$$f_2(t) = \sin^2(\omega t + \varphi)e^{\cos(0,5\omega t + \varphi)}. \quad (14)$$

Исследовалось поведение  $v_{3j}(t)$  (11) для  $\alpha = 0,25$ ,  $A = 10$ , а также для  $\alpha = 1$ ,  $A = 20$  при проверке правильного и неправильного предположений о том, какой из двух эталонных сигналов проходит через нелинейное устройство. При этом остальные исходные данные такие же, как в предыдущем примере.

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Для случая прохождения узкополосного сигнала (12) через нелинейное устройство получены графики значений непропорциональности  $v_{3j}(t)$  (11) для фиксированного времени  $t = 0,8792$  в зависимости от отклонения частоты от заданной при постоянном значении  $\varphi$  и отклонения начальной фазы при постоянной круговой частоте (рис. 1, 2)

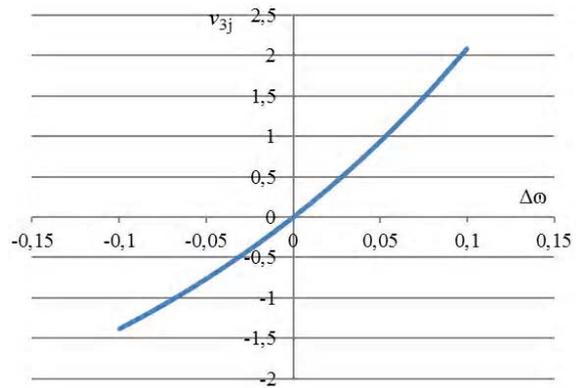


Рисунок 1 – Зависимость непропорциональности  $v_{3j}$  для фиксированного времени от отклонения частоты  $\Delta\omega$  по сравнению с эталонным сигналом

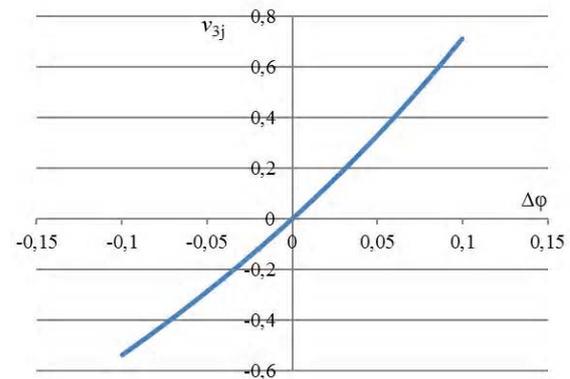


Рисунок 2 – Зависимость непропорциональности  $v_{3j}$  для фиксированного времени от отклонения фазы  $\Delta\varphi$  по сравнению с эталонным сигналом

Как видно из рисунков, только в случае, если отклонения равны нулю, т.е. если распознавание осуществляется по эталонному сигналу, который реально поступает на вход нелинейного устройства, непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) равняется нулю.

О том, как параметры нелинейности влияют на результаты распознавания, видно из следующих двух результатов моделирования.

Предположим, что через нелинейное устройство проходит  $f_1(t)$  (13) и распознавание осуществляется по этому же сигналу. В результате получена непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) равная нулю для любого значения времени. Такой же результат получен и для случая, когда параметры нелинейности другие:  $\alpha = 1$ ,  $A = 20$ .

Если же через нелинейность проходит сигнал  $f_2(t)$  (14), а проверяется гипотеза, что это  $f_1(t)$  (13), то при  $\alpha = 0,25$ ,  $A = 10$  для выбранного произвольно фиксированного времени непропорциональность  $v_3 = 0,322$ . Для  $\alpha = 1$ ,  $A = 20$  результат  $v_3 = 0,530$ .

Таким образом, если гипотеза о том, что проверяемый сигнал действительно проходит через нелинейное устройство с экспоненциальной статической характеристикой подтверждается, то непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) равняется нулю независимо от параметров этой не-

линейности. Однако, если гипотеза неверная, то  $v_{3j}(t)$  (11) ненулевая и ее значения зависят от параметров сигналов и нелинейности.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предлагаемый метод требует больших вычислительных ресурсов в случае большого количества эталонных сигналов, а также, если нужно подбирать фазовый сдвиг. Однако следует учесть, что метод легко реализуется при помощи распараллеливания вычислений. Действительно, можно параллельно решать задачу для всего заданного множества эталонных процессов и, в свою очередь, для каждого из них делать это для нескольких значений сдвига.

Метод требует отсутствия помех. В принципе, можно усилить искаженный сигнал и при наличии информации о помехе отфильтровать ее. Кроме того, на практике имеют место импульсные помехи, которые появляются и исчезают в случайные моменты времени. Если поставить условие, что в каждый момент времени имеет место какой-либо эталонный сигнал из заданного множества, то для него в момент пропадания помехи непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) будет равной нулю. Таким образом, одновременно распознается сигнал и фиксируется время отсутствия помехи. Если же текущая непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) ни для одного из эталонных сигналов не равняется нулю, это может быть не только при наличии помех, но также при переходных процессах, когда нелинейный объект или поступающий на его вход сигнал становятся нестационарными.

Если статическая характеристика в районе нуля отклоняется от экспоненциальной, непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) не будет нулевой даже для эталонного сигнала, который реально проходит через объект.

При незначительных отклонениях это будет число в районе нуля. Для больших отклонений есть смысл использовать метод, изложенный в [6].

Предлагаемый метод позволяет обнаружить эталонный сигнал, как в отдельные моменты времени, так и на отрезках некоторой длины. Поэтому окончательное решение о том, какой сигнал проходит через нелинейный объект, должна принимать система принятия решений, для которой этот метод позволяет получить исходную информацию. В одних случаях может использоваться информация о том, как часто непропорциональность  $v_{3j}(t)$  (11) равняется нулю для определенного сигнала, а в других – на какой длине отрезка времени это происходит.

## ВЫВОДЫ

Предложен метод оперативного распознавания эталонного сигнала из заданного множества по результа-

там его искажения вследствие прохождения через нелинейный объект с экспоненциальной статической характеристикой. Параметры нелинейности и амплитуда сигнала – неизвестные. Метод позволяет распознавать слабые сигналы в условиях, когда их амплитуды неизвестны и не выходят за пределы экспоненциальной статической характеристики.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы «Интеллектуальные системы управления ресурсами телекоммуникационных систем» (№ ДР 0112U001384) на базе лаборатории интеллектуальных систем кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочная система по модулям Digispot II [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http:// remine.digispot.ru/projects/digispot/wiki/WikiStart](http://remine.digispot.ru/projects/digispot/wiki/WikiStart).
2. Деглина Ю. Б. Нейросетевой алгоритм распознавания сигналов акустической эмиссии / Ю.Б. Деглина // Штучний інтелект. – 2006. – № 4. – С. 731–734. – Режим доступа: [http://iai.dn.ua/public/JournalAI\\_2006\\_4/Razdel8/13\\_Deglina.pdf](http://iai.dn.ua/public/JournalAI_2006_4/Razdel8/13_Deglina.pdf).
3. Бархатов В. А. Обнаружение сигналов и их классификация с помощью распознавания образов [Электронный ресурс] / В. А. Бархатов. – Режим доступа: [http://fpribor.ru/uploadedFiles/files/Patern\\_Recognition\\_1.pdf](http://fpribor.ru/uploadedFiles/files/Patern_Recognition_1.pdf).
4. Путьятин Е. П. Нормализация и распознавание изображений [Электронный ресурс] / Е. П. Путьятин. – Режим доступа: <http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm>.
5. Концепция управляемого динамического насыщения при моделировании многочастотных установившихся режимов микрорезонансных компонентов, структур и устройств / [С. П. Гулин, А. С. Гулин, В. П. Дмитренко, Д. М. Пиза] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 2 (23). – С. 20–31.
6. Авраменко В. В. Распознавание искаженного речевого сигнала с помощью функций непропорциональностей / В. В. Авраменко, Т. Н. Усатенко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2006. – №10(94). – С. 5–13.
7. Авраменко В. В. Характеристики непропорциональности числовых функций / В. В. Авраменко. – Деп. в ГНТБ України 19.01.98, №59 Ук98.
8. Авраменко В. В. Характеристики непропорциональностей и их применения при решении задач диагностики / В. В. Авраменко // Вестник СумГУ. – 2000. – №16. – С. 27–32.
9. Анисимов М. М. Физическая электроника [Электронный ресурс] / М. М. Анисимов. – Режим доступа: [http://tsput.ru/res/fizika/1/ANISIM\\_OV\\_2/anis\\_04.htm](http://tsput.ru/res/fizika/1/ANISIM_OV_2/anis_04.htm).
10. Мелентьев П. В. Приближенные вычисления / П. В. Мелентьев. – М. : Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 388 с.

Статья поступила в редакцию 14.12.2016.

После доработки 27.01.2017.

Авраменко В. В.<sup>1</sup>, Шелехов І. В.<sup>2</sup>, Зарецький М. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент каф. комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна

<sup>3</sup>Студент каф. комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна

## ОПЕРАТИВНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ ЕТАЛОННОГО СИГНАЛУ ПРИ ЙОГО СПОТВОРЕННІ НЕЛІНІЙНИМ ПРИСТРОЄМ З ЕКСПОНЕНЦІЙНОЮ СТАТИЧНОЮ ХАРАКТЕРИСТИКОЮ

**Актуальність.** Розпізнавання еталонних сигналів, які зазнали нелінійних спотворень пристроями з невідомими параметрами статичної характеристики, є актуальним для вирішення багатьох практичних завдань. Крім того, актуальними є вимоги до системи розпізнавання щодо її інваріантності до амплітуді сигналу і оперативності розпізнавання.

**Мета.** Розглянуто задачу оперативного розпізнавання еталонного сигналу при його спотворенні нелінійним пристроєм з експоненційною статичною характеристикою. Один із заданої множини сигналів надходить на вхід нелінійного об'єкта. Необхідно за спотвореним сигналом на його виході розпізнати еталонний сигнал за умови, що характеристики нелінійності, а також амплітуда вхідного сигналу невідомі. Передбачається, що сигнал не виходить за межі нелінійного ділянки статичної характеристики об'єкта.

**Метод.** Запропоновано метод, що дозволяє вирішити задачу за миттєвими значеннями спотвореного сигналу на виході нелінійного об'єкта. Він заснований на використанні функції непропорційності за значенням першого порядку для числових функцій, заданих параметрично. Якщо між двома функціями існує пропорційна залежність, то обчислена для них функція непропорційності за значенням першого порядку дорівнює нулю при будь-якому значенні коефіцієнта пропорційності.

Спочатку висувається припущення про те, який з еталонних сигналів спотворюється. Потім цей сигнал разом зі спотвореним сигналом використовується при обчисленні функції непропорційності. Якщо припущення правильне, то отримана непропорційність дорівнює нулю. Інакше – непропорційність ненульова.

**Результати.** Комп'ютерне моделювання роботи системи розпізнавання здійснювалося для вузькосмугових еталонних сигналів. Результати показують, що система успішно розпізнає сигнали, що незначно відрізняються між собою, при різних значеннях параметрів експоненційної статичної характеристики нелінійного об'єкта.

**Висновки.** Запропонований метод дозволяє розпізнавати слабкі сигнали в разі, якщо статична характеристика нелінійного об'єкта є експоненційною в області початку координат. При цьому параметри нелінійності і амплітуда сигналу – невідомі. Така ситуація, наприклад, має місце, коли ослаблений сигнал для дистанційного керування об'єктом надходить на р-п перехід напівпровідникового пристрою.

**Ключові слова:** еталонні сигнали, розпізнавання сигналів, нелінійні об'єкти, експоненційна статична характеристика, оперативне розпізнавання, функції непропорційності.

Avramenko V. V.<sup>1</sup>, Shelehov I. V.<sup>2</sup>, Zaretsky M. O.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of Department of Computer Science, Sumy State University, Sumy, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor of Department of Computer Science, Sumy State University, Sumy, Ukraine

<sup>3</sup>Student of Department of Computer Science, Sumy State University, Sumy, Ukraine

#### **RAPID RECOGNITION OF REFERENCE SIGNAL DURING ITS DISTORTION BY NONLINEAR OBJECTS WITH EXPONENTIAL STATIC CHARACTERISTIC**

**Context.** Recognition of etalon signals distorted by device with unknown parameters of static characteristics is actual task for many practical problems. Moreover, addition system requirements for invariance to signal amplitude and for operativeness of recognition are relevant.

**Objective.** The problem of operative recognition of etalon signal distorted by nonlinear device with exponential static characteristic is considered. A signal from given set of etalons come into input of a nonlinear object. It is necessary for the distorted signal at the output of the object recognized etalon on condition that characteristics of the non-linearity and amplitude of the input signal are unknown. It is assumed that the signal does not exceed the static nonlinear characteristics of the object area.

**Method.** A method to solve the problem on the instantaneous values of the distorted signal at the output of the non-linear object is proposed. It is based on the use of disproportionate function value of the first order for numeric functions defined parametrically. If the two functions there is a proportional relationship, is calculated for these function disproportionate value of the first order is equal to zero for any value of the coefficient of proportionality. If the two functions have a proportional relationship, so disproportionate function is zero for any value of the coefficient of proportionality.

Initially, hypothesis about the etalon signal of distorted signal is promoted. Then, both signals use for calculating disproportion function. Finally, if the hypothesis is confirmed, then disproportionate of etalon signal turns into zero, else the disproportionate is nonzero.

**Results.** Computer modeling of recognition system for narrowband reference signals is performed. The results show that the system successfully detects slightly differ signals at different exponential characteristics parameters of nonlinear static object.

**Conclusions.** The method can be used to recognition of weak etalon signals distorted by nonlinear object with static exponential characteristic an origin of coordinates under conditions where the parameters of nonlinearity and signal amplitude are unknown. In practice, these conditions are typical for remote control system when weakened or distorted control signals arrive at the input of p-n junction semiconductor of receiving device.

**Keywords:** reference signals, recognition signals, nonlinear objects, exponential static characteristic, rapid recognition, functions of disproportionality.

#### **REFERENCES**

1. Spravochnaya sistema po modulyam Digispot II [Elektronnyy resurs]. Access mode: <http://remine.digispot.ru/projects/digispot/wiki/WikiStart>.
2. Deglina Yu. B. Neurosetevoy algoritm raspoznavaniya signalov akusticheskoy emissii, *Shtuchniy intelekt*, 2006, No. 4, pp. 731–734. Access mode: [http://iai.dn.ua/public/JournalAI\\_2006\\_4/Razdel8/13\\_Deglina.pdf](http://iai.dn.ua/public/JournalAI_2006_4/Razdel8/13_Deglina.pdf).
3. Barhatov V.A. Obnaruzhenie signalov i ih klassifikatsiya s pomoschiu raspoznavaniya obrazov [Tekst], *ITs Fizpribor*. Access mode: [http://fizpribor.ru/uploadedFiles/files/Pattern\\_Recognition\\_1.pdf](http://fizpribor.ru/uploadedFiles/files/Pattern_Recognition_1.pdf).
4. Putyatin E. P. Normalizatsiya i raspoznavanie izobrazheniy, Access mode: <http://sumschool.sumdu.edu.ua/is-02/rus/lectures/pytyatin/pytyatin.htm>.
5. Gulin S. P., Gulin A. S., Dmitrenko V. P., Piza D. M. Konceptsiya upravlyayemogo dinamicheskogo nasyscheniya pri modelirovaniimnogochastotnyh ustanovivshisya rezhimov mikroelektronnyh komponentov, struktur i ustroystv, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2010, No. 2 (23), pp. 20–31.
6. Avramenko V. V., Usatenko T. N. Raspoznavanie iskazhennogo rechevogo signala s pomoschiu funktsiy neproporcional'nostey, *Visnik Sums'kogo derzhavnogo universitetu. Seriya Tehnichni nauki*, 2006, No. 10 (94), pp. 5–13.
7. Avramenko V. V. Harakteristiki neproporcional'nosti chislovyh funktsiy. Dep. v GNTB Ukrainy 19.01.98, №59 Uk98.
8. Avramenko V. V. Harakteristiki neproporcional'nostey i ih primeneniya pri reshenii zadach diagnostiki, *Vestnik SumGU*, 2000, No. 16, pp. 27–32.
9. Anisimov M. M. Fizicheskaya elektronika, ch. 2. Access mode: [http://tsput.ru/res/fizika/1/ANISIM\\_OV\\_2/anis\\_04.htm](http://tsput.ru/res/fizika/1/ANISIM_OV_2/anis_04.htm).
10. Melentiev P. V. Priblizhennyye vychisleniya. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury, 1962, 388 p.

Субботин С. А.<sup>1</sup>, Благодарев А. Ю.<sup>2</sup>, Гофман Е. А.<sup>3</sup><sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина<sup>2</sup>Аспирант кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина<sup>3</sup>Канд. техн. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской части Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

## СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ С ХЭШИРУЮЩИМ ПРЕОБРАЗОВАНИЕМ В ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ И ПАРАЛЛЕЛЬНОМ РЕЖИМАХ

**Актуальность.** Решена актуальная задача повышения скорости построения нейро-нечетких моделей по прецедентам.

**Цель работы** – создание метода синтеза нейро-нечетких сетей, обладающего высокой скоростью вычислений и позволяющего реализовать синтез нейро-нечетких сетей в параллельном режиме.

**Метод.** Предложен метод построения нейро-нечетких моделей по прецедентам, который осуществляет сокращение размерности входных данных посредством хэширующего отображения на одномерную ось с сохранением локальной топологии кластеров в признаковом пространстве, оценивает значимость признаков и экземпляров на основе выделенных кластеров, а также формирует разбиение исходного признакового пространства в автоматическом режиме, синтезирует структуру и настраивает параметры нейро-нечеткой модели автоматически, исключая из процесса обучения нейро-нечеткой модели малоинформативные данные, упрощая тем самым структуру получаемых моделей, а также позволяет наиболее вычислительно трудоемкие операции выполнять в параллельном режиме, что позволяет автоматизировать процесс синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам, а также повысить скорость построения нейро-нечетких моделей как при последовательной, так и при параллельной реализации вычислений.

**Результаты.** Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, которое использовано при проведении вычислительных экспериментов по исследованию свойств метода.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода и реализующего его программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач диагностирования и автоматической классификации по признакам.

**Ключевые слова:** нейро-нечеткая сеть, хэш, обучение, синтез, кластер-анализ, диагностика, распознавание.

### НОМЕНКЛАТУРА

ЭВМ – электронная вычислительная машина;  
 $\varepsilon$  – максимально допустимая ошибка модели;  
 $\varepsilon_j$  – максимально допустимая погрешность представления значений  $j$ -го признака;  
 $\mu_{j,l}$  – функция принадлежности к  $l$ -му терму  $i$ -го признака;  
 $\mu_l$  – функция принадлежности к области  $l$ -го кластера;  
 $\mu^k$  – функция принадлежности  $k$ -го класса;  
 $b, c$  – параметры функции принадлежности;  
 $C^q$  – эталон (центр)  $q$ -го кластера;  
 $C_j^q$  – координата по  $j$ -му признаку эталона  $q$ -го кластера;  
 $E$  – ошибка модели;  
 $f$  – критерий качества модели;  
 $F()$  – структура нейромодели;  
 $G$  – номер наибольшего разряда в разрядной сетке ЭВМ;  
 $i, j$  – номера признаков;  
 $K$  – число классов;  
 $L_j$  – число квантований значений  $j$ -го признака;  
 $l_j^q$  – координата левой границы проекции  $q$ -го кластера на оси  $j$ -го признака;  
 $N$  – число входных признаков;  
 $N'$  – число входных признаков после отбора признаков;  
 $N_C(q, p)$  – число экземпляров  $q$ -го класса в точке  $p$ ;  
 $N_C(p)$  – число коллизий для точки (разряда)  $p$  при отсечении всех меньших разрядов;

$N_{pr}$  – число параллельных вычислительных модулей, использовавшихся при построении модели;  
 $opt$  – условное обозначение оптимума;  
 $p$  – точка;  
 $p^*$  – точка, соответствующая максимальному разряду хэша, для которой уровень ошибки является приемлемым;  
 $R(a, b)$  – расстояние между точками  $a$  и  $b$  в пространстве признаков;  
 $r_j^q$  – координата правой границы проекции  $q$ -го кластера на оси  $j$ -го признака;  
 $S$  – объем выборки;  
 $S^*$  – объем редуцированной выборки;  
 $t$  – время, затраченное на построение нейро-нечеткой модели;  
 $t_{cp}$  – среднее затрат времени на построение модели;  
 $w$  – параметры нейромодели;  
 $x$  – набор входных векторов прецедентов;  
 $x_*$  – хэш-признак;  
 $X$  – набор прецедентов;  
 $x_j$  –  $j$ -й входной признак;  
 $x^s$  – набор входных признаков  $s$ -го прецедента;  
 $x_j^s$  – значение  $j$ -го входного  $s$ -го прецедента;  
 $y$  – выходной признак;  
 $x_j^{\min}, x_j^{\max}$  – минимальное и максимальное значения признака  $x_j$ ;  
 $y^s$  – значение выходного признака для  $s$ -го прецедента.

## ВВЕДЕНИЕ

Нейро-нечеткие сети [1–3] являются широко используемым на практике инструментом вычислительного интеллекта, позволяющим строить модели зависимостей по прецедентам в условиях неполной, недостоверной, противоречивой, неточной информации о моделируемой зависимости.

Важными свойствами нейро-нечетких сетей являются их способность извлекать знания из данных в процессе обучения по прецедентам – наблюдениям, точечным реализациям моделируемой зависимости, а также интерпретируемость получаемых моделей [1]. Эти свойства имеют чрезвычайно важное значение в задачах технического и биомедицинского диагностирования, где, с одной стороны, отсутствует или является недостаточным экспертное знание и требуется строить модель на основе наблюдений, а, с другой стороны, необходимо иметь возможность не только принять решение на основе модели, но и понимать процесс принятия решения, то есть обладать интерпретируемой моделью [4].

Еще одним чрезвычайно важным свойством нейро-нечетких сетей является присущий им массивный параллелизм вычислений [5]. Построенная и обученная аппроксимация зависимости нейро-нечеткая сеть имеет параллельную архитектуру и легко реализуется как в последовательном, так и параллельном режимах вычислений. Поскольку задачи диагностирования во многих практических приложениях предполагают обработку данных, характеризующихся большой размерностью, параллелизм вычислений, имеющийся у нейро-нечетких моделей, способен обеспечить необходимую скорость обработки данных и принятия решений для систем реального времени.

Однако следует отметить, что большинство известных методов синтеза и обучения нейро-нечетких сетей [1–3, 6–9] характеризуются значительными затратами времени на построение моделей и являются последовательными.

Целью данной работы являлось создание метода синтеза нейро-нечетких сетей, обладающего высокой скоростью вычислений и позволяющего реализовать синтез нейро-нечетких сетей в параллельном режиме.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем исходную выборку  $X = \langle x, y \rangle$  – набор  $S$  прецедентов о зависимости  $y(x)$ ,  $x = \{x^s\}$ ,  $y = \{y^s\}$ ,  $s = 1, 2, \dots, S$ , характеризующихся набором  $N$  входных признаков  $\{x_j\}$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , и выходным признаком  $y$ . Каждый  $s$ -й прецедент представим как  $\langle x^s, y^s \rangle$ ,  $x^s = \{x_j^s\}$ ,  $y^s \in \{1, 2, \dots, K\}$ ,  $K > 1$ .

Тогда задача синтеза нейромодели зависимости  $y(x)$  будет заключаться в определении такой структуры  $F()$  и значений параметров  $w$  нейромодели, при которых будет удовлетворен критерий качества модели  $f(F(), w, \langle x, y \rangle) \rightarrow \text{ort}$  [4, 5]. Обычно критерий качества обучения нейромодели определяют как функцию ошибки модели:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^S (y^s - F(w, x^s))^2 \rightarrow \min.$$

Для задач с дискретным выходом ошибку обученной сети можно характеризовать также формулой:

$$E = \frac{100\%}{S} \sum_{s=1}^S |y^s - F(w, x^s)| \rightarrow \min.$$

## 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В настоящее время предложено достаточно много различных архитектур и методов синтеза нейро-нечетких систем [1–3, 5–9]. Однако наиболее удобными для решения задач диагностирования и распознавания образов являются интегрированные нейро-нечеткие системы, представляющие собой прямонаправленные нейронные сети без обратных связей, которые по структуре и функционированию соответствуют системе нечеткого вывода, но при этом могут обучаться как нейронные сети [1, 2].

Наиболее частым подходом к построению интегрированных нейро-нечетких моделей является задание пользователем набора нечетких термов переменных и правил принятия решений, которых отображаются в структуру сети [2]. При этом в процессе обучения, осуществляемого на основе градиентных методов [3, 5] или методов интеллектуального стохастического поиска [10], выполняется настройка параметров термов и весов правил по набору имеющихся наблюдений за моделируемой зависимостью. Достоинствами данного подхода являются его относительная простота, а также интеграция эмпирических наблюдений и человеческих знаний. Недостатком данного подхода является его субъективность, зависимость от человека-эксперта, а также возможная неоптимальность получаемых моделей вследствие избыточности или неполноты выделенных экспертом правил и сформированных термов.

Другим частым подходом к построению интегрированных нейро-нечетких моделей является выполнение кластер-анализа набора прецедентов [1, 2, 11, 12], в результате которого в исходном пространстве признаков выделяются компактные области-кластеры, по центрам которых формируются правила, а также задаются нечеткие термы признаков как проекции кластеров на оси признаков [1]. Достоинством данного подхода является его меньшая зависимость от человека, чем у первого подхода. Недостатками данного подхода являются необходимость задания человеком числа кластеров или параметров методов кластеризации, высокая итеративность кластер-анализа и низкая скорость работы для признаковых пространств большой размерности и выборок данных большого объема.

Для преодоления недостатков рассмотренных выше подходов к построению нейро-нечетких моделей необходимо разработать методы, позволяющие более быстро синтезировать нейро-нечеткие модели, обеспечивая при этом высокий уровень автоматизации путем сокращения вовлечения человека-эксперта в процесс построения модели.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Поскольку скорость процесса синтеза нейро-нечетких моделей сильно зависит от размерности входа пред-

ставляється цілесобразним скоротити розмірність даних в процесі побудови моделей, забезпечивши при цьому збереження локальних властивостей розташування кластерів в просторі ознак. Для цього пропонується використовувати хешуючі перетворення [13–17].

В результаті хешуючого перетворення вихідні дані з  $N$ -вимірного простору відображаються в одновимірне, що для великих  $N$  суттєво прискорює виділення кластерів в одновимірному просторі порівняно з реалізацією кластер-аналізу в вихідному  $N$ -вимірному просторі. Виділені одновимірні кластери можна використовувати для оцінки важливості екземплярів і ознак. Це дозволяє виключити з процесу навчання малоінформативні дані, а, відповідно, суттєво прискорити процес навчання і також спростити структуру отримуваних моделей [16].

Поскольку при великому об'ємі даних і великій розмірності вхідного простору вимагається виконати значительное число операцій обробки даних при побудові нейро-нечетких моделей, представляється цілесобразним виділити найбільш вичислительно трудоемкие етапы и распараллелить их. Это позволит при использовании параллельных вычислений существенно ускорить процесс построения модели.

Рассмотрим последовательный метод построения нейро-нечетких моделей с хешующим преобразованием.

Етап ініціалізації. Для кожного признака  $x_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, N$ , определити його мінімальне  $x_j^{\min}$  і максимальне  $x_j^{\max}$  значення в вибірці  $\langle x, y \rangle$ , а також для кожного  $j$ -го признака задати максимально допустимую погрешность представления значений  $\varepsilon_j$ .

Значення  $\varepsilon_j$  також можна оцінити розрахунковим шляхом:

$$\varepsilon_j = \min_{\substack{s=1,2,\dots,S; \\ p=s+1,\dots,S}} \left\{ |x_j^s - x_j^p| \mid x_j^s \neq x_j^p \right\}.$$

Затем определить число квантований значений  $j$ -го признака:

$$L_j = \frac{x_j^{\max} - x_j^{\min}}{\varepsilon_j}, j = 1, 2, \dots, N.$$

Етап хешуючого перетворення. Для кожного екземпляра  $\langle x^s, y^s \rangle$  вибірки  $\langle x, y \rangle$  определити його хеш  $x^s$ , використовуючи одне з перетворень [13–17].

Упорядочити екземпляри  $\langle x^s, y^s \rangle$  по возрастанию хэша  $x^s$ .

Двигаясь от меньших разрядов хэша к большим,  $p = 0, 1, 2, \dots, G$ , где  $G$  – номер наибольшего разряда в разрядной сетке ЭВМ:

– найти число коллизий для каждой точки (разряда) при отсечении всех меньших разрядов:

$$N_C(p) = \sum_{q=1}^K N_C(q, p) - \max_{q=1,2,\dots,K} \{N_C(q, p)\},$$

где  $N_C(q, p)$  – число экземпляров  $q$ -го класса в точке  $p$ , определяемое по формуле:

$$N_C(q, p) = \sum_{s=1}^S \{1 \mid 2^p(1 + x^s \operatorname{div} 2^p) > x^s \geq 2^p(x^s \operatorname{div} 2^p), y^s = q\};$$

– найти точку, соответствующую максимальному разряду хэша, для которой уровень ошибки является приемлемым:

$$p^* = \max_{p=0,1,\dots,G} \{N_C(p) \mid N_C(p) \leq E\}.$$

Етап редукції ознак. Обрезать хэши всех экземпляров до найденной точки  $p^*$ :

$$x_*^s = x^s \operatorname{div} 2^{p^*}, s = 1, 2, \dots, S.$$

Исключить из исходного набора признаков  $x$  те, которые соответствуют обрезанным частям хэшей. Скорректировать соответствующим образом число признаков  $N$ .

Етап редукції екземплярів. Из каждой группы одинаковых по хэшу экземпляров с одинаковым номером класса оставить только один экземпляр:

$$\langle x_*, y \rangle = \{ \langle x_*, y \rangle \mid \exists p \neq s : x_*^p = x_*^s, y^p = y^s \},$$

после чего определить новое значение числа экземпляров в выборке хэшей  $S^*$ .

Етап формування чіткого розбиття редуцированного вихідного простору ознак. Перетворити виділені хэши в області в вихідному просторі ознак, описуючи їх координатами центра  $C^q = \{C_j^q\}$  или координатами границ  $\{ \langle l_j^q, r_j^q \rangle \}$  по каждому  $j$ -му признаку. Если такое преобразование является вычислительно затратным, то начиная с этапа хешующего преобразования необходимо для каждого хэша запоминать номер экземпляра в исходном пространстве признаков, которому он соответствует. Тогда для заданного хэша можно определить номер экземпляра в исходном пространстве признаков, который и рассматривать как координаты эталона кластера  $C^q$ . Имея набор эталонов  $\{C^q\}$  координаты границ  $q$ -го кластера можно определить как

$$l_j^q = \frac{C_j^q + C_j^p}{2}, p = \arg \min_{\substack{p=1,2,\dots,S^* \\ p \neq q}} \{R(C_j^p, C_j^q) \mid C_j^p \leq C_j^q\};$$

$$r_j^q = \frac{C_j^q + C_j^p}{2}, p = \arg \min_{\substack{p=1,2,\dots,S^* \\ p \neq q}} \{R(C_j^p, C_j^q) \mid C_j^p \geq C_j^q\},$$

$$q = 1, 2, \dots, S^*, j = 1, 2, \dots, N,$$

$$\text{где } R(C^p, C^q) = \sum_{j=1}^N (C_j^p - C_j^q)^2.$$

Етап формування нечіткого розбиття редуцированного вихідного простору ознак. Сформуємо  $\mu_{j,l}(x^s)$  – функції приналежності к  $l$ -му терму  $i$ -го признака по формуле:

$$\mu_{j,l}(x^s) = e^{-\frac{(x_j^s - b_{j,l})^2}{2c_{j,l}}}.$$

Определим для каждой из областей хэшей (псевдо-кластеров) функцию принадлежности

$$\mu_l(x^s) = \min_{j=1,2,\dots,N} \{ \mu_{j,l}(x^s) \}.$$

Затем возможно определить функцию принадлежности для каждого из классов:

$$\mu^k(x^s) = \max_{l=1,2,\dots,S^*} \{\mu_l(x^s) | x_*^l \in k\}.$$

Этап структурно-параметрического синтеза нейро-нечеткой модели. Структуру нейро-нечеткой модели предлагается задать на основе классификатора Мамдани [1, 2, 8] – пятислойной нейро-нечеткой сети, изображенной на рис. 1.

На входы сети (первый слой) поступают значения признаков  $\{x_j\}$ , характеризующих распознаваемый экземпляр  $\{x^s\}$ . Узлы второго слоя сети определяют принадлежности экземпляра к нечетким термам признаков  $\{\mu_{j,l}(x^s)\}$ . Узлы третьего слоя определяют принадлежности для каждой из областей хэшей (псевдокластеров)  $\{\mu_l(x^s)\}$ . Узлы четвертого слоя определяют принадлежности для каждого из классов  $\{\mu^k(x^s)\}$ . Единственный узел выходного – пятого слоя определяет четкий номер класса, сопоставляемый распознаваемому экземпляру. Связи между узлами сети формируем на основе правил, в качестве которых можно рассматривать сформированные редуцированные хэши, восстановленные в исходном пространстве признаков:  $\langle x_*^s, x^s, y^s \rangle \Rightarrow x^s \rightarrow y^s$ .

Начальные значения параметров функций принадлежности к термам (параметры блоков второго слоя сети) определим по формулам:

$$b_{j,l} = C_j^l, c_{j,l}^2 = -\frac{(r_j^l - b_{j,l})^2}{2\sqrt{\ln 0,5}}.$$

После задания структуры и начальных значений параметров сети обучим нейро-нечеткую сеть на основе метода эволюционного поиска [10] либо метода обратного распространения ошибки [1].

Схема предложенного метода при последовательной реализации вычислений изображена на рис. 2.

Для ускорения расчетов на основе предложенного метода представляется целесообразным распараллелить вычисления.

На этапе инициализации возможно распараллелить определение минимальных и максимальных значений признаков, определение расстояний между экземплярами по признакам, определение  $\varepsilon_j$  и  $L_j$ .

На этапе хэширующего преобразования хэши экземпляров возможно определять в параллельном режиме. Упорядочивание экземпляров также возможно распараллелить. В параллельном режиме также возможно найти число коллизий для каждой точки (разряда) при отсечении всех меньших разрядов.

На этапе редукции признаков распараллеливанию подлежит обрезка хэшей всех экземпляров до найденной точки  $p^*$ .

На этапе редукции экземпляров распараллеливанию подлежит выделение групп одинаковых хэшей и отбор по одному экземпляру из каждой группы.

На этапе формирования четкого разбиения исходного пространства признаков распараллеливанию подлежит преобразование хэшей в области в исходном пространстве признаков, расчет  $\{C^q = \{C_j^q\}\}$  и  $\langle l_p, r_p \rangle$ .

На этапе формирования нечеткого разбиения исходного пространства признаков возможно в параллельном режиме задать  $\{\mu_{j,l}(x^s)\}$ ,  $\{\mu_l(x^s)\}$  и  $\{\mu^k(x^s)\}$ .

На этапе структурно-параметрического синтеза нейро-нечеткой модели в параллельном режиме можно определить связи между узлами сети, а также начальные значения параметров функций принадлежности к термам. Также возможно в параллельном режиме осуществить обучение нейро-нечеткой модели.

Схема параллельной реализации вычислений этапов предложенного метода изображена на рис. 3.

Как видно из рис. 3, большинство вычислений метода являются параллельными и предполагают расчет одно-

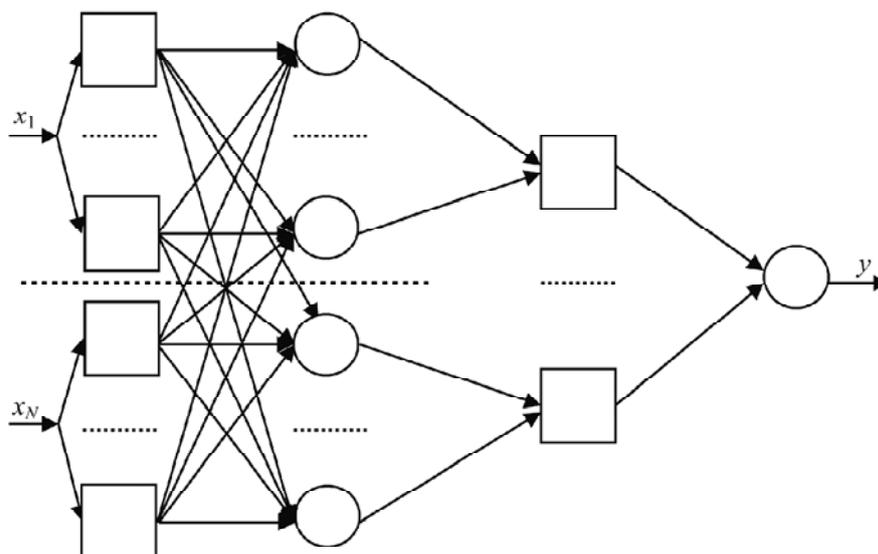


Рисунок 1 – Схема классификатора Мамдани

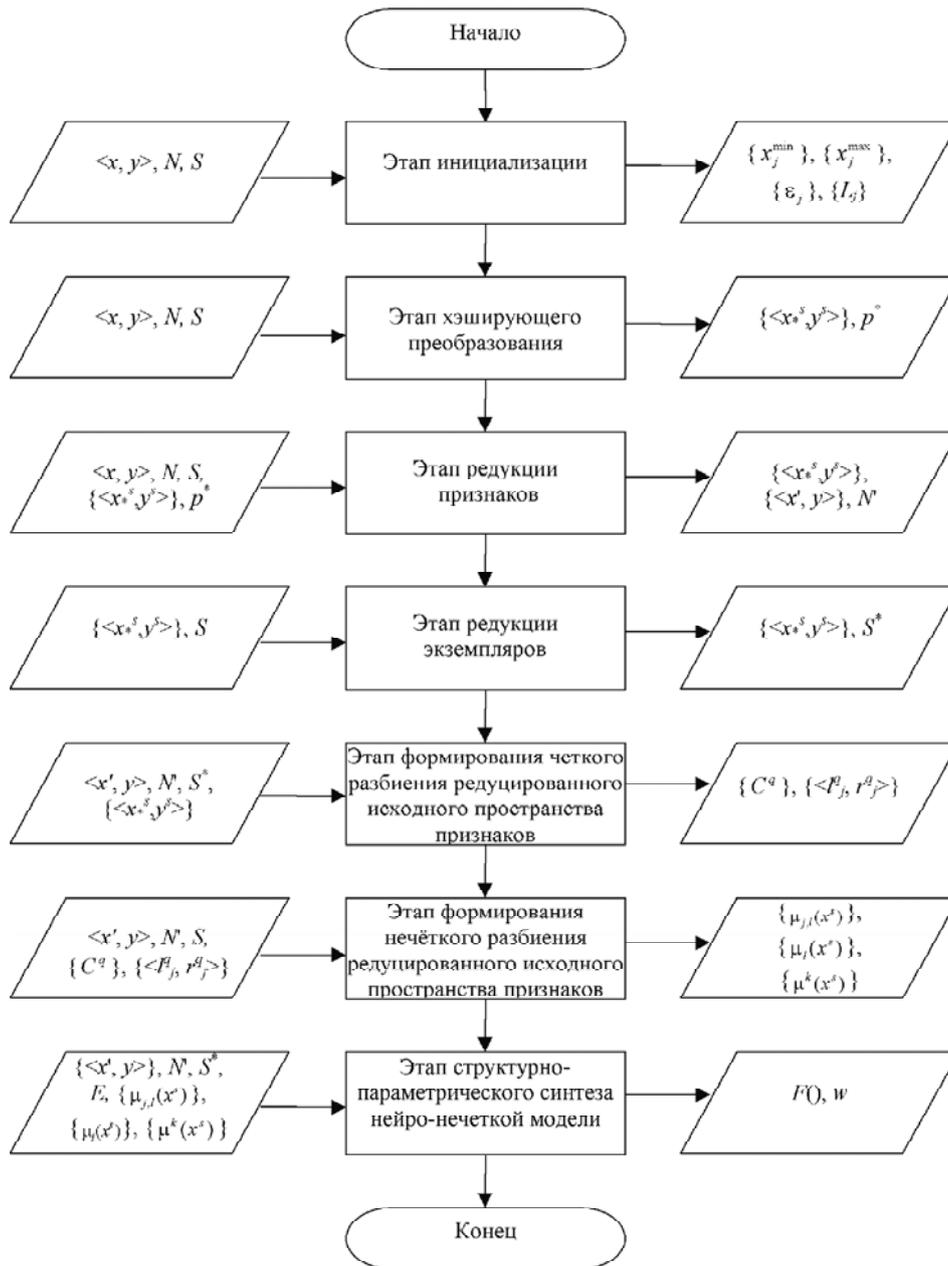


Рисунок 2 – Схема последовательной реализации вычислений

типных величин. Следовательно, предложенный метод обладает массиванным параллелизмом вычислений.

Предложенный метод позволяет решать задачи сокращения размерности выборки данных (отбор информативных признаков и экземпляров, конструирование), кластеризации данных, построения нейро-нечетких моделей по прецедентам.

Также промежуточные результаты, получаемые в процессе выполнения метода, могут быть использованы для оценивания сложности выборок данных. В качестве такой оценки может выступать номер максимального разряда (точки коллизий), дающего приемлемую точность.

Другим вариантом оценивания сложности выборок может служить минимальное число бит для приемлемого по точности хэша выборки. Чем больше требуется

бит для формирования хэша, обеспечивающего приемлемую точность, тем более сложной является выборка данных для заданного хэширующего преобразования.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования практической применимости предложенного метода он был программно реализован и экспериментально изучен при решении задач построения нейро-нечетких моделей по прецедентам.

Программа, реализующая предложенный метод, позволяет задавать число вычислительных модулей (ядер, процессоров или ЭВМ), работающих в параллельном режиме, из доступных в вычислительной системе.

В табл. 1 приведены характеристики выборок для практических задач [4], использовавшихся при проведении экспериментов.

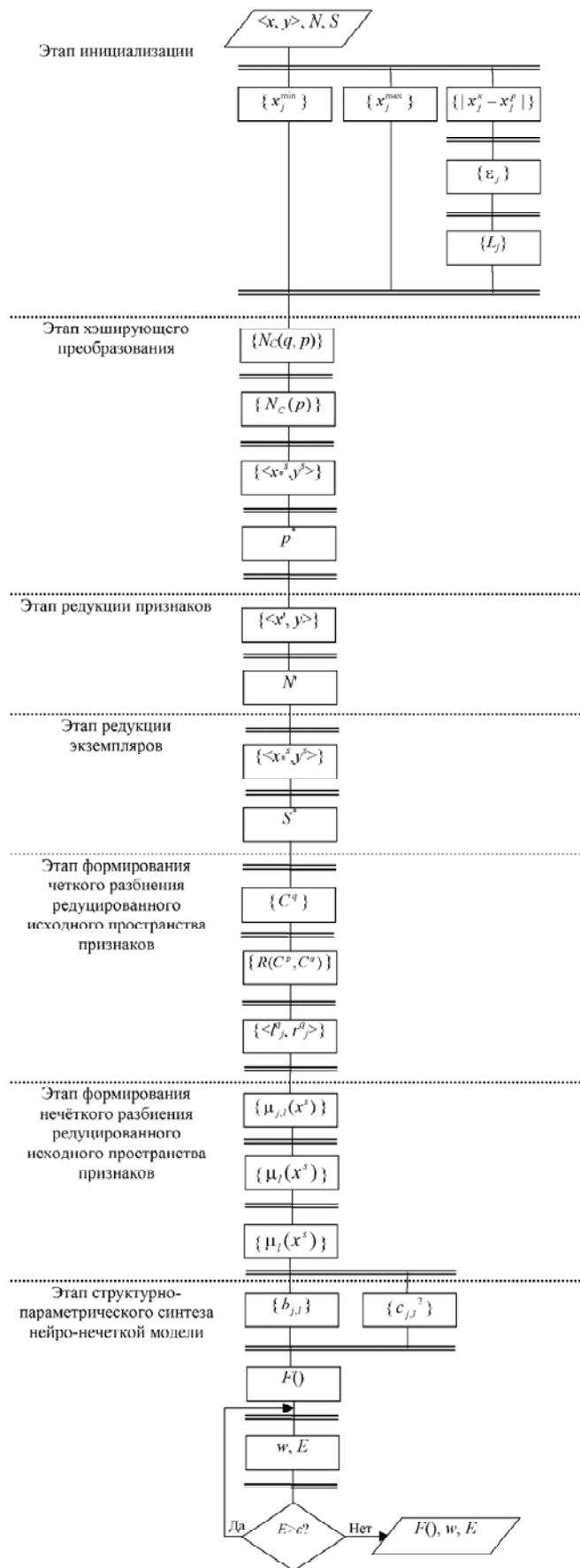


Рисунок 3 – Схема параллельной реализации вычислений этапов метода

Таблица 1 – Характеристики выборок для построения нейро-нечетких моделей

Название задачи	$N$	$S$
Диагностирование лопаток турбины высокого давления газотурбинного авиадвигателя	10240	32
Первичное дифференциальное диагностирование острых воспалений мочевыделительной системы	6	120
Диагностирование рака молочной железы	10	569
Диагностирование хронического обструктивного бронхита	28	205
Диагностирование сердечной аритмии	279	452
Автоматическая классификация ирисов	4	150
Автоматическая классификация автотранспортных средств	26	1062

Для каждой из задач с помощью предложенного метода строились нейро-нечеткие модели при различном числе вычислительных модулей. Для сравнения те же задачи решались на основе оригинальных (нередуцированных) выборок данных, кластер-анализа, сети Мамдани [9] и метода обратного распространения ошибки [1, 2], реализованных в последовательном режиме. Во всех случаях обучение длилось до достижения приемлемой точности.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперименты показали, что базовый метод (нередуцированные данные, кластер-анализ, сеть Мамдани,

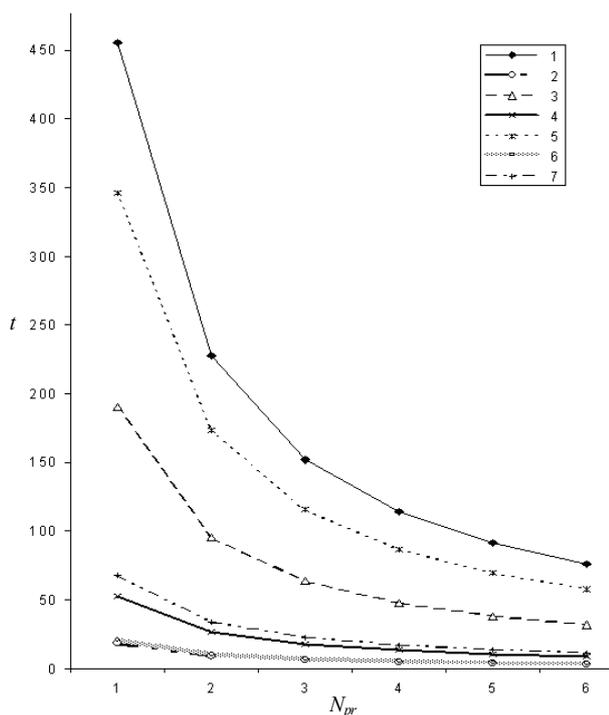


Рисунок 4 – Графики экспериментально полученных зависимостей затрат времени  $t$  на построение нейро-нечеткой модели при разном числе параллельных процессоров  $N_{pr}$  для задач разной размерности: 1 – диагностирование лопаток турбины высокого давления газотурбинного авиадвигателя; 2 – первичное дифференциальное диагностирование острых воспалений мочевыделительной системы; 3 – диагностирование рака молочной железы; 4 – диагностирование хронического обструктивного бронхита; 5 – диагностирование сердечной аритмии; 6 – автоматическая классификация ирисов; 7 – автоматическая классификация автотранспортных средств

метод обратного распространения ошибки в последовательном режиме) в среднем в 5,8 раз требует больше затрат времени по сравнению с предложенным методом при последовательной реализации вычислений (в однопроцессорном режиме).

Результаты проведенных экспериментов по исследованию свойств предложенного метода для различных задач представлены на рис. 4 и рис. 5.

Как видно из рис. 4, с увеличением числа процессоров наблюдается существенное сокращение времени (в разы), затрачиваемого на построение нейро-нечеткой модели на основе предложенного метода. Однако скорость сокращения времени уменьшается по мере увеличения числа используемых процессоров.

Из рис. 5 можно видеть, что рост размерности данных в среднем приводит к росту затрат времени построения модели. При этом увеличение числа используемых процессоров позволяет существенно сократить затраты времени на решение задачи построения модели на основе предложенного метода.

Учитывая широкую практическую доступность в настоящее время двух- и четырехпроцессорных систем для стационарных и мобильных приложений представляется целесообразным рекомендовать использование параллельной реализации предложенного метода. Снижение же порога практической доступности многопроцессорных систем вследствие их ежегодного удешевления с течением времени будет делать предложенный метод еще более востребованным на практике.

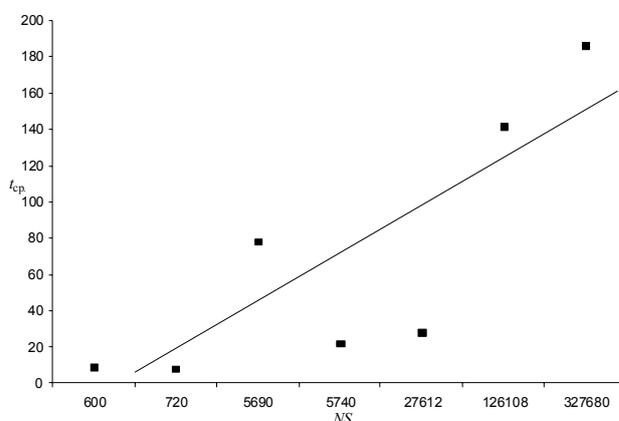


Рисунок 5 – График зависимости средних затрат времени на построение модели  $t_{cp}$  при различном числе процессоров от размерности входа  $NS$  для набора решаемых задач

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод позволяет в комплексе решать задачи сокращения размерности обучающих данных и синтеза нейро-нечеткой модели в отличие от традиционного подхода, когда редукция данных и синтез модели выполняются на основе различных методов [2, 3, 6, 7]. Предложенный метод отличается от известных методов, в первую очередь, тем, что результаты промежуточных расчетов этапов сокращения размерности используются как априорная информация об обучающей выборке на этапах формирования четкого и нечеткого разбиений признакового пространства, а также при структурно-параметрическом синтезе модели.

Использование предложенного метода будет тем эффективнее, чем больше имеется процессоров или ядер в вычислительной системе, а также чем больше размерность исходной выборки данных.

Отметим, что эффективность метода существенно зависит также от типа выбранного хэширующего преобразования. В случае, когда имеется многопроцессорная вычислительная система и доступное предельное ограничение по времени позволяет, представляется целесообразным использовать набор различных хэширующих преобразований, для каждого из которых синтезировать модель с помощью предложенного метода. Из набора полученных моделей следует выделить те модели, которые обеспечивают приемлемую точность, а из них выбрать как результирующую наиболее простую модель, т.е. содержащую как можно меньше признаков, структурных блоков и параметров.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена актуальная задача повышения скорости построения нейро-нечетких моделей по прецедентам.

Научная новизна полученных результатов состоит в том, что впервые предложен метод построения нейро-нечетких моделей по прецедентам, который осуществляет сокращение размерности входных данных посредством хэширующего отображения на одномерную ось с сохранением локальной топологии кластеров в признаковом пространстве, оценивает значимость признаков и экзemplирует на основе выделенных кластеров, а также формирует разбиение исходного признакового пространства в автоматическом режиме, синтезирует структуру и настраивает параметры нейро-нечеткой модели автоматически, исключая из процесса обучения нейро-нечеткой модели малоинформативные данные, упрощая тем самым структуру получаемых моделей, а позволяет наиболее вычислительно трудоемкие операции выполнять в параллельном режиме, что позволяет автоматизировать процесс синтеза нейро-нечетких моделей по прецедентам, а также повысить скорость построения нейро-нечетких моделей как при последовательной, так и при параллельной реализации вычислений.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, которое использовано при проведении вычислительных экспериментов по исследованию свойств метода. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного

метода и реализующего его программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике для решения задач диагностирования и автоматической классификации по признакам.

Перспективы дальнейших исследований заключаются в том, чтобы разработать и исследовать различные хэширующие преобразования на одномерные оси в аспекте кластеризации данных для построения нейро-нечетких моделей, разработать узкоспецифические более эффективные реализации предложенного метода для конкретных параллельных вычислительных систем, исследовать предложенным методом на более широком классе практических задач диагностирования и автоматической классификации образов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской темы «Методы и средства вычислительного интеллекта и параллельного компьютинга для обработки больших объемов данных в системах диагностирования» (номер гос. регистрации 0116U007419) кафедры программных средств Запорожского национального технического университета при частичной поддержке международного образовательного проекта «Центры передового опыта для молодых ученых» (Ref. No. 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES) программы «Темпус» Европейского Союза.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботин С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посібник / С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.
2. Круглов В. В. Нейро-нечеткие методы классификации / В. В. Круглов, О. В. Балашов. – М. : Российский университет кооперации, 2009. – 195 с.
3. Computational intelligence: a methodological introduction / [R. Kruse, C. Borgelt, F. Klawonn et. al.]. – London: Springer-Verlag, 2013. – 488 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-5013-8\_1
4. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов : монография / [С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман и др.]; под ред. С. А. Субботина. – Харьков : Компания СМІТ, 2012. – 318 с.
5. Субботин С. О. Нейронні мережі : навчальний посібник / С. О. Субботін, А. О. Олійник; під заг. ред. проф. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2014. – 132 с.
6. Гибридные нейро-фаззи модели и мультиагентные технологии в сложных системах: монография / [В. А. Филатов, Е. В. Бодянский, В. Е. Кучеренко и др.]; под общ. ред. Е. В. Бодянского. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2008. – 403 с.
7. Buckley J. J. Fuzzy neural networks: a survey / J. J. Buckley, Y. Hayashi // Fuzzy sets and systems. – 1994. – Vol. 66, Issue 1. – P. 1–13.
8. Chai Y. Mamdani Model based Adaptive Neural Fuzzy Inference System and its Application / Y. Chai, L. Jia, Z. Zhang // International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:3, No:3, 2009. – P. 663–670.
9. Mamdani E. H. An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller / E. H. Mamdani, S. Assilian // International journal of man-machine studies. – 1975. – Vol. 7, № 1. – P. 1–13.
10. Скобцов Ю. А. Основы эволюционных вычислений / Ю. А. Скобцов. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – 330 с.

11. Abonyi J. Cluster analysis for data mining and system identification / J. Abonyi, B. Feil. – Basel : Birkhuser, 2007. – 303 p.
12. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. В. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
13. Super-bit locality-sensitive hashing / [J. Jianqiu, J. Li, Sh. Yany, B. Zhang et al.] // Advances in Neural Information Processing Systems / [eds. P. Bartlett et al.]. – 2012. – Vol. 25. – P. 108–116.
14. Andoni A. Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions / A. Andoni, P. Indyk // Communications of the ACM. – 2008. – Vol. 51, No. 1. – P. 117–122.
15. Yang X. A scalable index architecture for supporting multi-dimensional range queries in peer-to-peer networks / X. Yang and Y. Hu // Collaborative computing: networking, applications and worksharing : International conference CollaborateCom-2006, Atlanta 17–20 November 2006 : proceedings. – P. 1–10.
16. Subbotin S. A. Methods and characteristics of locality-preserving transformations in the problems of computational intelligence / S. A. Subbotin // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2014. – № 1. – С. 120–128.
17. Locality-sensitive hashing scheme based on p-stable distributions / A. Andoni, M. Datar, N. Immorlica, P. Indyk, V. Mirrokni // Nearest neighbor methods in learning and vision: theory and practice / [eds.: T. Darrell, P. Indyk, G. Shakhnarovich]. – MIT Press, 2006. – P. 55–67.

Статья поступила в редакцию 17.10.2016.  
После доработки 18.11.2016.

Субботін С. О.<sup>1</sup>, Благодарьов О. Ю.<sup>2</sup>, Гофман С. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Аспірант кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної частини Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

#### СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ З ГЕШУВАЛЬНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ У ПОСЛІДОВНОМУ ТА ПАРАЛЕЛЬНОМУ РЕЖИМАХ

**Актуальність.** Вирішено актуальну задачу підвищення швидкості побудови нейро-нечітких моделей за прецедентами.

**Мета роботи** – створення методу синтезу нейро-нечітких мереж, що має високу швидкість обчислень і дозволяє реалізувати синтез нейро-нечітких мереж у паралельному режимі.

**Метод.** Запропоновано метод побудови нейро-нечітких моделей за прецедентами, що здійснює скорочення розмірності вхідних даних за допомогою гешувального відображення на одновірну вісь зі збереженням локальної топології кластерів у просторі ознак, оцінює значимість ознак і екземплярів на основі виділених кластерів, а також формує розбиття вихідного простору ознак в автоматичному режимі, синтезує структуру і налаштовує параметри нейро-нечіткої моделі автоматично, вилучає з процесу навчання нейро-нечіткої моделі малоінформативні дані, спрощуючи тим самим структуру одержуваних моделей, та дозволяє найбільше обчислювально трудомісткі операції виконувати в паралельному режимі, що дозволяє автоматизувати процес синтезу нейро-нечітких моделей за прецедентами, а також підвищити швидкість побудови нейро-нечітких моделей як при послідовній, так і при паралельній реалізації обчислень.

**Результати.** Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований метод, що використано при проведенні обчислювальних експериментів з дослідження властивостей методу.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу і програмного забезпечення, що його реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці для рішення задач діагностування й автоматичної класифікації за ознаками.

**Ключові слова:** нейро-нечітка мережа, геш, навчання, синтез, кластер-аналіз, діагностика, розпізнавання.

Subbotin S. A.<sup>1</sup>, Blagodarev A. Yu.<sup>2</sup>, Gofman Ye. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools of Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>2</sup>Post-graduate student of the Department of Software Tools of Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>3</sup>PhD, Senior Researcher of Scientific-research Division of Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

#### THE NEURO-FUZZY DIAGNOSTIC MODEL SYNTHESIS WITH HASHED TRANSFORMATION IN THE SEQUENCE AND PARALLEL MODE

**Context.** The urgent task of improving the speed of neuro-fuzzy model construction by the precedents has been solved.

**Objective** is a creation of a neuro-fuzzy network synthesis method with high speed of computations and allowing to realize the synthesis of neuro-fuzzy networks in parallel mode.

**Method.** The method of neuro-fuzzy model constructing by precedents, which reduces the dimension of the input data by hashing transformation to the one-dimensional axis saving local cluster topology in a feature space, estimates the significance of the features and instances on the basis of selected clusters, and also forms a partition of the original feature space in an automatic mode, synthesizes structure and adjusts parameters of the neuro-fuzzy model automatically, excluding from the training process of the neuro-fuzzy model the uninformative data, thus simplifying the structure of the obtained model, allows to perform most computationally costly operations in parallel mode, that allows to automate the process of neuro-fuzzy model synthesis by precedents, as well as to increase the speed of neuro-fuzzy model construction both in sequential and in parallel implementation of computations.

**Results.** The software implementing proposed method have been developed and used in computational experiments investigating the properties of the method. The experiments confirmed the efficiency of the proposed method and software.

**Conclusions.** The experiments also allow to recommend them for use in practice to solve the problems of diagnosis and automatic classification by the features.

**Keywords:** neuro-fuzzy network, hash, training, synthesis, cluster analysis, diagnosis, recognition.

## REFERENCES

1. Subbotin S. O. Podannya y obrobka znan' u systemakh shtuchnoho intelektu ta pidtrymky pryunyattya rishen' : navch. posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2008, 341 p.
2. Kruglov V. V., Balashov O. V. Neyro-nechetkiye metody klassifikatsii. Moscow, Rossiyskiy universitet kooperatsii, 2009, 195 p.
3. Kruse R., Borgelt C., Klawonn F. et. al. Computational intelligence: a methodological introduction. London, Springer-Verlag, 2013, 488 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-5013-8\_1
4. Subbotin S. A., Oleynik An. A., Gofman Ye. A., Zaytsev S. A., Oleynik Al. A. pod red. S. A. Subbotina. Intellektual'nyye informatsionnyye tekhnologii proyektirovaniya avtomatizirovannykh sistem diagnostirovaniya i raspoznavaniya obrazov, monografiya. Khar'kov, Kompaniya SMIT, 2012, 318 p.
5. Subbotin S. O., Oliynyk A. O.; pid zah. red. prof. S. O. Subbotina. Neyronni merezhi : navchal'nyy posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2014, 132 p.
6. Filatov V. A., Bodyanskiy Ye. V., Kucherenko V. Ye. i dr. ; pod obshch. red. Ye. V. Bodyanskogo Gibridnyye neyro-fazzi modeli i mul'tiagentnyye tekhnologii v slozhnykh sistemakh: monografiya. Dnipropeetrovs'k, Sistemni tekhnolognn, 2008, 403 p.
7. Buckley J. J., Hayashi Y. Fuzzy neural networks: a survey, *Fuzzy sets and systems*, 1994, Vol. 66, Issue 1, pp. 1–13.
8. Chai Y., Jia L., Zhang Z. Mamdani Model based Adaptive Neural Fuzzy Inference System and its Application, *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*, Vol:3, No:3, 2009, pp. 663–670.
9. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with fuzzy logic controller, *International journal of man-machine studies*, 1975, Vol. 7, No. 1, pp. 1–13.
10. Skobtsov Yu. A. Osnovy evolyutsionnykh vychisleniy. Donetsk, DonNTU, 2008, 330 p.
11. Abonyi J., Feil B. Cluster analysis for data mining and system identification. Basel, Birkhuser, 2007, 303 p.
12. Leonenkov A. V. Nepochtoye modelirovaniye v srede MATLAB i fuzzyTECH. Sankt-PeterburgBKHV-Peterburg, 2003, 736 p.
13. Jianqiu J., Li J., Yany Sh., Zhang B. et al. eds. P. Bartlett et al. Super-bit locality-sensitive hashing, *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2012, Vol. 25, pp. 108–116.
14. Andoni A., Indyk P. Near-optimal hashing algorithms for approximate nearest neighbor in high dimensions, *Communications of the ACM*, 2008, Vol. 51, No. 1, pp. 117–122.
15. Yang X., Hu Y. A scalable index architecture for supporting multi-dimensional range queries in peer-to-peer networks, *Collaborative computing: networking, applications and worksharing : International conference CollaborateCom-2006, Atlanta 17–20 November 2006*, proceedings, pp. 1–10.
16. Subbotin S. A. Methods and characteristics of locality-preserving transformations in the problems of computational intelligence, *Radioelektronika, Computer Science, Control*, 2014, No. 1, pp. 120–128.
17. Andoni A., Datar M., Immorlica N., Indyk P., Mirrokni V. Locality-sensitive hashing scheme based on p-stable distributions, *Nearest neighbor methods in learning and vision: theory and practice* [eds.: T. Darrell, P. Indyk, G. Shakhnarovich]. MIT Press, 2006, pp. 55–67.

<sup>1</sup>Аспирантка кафедри искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиозлектроники, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиозлектроники, Харьков, Украина

<sup>3</sup>Старший преподаватель кафедры информационных, компьютерных и полиграфических технологий Украинской инженерно-педагогической академии, Харьков, Украина

## ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ КРИТЕРИЕВ НАДЕЖНОСТИ

**Актуальность.** Сложность и неоднозначность подходов к системам терморегулирования, дает возможность удовлетворить большинству требований конечного потребителя. Подобные задачи решают путем создания гибких в управлении систем обеспечения терморегулирования. Основное функциональное требование к ним определяется условием теплового комфорта: поддержание заданной оптимальной температуры в допустимых пределах ее отклонения. Подобные системы работают в условиях неопределенности. В ходе решения подобных задач предложены и рассмотрены модели на основе нечеткой логики.

**Цель.** Моделирование нечеткого процесса на  $\tilde{E}$ -сетях для получения механизма устойчивого к конфликтным ситуациям. Для повышения производительности системы необходимо произвести оценку процессов надежности устройств.

**Метод.** Предложен новый метод исследования интеллектуальных процессов на основе критериев надежности. Данный метод основан на расширении  $\tilde{E}$ -сети, что позволяет раскрыть внешнюю и внутреннюю неопределенность в системе.

**Результаты.** Выполнен содержательный анализ существующих систем терморегулирования. Проведено моделирование адекватности процессов системы на основе свойств непротиворечивости, полноты, надежности, и выбора альтернатив моделируемых процессов. Также проведен анализ распределенных объектов теплоснабжения их кластеризация на основе плотности распределения признаков.

**Выводы.** Получены научные и практически значимые результаты позволяющие минимизировать вычислительные затраты, повысить достоверность в принятиях решений, а также более детальное дальнейшее обслуживание сложных производственных систем.

**Ключевые слова:** терморегулирования, надежность, UML-диаграмма, плотность распределения.

### НОМЕНКЛАТУРА

$M^{(e)}$  – ожидаемые маркировки;

$M^{(f)}$  – фактические маркировки;

$\tilde{P}$  – конечное допустимое множество позиций;

$\tilde{B}$  – множество периферийных позиций, которые используются в сети для определения связей с внешней средой;

$\tilde{R}$  – множество решающих позиций;

$\tilde{A}$  – непустое конечное множество переходов;

$\tilde{F}$  – функция связи переходов и позиций соответственно по входам и выходам;

$Z$  – функция времени выполнения переходов;

$\tilde{Q}$  – конечное время решающих процедур, с помощью которых исключаются конфликтные ситуации на переходах сети;

$\{\tilde{P}_i\}$  –  $n$ -местные предикаты, осуществляющие функции трансформации маркеров  $M_i$  маркировки;

$\tilde{M}_0$  – начальная маркировка сети;

$R$  – управляющее воздействие;

$E$  – сигнал разногласования или ошибки;

$U$  – выходная величина регулятора;

$Y$  – регулируемая величина;

$t$  – время;

$K$  – пропорциональный коэффициент (безразмерный) регулятора;

$T_i$  – постоянная интегрирования (размерность времени) регулятора;

$T_d$  – постоянная дифференцирования (размерность времени) регулятора;

$G_d(s)$  – передаточная функция замкнутой системы;

$\tilde{S}_i$  – составляющие процессов декомпозиции путем членения бинарного кода решаемых позиций;

$r_i$  – решающие позиции;

$\lambda$  – наработка на отказ;

$n$  – количество элементов;

К.з. – коэффициент запаса;

$y_i$  – центр тяжести масс;

$S_i$  – площадь электрического пространства;

$p^*$  – порог плотности;

$\mu(S_{ij\beta})$  – функция принадлежности плотности распределения по некоторой площади.

### ВВЕДЕНИЕ

Главным преимуществом производственных систем является их надежность и возможность практически непрерывно поддерживать в исправном состоянии. Автоматизация систем придает понятию надежности огромную значимость. Надежность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, которые характеризуют способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания. Надежность объекта заключается в отсутствии непредвиденных недопустимых изменений его качества в процессе эксплуатации и хранения.

Надежность зависит от назначения объекта и условий его эксплуатации может включать в себя свойства безотказности, долговечности, ремонтпригодности. Для количественной оценки надежности используют так называемые единичные показатели надежности (характеризует только одно свойство надежности) и комплексные показатели надежности (характеризует несколько свойств надежности) [1–4]. Надежность необходима для расчетов, экспериментальных оценок, обеспечения и оптимизации надежности систем. Под надежностью следует понимать свойство системы выполнять заданные функции на определенном интервале времени и при этом поддерживать значения установленных производственных параметров в заданных пределах при соответствующих условиях эксплуатации, ремонта.

Существующие модели функционируют в условиях неопределенности. Для решения таких задач были рассмотрены модели на основе нечеткой логики, что и определяет интеллектуальность процессов. С помощью моделирования можно выявить связи между рабочими процессами, снизить уровень неопределенности, что позволит сократить время выполнения анализа и повысить производительность систем. Важно рассмотреть также механизм моделирования на нечетких  $\tilde{E}$ -сетях. Выбор данного механизма обусловлен широким его применением и устойчивостью к конфликтным ситуациям.

Целью данной работы является оценка процессов надежности устройств на основе нечеткой логики. Предложен метод исследования интеллектуальных процессов на основе критериев надежности, обеспечивает дополнительные возможности при обслуживании сложных производственных систем.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим сложную производственную систему терморегулирования с погодной коррекцией. Для этого необходимо:

- проанализировать существующие системы регулирования процессами;
- проанализировать существующие процессы и системы, выполнить анализ адекватности моделей и процессов диагностики где заданы взаимодействующие процессы  $Pr_{\alpha}$ , и проверено свойство непротиворечивости (1) и полноты моделируемых процессов (2)

$$\forall M_j, M_j \in \{M_j\} \left| M^{(f)} = M^{(e)}, \mu^{(f)}(x) \geq \mu^{(e)}(x), \quad (1) \right.$$

$$\forall M_j, M_j \in \{M_j\} \left| \{M_j\} \neq \emptyset, \left| \{M_j\}^{(f)} \right| = \left| \{M_j\}^{(e)} \right|, \mu^{(f)}(x) \geq \mu^{(e)}(x). \quad (2) \right.$$

- разработать и обосновать интеллектуальный метод по критерию надежности процессов на основе расширенных  $\tilde{E}$ -сетей, выполнить анализ процессов повышения надежности на объекте внедрения.

Нечеткая  $\tilde{E}$ -сеть может быть реализована в виде раскрашенного графа (3):

$$\tilde{E} = \langle (\tilde{P}, \tilde{B}, \tilde{R}), \tilde{A}, \tilde{F}, Z, \tilde{Q}, \tilde{Pr}, \tilde{M}_0 \rangle, \quad (3)$$

- разработка инструментария кластеризации на основе плотности распределения признаков.

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существуют различные терморегуляторы [1–4]. В таблице 1 рассмотрены характеристики терморегуляторов, их сходство и отличие.

Выполнен детальный анализ существующих систем терморегулирования, как объекта исследования. Поставленную задачу решают путем создания гибких в управлении систем обеспечения терморегулирования. Такими являются только автоматически управляемые системы с индивидуальными терморегуляторами. Основное функциональное требование к таким системам определяется условием теплового комфорта: поддержание заданой оптимальной температуры помещения в допустимых пределах ее отклонения [5–7].

В данной работе предложен метод анализа качества изделий по критерию надежности процессов, так же рассмотрены вопросы создания нового инструментария оценки качества и кластеризации объектов на основе плотности распределения признаков [8–11].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На рис. 1 показано типичное изображение ПИД-регулятора в виде одного функционального блока, что характерно для АСУ ТП.

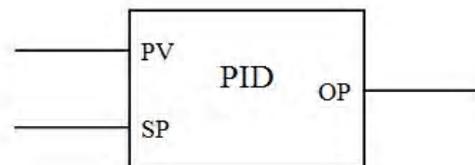


Рисунок 1 – Упрощенное изображение ПИД регулятора в виде одного функционального блока

Таблица 1 – Обзор существующих регуляторов

	РТГ-32[1]	ОВЕН ТРМ101[2]	АВТВ [3]
Двухконтурности	+	–	+
Автоматическая коррекция температуры	+	–	–
Ручная коррекция температуры	+	+	–
Динамика развития процессов, отсутствие конфликтов (E-сети)	+	–	–
Время решения (выч. сложность) комплекса моделирования задач	$O(n^2)$	$O(n^2)$	$O(n^2)$
Наработка на отказ	$> 10^5$ ч	$> 10^5$ ч	$> 10^5$ ч
Выбор альтернатив	+	–	–

Качество управления существенно зависит от настройки коэффициентов регулятора. На рис. 2 показано поведение системы при некорректной настройке ПИД [4].

При изменении параметров регулятор не способен отработать корректно, и наблюдается расхождение колебательных процессов. Система не устойчива. На рис. 3 показан переходный процесс при правильных настройках регулятора. При изменении параметров регулятор работает корректно. Наблюдается некоторое перерегулирование.

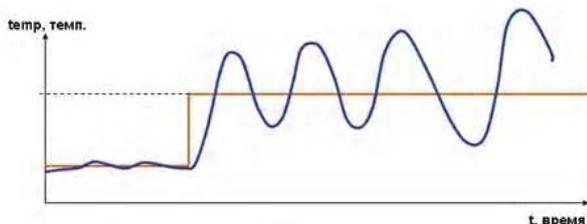


Рисунок 2 – Переходный процесс при плохих настройках ПИД-регулятора

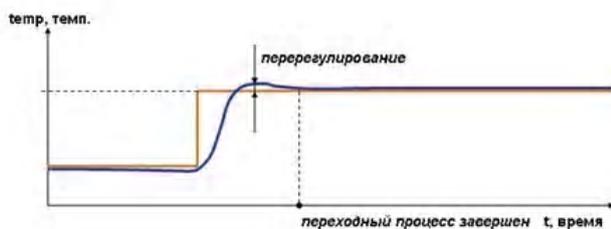


Рисунок 3 – Переходный процесс при правильной настройке ПИД-регулятора

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Простейшая система автоматического регулирования с обратной связью [4] показана на рис. 4.

Если исходная переменная  $u$  регулятора описывается выражением

$$u(t) = Ke(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (4)$$

В частном случае пропорциональная, интегральная или дифференциальная компоненты могут отсутствовать и такие упрощенные регуляторы называют П, И или ПИ регуляторами. Распространены также следующие модификации выражения (4):

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i'} \int_0^t e(t)dt + T_d' \frac{de(t)}{dt}), \quad (5)$$

$$u(t) = Ke(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (6)$$

Между параметрами выражений (4)–(6) существует простая связь. Однако отсутствие общепринятой системы параметров часто приводит к путанице. Это нужно помнить при замене одного ПИД контроллера на другой, при задании его параметров или использовании программ настройки параметров. Мы будем пользоваться выражением (4).

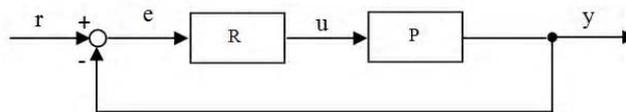


Рисунок 4 – ПИД-регулятор в системе с обратной связью

Следует подчеркнуть, что входом объекта управления на всех рисунках является выход регулятора, то есть величина  $u$ , которая в соответствии с (4)–(6) и рис. 4 имеет ту же размерность, что и несогласованность  $e$ , исходная величина  $y$  и уставка  $r$ . То есть, если объект управляется, например, ШИМ-регулятором, током или частотой вращения вала, во всех этих случаях управляет величиной  $u$ , а в модель объекта управления  $P$  нужно ввести преобразователь величины  $u$  в ширину импульса (ШИМ-регулятора), в ток или в частоту вращения вала соответственно. Это надо учитывать также при задании входного воздействия в экспериментах для настройки регулятора. Таким образом во всех случаях должна быть величина  $u$  (исходная величина регулятора) [2–3].

Используя преобразование Лапласа при нулевых начальных условиях  $u(0)=0$ , выражение (4) можно представить в операторной форме:

$$u(s) = (K + \frac{1}{T_i s} + T_d s)e(s). \quad (7)$$

Таким образом, передаточная функция ПИД регулятора имеет вид

$$R(s) = K + \frac{1}{T_i s} + T_d s = K(1 + \frac{1}{KT_i s} + \frac{T_d}{K} s). \quad (8)$$

Амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристика передаточной функции (8) при параметрах  $T_i = 1$  с,  $T_d = 1$  с,  $K = 10$  показаны на рис. 4. Переходная характеристика ПИД регулятора (реакция на единичный скачок) представляет собой сумму постоянной составляющей, прямой линии, полученной при интегрировании единичного скачка и дельта – функции Дирака, полученной при дифференцировании единичного скачка. Из рис. 4 следует, что

$$y(s) = \frac{P(s)R(s)}{1 + P(s)R(s)}r(s), \text{ или } G_d(s) = \frac{P(s)R(s)}{1 + P(s)R(s)}. \quad (9)$$

На систему автоматического регулирования могут влиять внешние возмущения и шум измерений. Внешние возмущения (воздействие нагрузки, изменение температуры окружающей среды, ветер, течение воды и т. д.) обычно распределены пространственно по объекту, однако для упрощения анализа их моделируют сосредоточенным источником, приложенным к входу или источником, приложенным к выходу объекта [1–4]. Источник шума моделирует погрешность измерений выходной изменением, погрешность датчика, а также препятствия, которые влияют на канал передачи сигнала с выхода системы на ее вход.

С учетом возмущающих воздействий и шума уравнения системы автоматического управления будет иметь вид

$$y(s) = \frac{P(s)R(s)}{1 + P(s)R(s)}r(s) + \frac{1}{1 + P(s)R(s)}n(s) + \frac{P(s)}{1 + P(s)R(s)}d(s). \quad (10)$$

На рис. 5 пропонується регулятор температури опалення по незалежній схемі.

В склад регулятора входять: електронний блок, датчики температури та електроприводи з дисковими поворотними затворами. Кількість підключених термодатчиків і поводів залежить від кількості використовуваних каналів і типів контурів регулювання. Кожен використаний канал включає в себе один електропривод і мінімум один термодатчик теплоносія в подаючому трубопроводі, який подає. В кожен використаний канал, в якому передбачається регулювання з урахуванням температури в зворотному трубопроводі, включається ще один термодатчик теплоносія для вимірювання цієї температури. Якщо в одному або обох каналах використовується погодна корекція температури (наприклад, при використанні каналів в контурі опалення), то до електронного блоку підключається також термодатчик зовнішнього повітря – один на два канали [1].

Наявність завад в системі: рівень напруги, флуктуації струму, напруга, температура, вологість і т.п., призводять до необхідності урахування знання-орієнтованих технологій. Існуючі методи [1] не в повній мірі задовольняють необхідні рішення по точності оцінки показників надійності. Виходячи з вищезазначеного, пропонується розширений метод аналізу надійності і діагностики об'єкта з використанням знання-орієнтованих технологій [5].

Граф-схема методу (ГСМ) пропонується на рис. 6:

Етап 0. Оцінка показників надійності з використанням знання-орієнтованих технологій

Етап 1. Формування початкових умов і простору станів об'єкта.

Етап 2. Корекція параметрів на основі зовнішніх погодних умов.

Етап 3. Порівняння температурних показників.

Етап 4. Достаточні показники температури.

Етап 5. Недостаточні показники температури.

Етап 6. Коректування параметрів.

Етап 7. Повтор етапів 2–7.

Етап 8. Виникнення аварійного стану

Етап 9. Зупинка.

Для подальшого аналізу структури (рис. 6) цілеспрямовано використано декомпозицію методу і моделі.

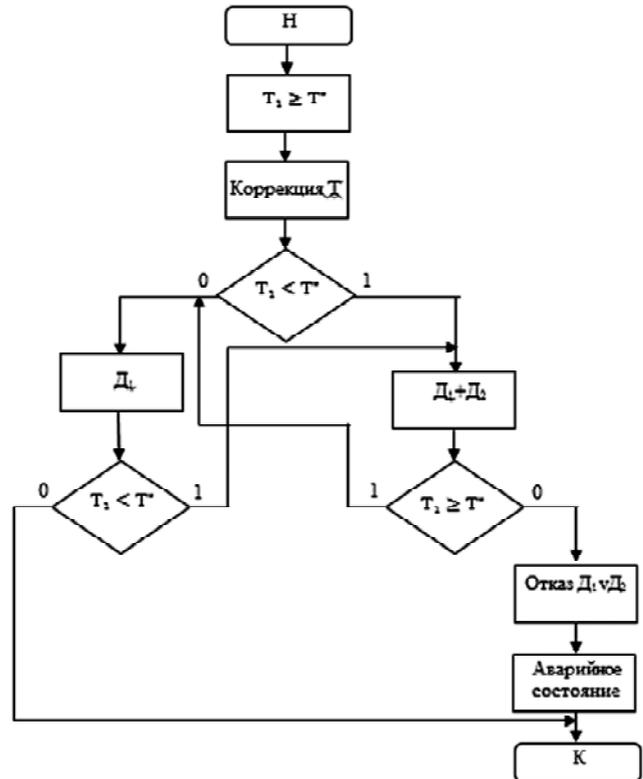


Рисунок 6 – ГСМ

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержательный анализ существующего инструментария FPN показала, что известная внешнее сходство нечетких сетей Петри и  $\tilde{E}$ -сетей дает принципиальную возможность моделирования адекватности процессов в  $\tilde{E}$ -сетях средствами FPN при корректности декомпозиции процессов:

- процессы должны быть логически завершенные [6];
- нечеткость компонент модели систем  $\tilde{S}_\Sigma$  должны быть адекватными;
- декомпозиция компонент модели должна осуществляться на основе членения решаемых позиций  $r_i$  путем дешифрации бинарного кода  $\tilde{S}_{dk} = \sum(\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_n)$ ;

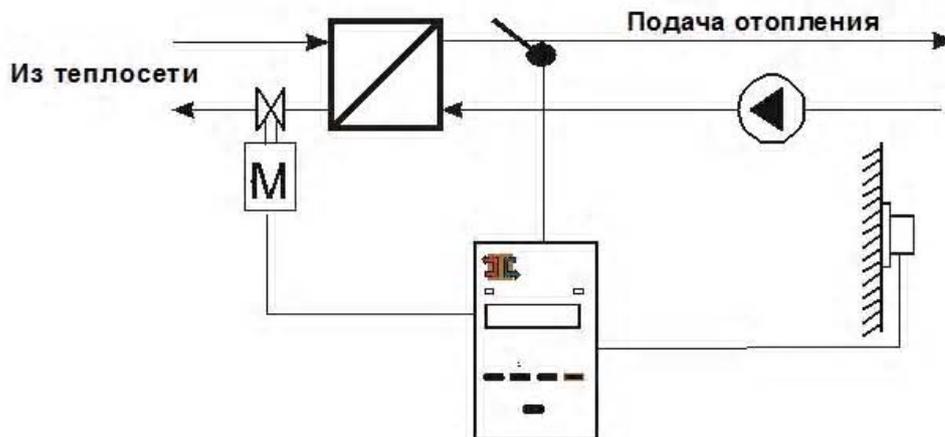


Рисунок 5 – Регулятор температуры отопления по независимой схеме

– композиция модели осуществляется путем объединения составляющих моделей бинарного кода. Тогда можно показать, что  $\tilde{S}_{dk} = \tilde{S}_{\Sigma}$ . Реализуя метод строим сеть Петри,  $\tilde{E}$ -сеть, компоненты декомпозиции  $\tilde{S}_{dk}$ :

$$\tilde{S}_{\Sigma} = \cup \tilde{S}_i, i \in I, \quad (11)$$

Система элементов предложена на рис. 7.

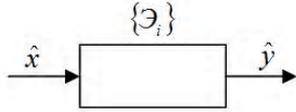


Рисунок 7 – Система элементов

Определение 1. В системе произошел отказ, если по крайней мере отказал один элемент из  $\{X_i\}$ . Согласно [7] наработки на отказ системы

$$T_0 = \frac{1}{\sum \lambda \left[ \frac{1}{\lambda} \right]}, \quad (12)$$

В табл. 2 приведены обобщенные показатели надежности. Тогда используя (12) получим.

$$T_{0\Sigma} = \frac{1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{10^5}{45,866} = 2180,3 \text{ч} \quad (13)$$

Учитывая требования разработанного расширенного метода использование знания-ориентированных технологий задаем:

$$\text{if } T_{0\Sigma} \text{ is «малое» then } \Delta T_0 \text{ is «малое»}. \quad (14)$$

Тогда, с учетом (14)

$$\tilde{T}_0 = \frac{1}{\lambda_{\Sigma i}} \pm \text{ (if } T_{0\Sigma} \text{ is «малое» then } \Delta T_0 \text{ is «малое»)} \quad (15)$$

Решение (15) предусматривает решение (16)

$$\Delta \tilde{T}'_{0\Sigma} = \vee \mu'_\varepsilon \wedge \mu(\varepsilon, T_{0\Sigma}). \quad (16)$$

Не уходя от общности, решим уравнение (16) графическим методом [6–7] (рис. 8).

Тогда  $\Delta T_{0\Sigma}$  и с учетом решения (рис. 8) и последующей деффазификации (17).

$$\Delta T_{0\Sigma} = \frac{\sum y_i S_i}{\sum S_i} = 50 \text{ч}. \quad (17)$$

Значения  $T_0^{(\phi)} = T_{0\Sigma} \pm \Delta T_{0\Sigma} = 2180,3 \pm 50 \text{ч}$  что нас удовлетворяет, исходя из показателей надежности.

Важным аспектом интеллектуального анализа пространственно распределенных объектов, включая системы теплоснабжения является их кластеризация на основе плотности распределения признаков [7–8]. Задано множество площадей распределения плотности признаков  $\{p_{ij\beta}\}, \beta \in B$ , пространственных координат  $\{a_{ij}\}$  и параметров  $\{p_{ij\alpha}\}, \alpha \in A$ , для которых характерно  $S_{ij}, i \in I, j \in J$ , тогда критерием поиска плотности распределения признаков может быть реализация (18–19):  
Этап 1.

$$p_{\alpha} = \frac{\sum_{i \in I, j \in J} p_{ij\beta} S_{ij}}{\sum_{i \in I, j \in J} S_{ij}} \mu(S_{ij\beta}), p_{ij} > p^*, \quad (18)$$

Таблица 2 – Расчетные параметры

$\frac{1}{\lambda_i}$	ПИД-регулятор	Запорный вентиль	Фильтр	Кран	Теплообменник пластинчатый	Насос
$n$	1	3	20	10	1	2
$\lambda_i$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$	$1,55 \cdot 10^{-5}$
К.з.	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$n \cdot \lambda_i$	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$4,65 \cdot 10^{-5}$	$31 \cdot 10^{-5}$	$15,5 \cdot 10^{-5}$	$0,3 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-5}$
$\frac{n \cdot \lambda_i}{\text{К.з.}} = \lambda_{\Sigma i}$	$0,416 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$25,8 \cdot 10^{-5}$	$13 \cdot 10^{-5}$	$0,25 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$

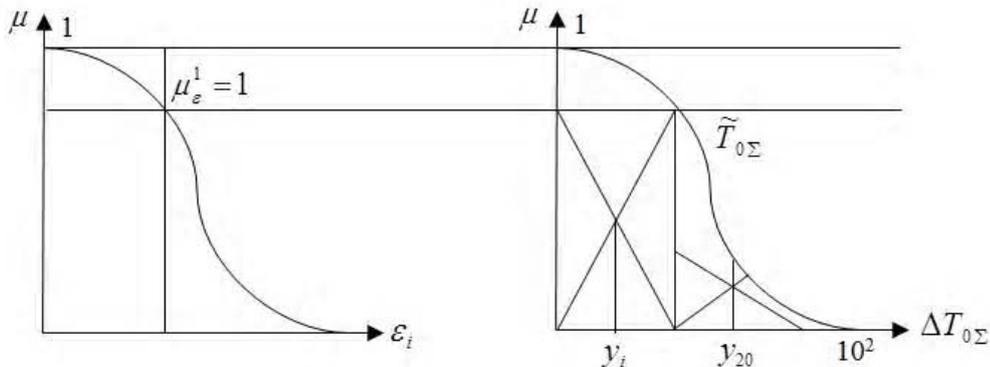


Рисунок 8 – Графический метод решения задачи

Этап 2. Формируем область  $S_{ij\beta x}$ , для которой значение квадратичного индекса нечеткости является четким и принимает вид

$$\eta(\tilde{O}) = \frac{2}{\sqrt{n}} e(\tilde{O}, \bar{\tilde{O}}) \xrightarrow{a_{ij, P} > P^*} \min. \quad (19)$$

UML-диаграмма классов предложена на рис. 9.

Языком программирования в работе была выбрана JavaScript [10–11]. Основными конкурентными преимуществами языка программирования JavaScript являются: максимально понятный для пользователя; поддерживается наиболее популярными браузерами «по умолчанию»; очень высокая скорость работы JavaScript; скрипты (программы, написанные на языке JavaScript) подключаются к HTML коду web-страницы непосредственно и при загрузке сразу же выполняются; программы можно запускать не только в браузере, но и на сервере. Эффективность реализации программы подтверждена экспериментально.

## 6 ОБСУЖДЕНИЯ

Предложенный метод анализа надежности и диагностики системы с использованием знание-ориентированных технологий по сравнению с расчетом качества изделий, обеспечивают более точные решения по оценке показателей надежности. Такие системы дополнительно должны обладать такими свойствами как полная или частичная работоспособности, а также достоверностью процессов в условиях неопределенности, которые не предусмотрены нормальными условиями эксплуатации систем.

Недостатком данного метода является неоднородность входных данных которая не учитывается при непрерывных процессах.

Таким образом, применение разработанного метода позволяют детально рассмотреть не только анализ

надежности, но и провести анализ адекватности системы и поиск оптимальных альтернатив. Так как метод основан на динамической модели расширенной  $\tilde{E}$ -сети это дополнительно позволяет рассмотреть составляющие фрагменты модели и их функции принадлежности. Также для интеллектуального анализа применена кластеризация объектов на основе плотности распределения признаков.

## ВЫВОДЫ

Разработка метода анализа качества по критерию надежности процессов является важной составляющей для функционирования сложных производственных систем в условиях неопределенности. Разработка данного метода на основе модели нечеткой  $\tilde{E}$ -сети, позволяют раскрыть внешнюю и внутреннюю неопределенность в системе.

В результате проведения исследований получены научные и практически значимые результаты который позволяют минимизировать вычислительные затраты при одновременном повышении достоверности в принятиях решений.

1. Выполнен детальный анализ существующих систем терморегулирования, как объекта исследования.

2. На основе выполненного анализа процессов, разработан новый метод анализа качества изделий по критерию надежности процессов, основанный на расширении  $\tilde{E}$ -сетей и нечеткого логического вывода Мамдани.

3. Рассмотрены вопросы создания нового инструментария оценки качества и кластеризации объектов на основе плотности распределения признаков, с использованием языка программирования Java Script.

4. Определены направления дальнейших перспективных исследований.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Харьковского национального

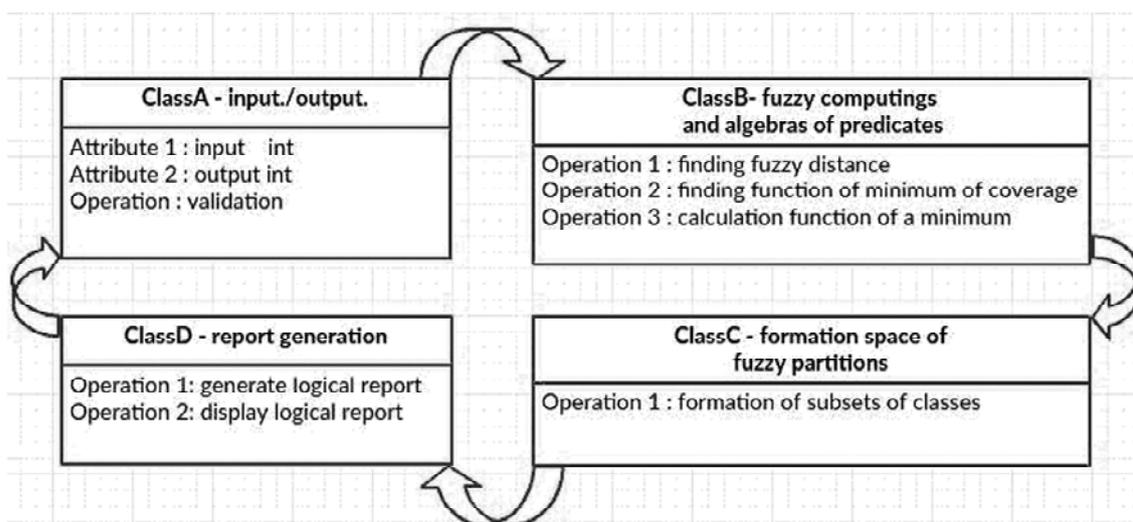


Рисунок 9 – UML-диаграмма классов:

ClassA – input./output – отвечает за ввод данных и их последующее выведение на экран;

ClassB – fuzzy computing’s and algebras of predicates – фазификация входных данных и операция над нечеткими числами (вычисления дистанции, нахождение функции минимума покрытия, расчет функции минимума);

ClassC – formation space of fuzzy partions – предобработка нечетких чисел для дальнейшего удобного вывода;

ClassD – report generation – генерация отчета по полученным данным с последующим выводом его через ClassA на экран

університета радіоелектроніки «Динамический интеллектуальный анализ последовательностей нечеткой информации в условиях существенной неопределенности на основе гибридных систем вычислительного интеллекта» (номер гос. регистрации 0116U002539), где авторами предложены новый метод анализа качества изделий по критерию надежности процессов, основанный на расширении  $\tilde{E}$ -сетей и нечеткого логического вывода Мамдани.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Технические характеристики терморегулятора РТГ-32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/1991080/>
2. ПИД-регулятор с универсальным входом и интерфейсом RS-485 ОВЕН ТРМ101 [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://termokip.com.ua/uploads/RegTemperature/Owen/trm101.pdf>
3. Регулятор температуры AVTB (PN16) [Электронный ресурс]. – Режим доступа [http://www.amity-group.org/docs/danfoss/04\\_avtb.pdf](http://www.amity-group.org/docs/danfoss/04_avtb.pdf)
4. Характеристика кожухо-трубных и пластинчатых теплообменников [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://www.twirpx.com/file/1991082/>

5. Кучеренко Е. И. Знание-ориентированные интеллектуальные методы принятия решений в условиях неопределенности / Е. И. Кучеренко, М. В. Ходак // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – № 4(35). – С. 45–51.
6. Бодянский Е. В. Нейро-фаззи сети Петри в задачах моделирования сложных систем (монография – научное издание) / Е. В. Бодянский, Е. И. Кучеренко, А. И. Михалев. – Дніпропетровськ : Системні технології, 2005. – 311 с.
7. Широков А. М. Надежность радиоэлектронных устройств / А. М. Широков. – М. : Высшая школа, 1972. – 267 с.
8. Cluster Analysis/ [B. Everitt, S. Landau, M. Leese, D. Stahl]. – John Wiley & Sons Ltd, 2011. – 330 p.
9. Кучеренко Е. И. Нечеткое разбиение объектов на основе критериев плотности / Е. И. Кучеренко, С. А. Глушенков, И. С. Глушенкова // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 1. – С. 32–39.
10. Ballard P. JavaScript in 24 Hours / P. Ballard. – Indiana, SAMS, 2015. – 416p.
11. Закас Н. Professional JavaScript for Web Developers / Н. Закас. – М. : Питер, 2015. – 960 с.

Статья поступила в редакцию 11.01.2017.

После доработки 25.11.2017.

Ходак М. В.<sup>1</sup>, [Кучеренко Е. И.<sup>2</sup>], Трохимчук С. М.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Аспірантка кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup>Д-р технічних наук, професор кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>3</sup>Старший викладач кафедри інформаційних, комп'ютерних та поліграфічних технологій Української інженерно-педагогічної академії, Харків, Україна

### ПРИКЛАДНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ НА ОСНОВІ КРИТЕРІЇВ НАДІЙНОСТІ

**Актуальність.** Складність і неоднозначність підходів до систем терморегулювання, дає можливість задовольнити більшості вимог кінцевого споживача. Подібні завдання вирішують шляхом створення гнучких в управлінні систем забезпечення терморегулювання. Основна функціональна вимога до них визначається умовою теплового комфорту: підтримка заданої оптимальної температури в допустимих межах її відхилення. Подібні системи працюють в умовах невизначеності. В ході вирішення подібних завдань запропоновані і розглянуті моделі на основі нечіткої логіки.

**Мета.** Моделювання нечіткого процесу на  $\tilde{E}$ -мережі для отримання механізму стійкого до конфліктних ситуацій. Для підвищення продуктивності системи необхідно провести оцінку процесів надійності пристроїв.

**Метод.** Запропоновано новий метод дослідження інтелектуальних процесів на основі критеріїв надійності. Даний метод заснований на розширенні  $\tilde{E}$ -мережі, що дозволяє розкрити зовнішню і внутрішню невизначеність в системі.

**Результати.** Виконано змістовний аналіз існуючих систем терморегулювання. Проведено моделювання адекватності процесів системи на основі властивостей несуперечності, повноти, надійності, і вибору альтернатив модельованих процесів. Також проведено аналіз розподілених об'єктів теплопостачання їх кластеризація на основі щільності розподілу ознак.

**Висновки.** Отримано наукові і практично значущі результати дозволяють мінімізувати обчислювальні витрати, підвищити достовірність в ухваленнях рішень, а також більш детально подальше обслуговування складних виробничих систем.

**Ключові слова:** терморегулювання, надійність, UML-діаграма, щільність розподілу.

Khodak M.V.<sup>1</sup>, [Kucherenko Ye. I.<sup>2</sup>], Trokhymchuk S. N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Postgraduate student of Artificial Intelligence Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Dr. Sc., Prof., Professor of Artificial Intelligence Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Senior lecturer of Information, Computer and Printing Technologies Department, Ukrainian Engineering and Pedagogical Academy, Kharkiv, Ukraine

### APPLIED RESEARCH ASPECTS OF INTELLECTUAL PROCESS BASED ON THE CRITERIA OF RELIABILITY

**Context.** The complexity and ambiguity of the approach to the system of thermoregulation, makes it possible to meet most of the end-user requirements. Such problems are solved by creating a flexible software to manage temperature control systems. The main functional requirement for them is determined by the condition of thermal comfort: maintain the desired optimum temperature within the permissible limits of its rejection. Similar systems operate in conditions of uncertainty. In the course of such tasks proposed and considered a model based on fuzzy logic.

**Objective.** Simulation of fuzzy process  $\tilde{E}$ -net for a sustainable mechanism to conflict situations. To improve system performance, you must evaluate the processes of device reliability.

**Method.** A new method for the study of intellectual processes based on the criteria of reliability. This method is based on the expansion  $\tilde{E}$ -net that can reveal internal and external uncertainty in the system.

**Objective.** Made meaningful analysis of the existing thermal control systems. The simulation of the adequacy of the system of processes, based on the consistency of properties, completeness, reliability, choice and alternatives simulated processes. Also analyzed the distributed heat supply facilities based on their clustering features of the density distribution.

**Conclusions.** Obtained scientific and practical significance of results that minimize computational costs, improve the accuracy in decision-making, as well as more detailed further maintenance of complex industrial systems.

**Keywords:** temperature control, reliability, UML-graph density.

## REFERENCES

1. Texnicheskie karakteristiki termoregulyatora RTG-32 [Electronic resource]. Access mode <http://www.twirpx.com/file/1991080/>
2. PID-regulyator s universal'nyim vkhodom i interfejsom RS-485 OVEN TRM101 [Electronic resource] Access mode. <http://termokip.com.ua/uploads/RegTemeprature/Owen/trm101.pdf>
3. Regulyator temperatury AVTB (PN16) [Electronic resource]. Access mode [http://www.amity-group.org/docs/danfoss/04\\_avtb.pdf](http://www.amity-group.org/docs/danfoss/04_avtb.pdf)
4. Charakteristika kozhuxo-trubnyx i plastinchatyx teploobmennikov [Electronic resource]. Access mode <http://www.twirpx.com/file/1991082/>
5. Kucherenko E. I., Xodak M. V. Znanie-orientirovannyye intellektual'nyye metody prinyatiya reshenij v usloviyax neopredelennosti, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, No. 4(35), pp. 45–51.
6. Bodyanskij E. V., Kucherenko E. I., Mixalev A. I. Neiro-fazzi seti Petri v zadachax modelirovaniya slozhnyx sistem (monografiya – nauchnoe izdanie). Dnipropetrovs'k, Sistemni tehnologii, 2005, 311 p.
7. Shirokov A. M. Nadezhnost' radioelektronnyx ustrojstv. Moscow, Vysshaya shkola, 1972, 267 p.
8. Everitt B., Landau S., Leese M., Stahl D. Cluster Analysis. John Wiley & Sons Ltd, 2011, 330 p.
9. Kucherenko E. I., Glushenkov S. A., Glushenkova I. S. Nechetkoe razbienie ob'ektov na osnove kriteriev plotnosti, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 1, pp. 32–39.
10. Ballard P. JavaScript in 24 Hours. Indiana, SAMS, 2015, 416 p.
11. Zakas N. Professional JavaScript for Web Developers, Moscow, Piter, 2015, 960 p.

Zhengbing Hu<sup>1</sup>, Yevgeniy V. Bodyanskiy<sup>2</sup>, Oleksii K. Tyshchenko<sup>3</sup>, Viktoriia O. Samitova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of School of Educational Information Technology, Central China Normal University, Wuhan, China

<sup>2</sup>Dr.Sc., Professor, Professor of AI department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Ph.D., Senior Researcher, Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>4</sup>Post-Graduate student, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## FUZZY DATA CLUSTERING IN THE RANK SCALE BASED ON A DOUBLE NEO-FUZZY NEURON

**Context.** A task of data classification under conditions of clusters' overlapping is considered in this article. Besides that, it's assumed that information to be processed is given in the rank scale.

**Objective.** It's proposed to use a double neo-fuzzy neuron for classification which is a modification of a traditional neo-fuzzy neuron with specially designed asymmetrical membership functions and improved approximating properties.

**Method.** The double neo-fuzzy neuron (just like the traditional one) is designated for processing data given the scale of natural numbers. However, the situation may become complicated greatly if source data is not given in the numerical scale but in the ordinal one which is a quite common case for a wide variety of practical tasks.

**Results.** A gradient minimization procedure with a variable learning step parameter was used for learning the double neo-fuzzy neuron. The proposed approach to fuzzy classification for data given in the ordinal scale based on the double neo-fuzzy neuron which is learnt with the help of a high-speed algorithm possesses additional smoothing properties. The clustering accuracy for a training sample and the test one as well as the system's learning speed were measured during experiments. The proposed architecture of the double neo-fuzzy neuron is a sort of compromise between a traditional neo-fuzzy neuron and its extended modification. This architecture demonstrates good performance in those cases when the results' accuracy has more influence compared to the elapsed time used for data processing.

**Conclusions.** Experimental implementation (for both artificial and real-world data) proved efficiency of the proposed techniques. During the experiments, properties of the proposed system were studied which confirmed usability of the proposed system for a wide range of Data Mining tasks.

**Keywords:** neuro-fuzzy system, Computational Intelligence, membership function, fuzzy clustering, neo-fuzzy neuron, rank scale.

### NOMENCLATURE

ANFIS is an adaptive neuro-fuzzy inference system;

$x(k)$  is a vector of input values;

$x_i(k)$  is the  $i$ -th component of  $x(k)$ ;

$y(k)$  is an output signal of the double neo-fuzzy neuron;

$\mu_{ji}$  is a membership function of the  $i$ -th component in a vector of input values for the  $j$ -th centroid;

$w_{ji}(k)$  is a synaptic weight for the  $j$ -th membership function of the  $i$ -th component;

$NS_i$  is the  $i$ -th neo-fuzzy synapse;

$e(k)$  is an error at a time step  $k$ ;

$E$  an objective function;

$d(k)$  is an external reference signal;

$\eta$  is a learning rate parameter that usually defines a convergence speed of a learning process;

$n$  is a number of neo-fuzzy synapses;

$m_i$  is a number of membership functions;

$u(k)$  is an output signal of the first layer of the double neo-fuzzy neuron;

$c_{ji}$  is a center of the  $j$ -th membership function of the  $i$ -th component;

$x_i^r$  is a linguistic variable;

$r_i$  is a corresponding rank;

$D$  a sample of learning signals.

### INTRODUCTION

Hybrid systems of Computational Intelligence and especially adaptive neuro-fuzzy systems are currently

popular for solving pattern recognition, classification etc. tasks under conditions of substantial uncertainty about a data distribution's nature and mutual classes' overlapping [1–4].

Main drawbacks of these systems are their bulkiness (for example, a five-layer ANFIS [2] and other similar systems) and a low convergence speed for corresponding learning algorithms that requires big volumes of training samples.

To overcome these shortcomings, an architecture of a neo-fuzzy neuron was introduced for neuro-fuzzy systems [5, 6] which is similar in its architecture to a traditional formal neuron with  $n$  inputs, although it contains nonlinear synapses  $NS_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  (instead of traditional synaptic weights). These nonlinear synapses are formed by a set of triangular symmetrical membership functions  $\mu_{ji}$  ( $j = 1, 2, \dots, m_i$ ) which are equally distributed in the interval  $[0, 1]$ . Each membership functions is connected to its own adjustable weight  $w_{ji}$ .

An output of the neo-fuzzy neuron in response to a presented image  $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$  (here  $k = 1, 2, \dots, N$  stands for either a number of an image  $x(k)$  in a training set or a current discrete time item) can be written down like

$$y(k) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i(k)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k))w_{ji}(k),$$

where  $w_{ji}(k)$  is a current meaning of an adjustable synaptic weight in a time moment  $k$  for the  $j$ -th membership function of the  $i$ -th component of an input signal.

The standard square error is commonly used as a learning criterion of the neo-fuzzy neuron

$$E(k) = \frac{1}{2}(d(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2}e^2(k) = \frac{1}{2}\left(d(k) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k))w_{ji}\right)^2.$$

Minimizing this function with the help of a gradient procedure leads to a learning algorithm [6]

$$w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta e(k) \mu_{ji}(x_i(k))$$

where  $d(k)$  is an external reference signal,  $\eta$  is a learning rate parameter that is usually chosen empirically and defines a convergence speed of a learning process.

Centers of triangular membership functions  $\mu_{ji}$  are located in such a way that the Ruspini (unity) partition is provided, i.e.

$$\sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k)) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

that makes introduction of a hidden defuzzification layer unnecessary (one can usually find this layer in most of neuro-fuzzy systems).

An architecture of a double neo-fuzzy neuron was introduced in [7] to improve approximating properties of the neo-fuzzy neuron.

## 1 PROBLEM STATEMENT

Initial data for solving the fuzzy clustering task is a set (a sample) of images formed by  $N$   $n$  – dimensional feature vectors  $X = \{x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)\}$  (here

$x(k) = \{x_i^{r_i}(k)\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $r_i = 1, 2, \dots, m_i$  is a rank of a

specific value of a linguistic variable in the  $i$ -th coordinate of the  $n$  – dimensional space for the  $k$ -th observation) and a sample of reference signals where  $d(k) = d^{r_0}(k)$ ,  $r_0 = 1, 2, \dots, m_0$ , is a rank of a reference signal's value in the sample  $D$ . After the double neo-fuzzy neuron has been learnt in data ranking, a partition of an initial data array  $X$  into  $m_0$  overlapping classes with membership functions  $\mu_{l0}$  of the  $k$ -th image to the  $l$ -th class should be provided.

## 2 REVIEW OF THE LITERATURE

A new relational fuzzy clustering method (FRFP) was proposed in [8]. This procedure is based on determining a fixed point of a function of the desired membership matrix. The produced membership matrices are in some sense less crisp than those produced by NERFCM and more representative of the proximity matrix that is used as input to the clustering process.

An algorithm for finding a fuzzy membership matrix in case of numerical and categorical features is described in [9]. A set of feature vectors with mixed features is mapped into a set of feature vectors with only real-valued components. The only condition for this situation is that a

new set of vectors has the same proximity matrix as the original feature vectors. And then FCM is used for clustering of the new set of vectors.

An article [10] introduces another fuzzy relational clustering method for finding a fuzzy membership matrix. Objects' clustering may be performed by describing objects in terms of feature vectors as well as on the basis of relational data. And the relational data may be considered in terms of proximities between objects. Finally, proximities between membership vectors should be proportional to proximities between objects. Components' values of a membership vector corresponding to an object are membership degrees of an object in various clusters. In other words, a membership vector is just a sort of a feature vector.

A method where unknown numeric variables are assigned to ordinal values is described in [11]. Minimizing a clustering objective function means finding numeric values for these variables. The proposed method clustering utilizes the same objective function which is used by the FCM algorithm except the fact that both a membership function and an ordinal to real mapping are determined by the gradient descent method.

An introduced clustering method [12] is based on a modified FCM version. Input data features are considered as linguistic variables. A set of fuzzy numbers actually describes any feature. The modified method makes it possible to find an appropriate number of clusters. Besides that, it's claimed that this algorithm possesses some improved robust characteristics when compared to the traditional FCM.

A new algorithm for developing a mapping of ordinal values into numerical ones is presented in [13] for which a measure of dissimilarity exists. This method is a part of the well-known FCM procedure. The modified algorithm demonstrates better data partition into clusters as well as an ordinal-numerical mapping that reveals hidden structural knowledge of an ordinal feature.

A clustering algorithm is presented in [14] for data sets of mixed features (nominal, numerical and ordinal). The algorithm aims at reducing a negative effect from noise. An optimization function utilizes the likelihood for each individual feature as an optimization criterion for similarity or likeliness between patterns and clusters which is a quite opposite idea compared to FCM based on distances or the EM clustering algorithm. It's claimed that this method can quickly find fuzzy clusters with different distributions in each feature level.

An article [15] discusses a method for representation of ordinal values by fuzzy sets on a fixed interval of real values. This procedure contains centroids determined by a frequency distribution on ordinal values. Then triangular and trapezoidal fuzzy sets can be found that have these centroids by means of the gradient descent method. The obtained fuzzy sets do not share parameters which would be the case if an end point of one fuzzy set was a vertex of an adjacent fuzzy set.

That's why we would like to propose a new fuzzy clustering method based on the double neo-fuzzy neuron designated for clustering rank (ordinal) data. At the same time, this method possesses robust characteristics.

### 3 MATERIALS AND METHODS

An architecture of the double neo-fuzzy neuron is shown in Fig. 1.

It consists of two layers: the first layer is formed by  $n$  nonlinear synapses  $NS_i$  with  $m_i$  membership functions and synaptic weights for each nonlinear synapses; the output layer is formed by a nonlinear synapses  $NS_0$  with  $m_0$  membership functions  $\mu_{l0}$  ( $l=1,2,\dots,m_0$ ) and synaptic weights  $w_{l0}$ .

If an image  $x(k)$  is fed to the input of the double neo-fuzzy neuron, an output signal is

$$\begin{aligned} y(k) &= f_0(u(k)) = f_0\left(\sum_{i=1}^n f_i(x_i(k))\right) = \sum_{l=1}^{m_0} \mu_{l0}(u(k))w_{l0} = \\ &= \sum_{l=1}^{m_0} \mu_{l0}\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k))w_{ji}\right)w_{l0}. \end{aligned}$$

It can be seen that a value of the output signal of the double neo-fuzzy neuron is defined by components'  $x_i(k)$  values for an input image as well as by values of  $\left(\sum_{i=1}^n m_i + m_0\right)$  membership functions and their corresponding synaptic weights.

Triangular membership functions that are equally distributed in the interval  $[0,1]$  and meet the condition (1) can be written down like

$$\mu_{li}(x_i) = \begin{cases} \frac{c_{2i} - x_i}{c_{2i}}, & x_i \in [0, c_{2i}], \\ 0, & x_i \notin [0, c_{2i}], \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{ji}(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i - c_{j-1,i}}{c_{ji} - c_{j-1,i}}, & x_i \in [c_{j-1,i}, c_{ji}], \\ \frac{c_{j+1,i} - x_i}{c_{j+1,i} - c_{ji}}, & x_i \in [c_{ji}, c_{j+1,i}], \\ j = 2, \dots, m_i - 1, \\ 0 \text{ otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

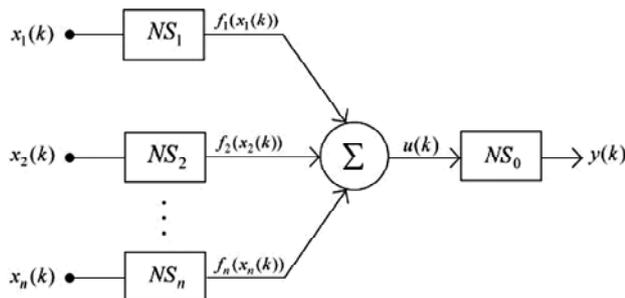


Figure 1 – An architecture of the double neo-fuzzy neuron

$$\mu_{m_i i}(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i - c_{m_i-1,i}}{1 - c_{m_i-1,i}}, & x_i \in [c_{m_i-1,i}, 1], \\ 0, & x_i \notin [c_{m_i-1,i}, 1], \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{l0}(u) = \begin{cases} \frac{c_{20} - u}{c_{20}}, & u \in [0, c_{20}], \\ 0, & u \notin [0, c_{20}], \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{l0}(u) = \begin{cases} \frac{u - c_{l-1,0}}{c_{l0} - c_{l-1,0}}, & u \in [c_{l-1,0}, c_{l0}], \\ \frac{c_{l+1,0} - u}{c_{l+1,0} - c_{l0}}, & u \in [c_{l0}, c_{l+1,0}], \\ l = 2, \dots, m_0 - 1, \\ 0 \text{ otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{m_0 0}(u) = \begin{cases} \frac{u - c_{m_0-1,0}}{1 - c_{m_0-1,0}}, & u \in [c_{m_0-1,0}, 1], \\ 0, & u \notin [c_{m_0-1,0}, 1] \end{cases} \quad (7)$$

(here  $c_{ji}$  and  $c_{l0}$  are centers of corresponding membership functions). Wherein a distance between centers is constant for each nonlinear synapse and can be written like

$$c_{ji} - c_{j-1,i} = (m_i - 1)^{-1},$$

$$c_{l0} - c_{l-1,0} = (m_0 - 1)^{-1}.$$

Using the Ruspini (unity) partition leads to the fact that only two neighboring membership functions are activated at every learning step. Denoting these membership functions  $\mu_{pi}$ ,  $\mu_{p+1,i}$  ( $i = 0, 1, \dots, n$ ), we can write down

$$\begin{aligned} f_i(x_i(k)) &= \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k))w_{ji}(k) = \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k) + \\ &+ \mu_{p+1,i}(x_i(k))w_{p+1,i}(k) = \frac{c_{p+1,i} - x_i(k)}{c_{p+1,i} - c_{pi}} w_{pi}(k) + \\ &+ \frac{x_i(k) - c_{p,i}}{c_{p+1,i} - c_{pi}} w_{p+1,i}(k) = a_i(k)x_i(k) + b_i(k), \end{aligned}$$

where

$$a_i(k) = \frac{w_{p+1,i}(k) - w_{pi}(k)}{c_{p+1,i} - c_{pi}},$$

$$b_i(k) = \frac{c_{p+1,i}w_{pi}(k) - c_{pi}w_{p+1,i}(k)}{c_{p+1,i} - c_{pi}}$$

and

$$u(k) = \sum_{i=1}^n a_i(k)x_i(k) + b_i(k),$$

$$y(k) = \sum_{l=1}^{m_0} \mu_{l0}(u(k))w_{l0}(k) = \mu_{p0}(u(k))w_{p0}(k) +$$

$$+ \mu_{p+1,0}(u(k))w_{p+1,0}(k) = \frac{c_{p+1,0} - u(k)}{c_{p+1,0} - c_{p0}} w_{p0}(k) +$$

$$+ \frac{u(k) - c_{p0}}{c_{p+1,0} - c_{p0}} w_{p+1,0}(k) = a_0(k)u(k) + b_0(k).$$

where

$$a_0(k) = \frac{w_{p+1,0}(k) - w_{p0}(k)}{c_{p+1,0} - c_{p0}},$$

$$b_0(k) = \frac{c_{p+1,0}w_{p0}(k) - c_{p0}w_{p+1,0}(k)}{c_{p+1,0} - c_{p0}}.$$

Thus, the double neo-fuzzy neuron provides piecewise-linear approximation of some nonlinear separating function in the form

$$y(k) = a_0(k) \left( \sum_{i=1}^n a_i(k)x_i(k) + b_i(k) \right) + b_0(k)$$

where parameters  $a_i(k)$  and  $b_i(k)$  to be tuned are defined by both values of corresponding membership functions and trained synaptic weights.

The double neo-fuzzy neuron (just like the traditional one) is designated for data processing given in the scale of natural numbers. A situation is getting substantially more complicated when initial data are given in the ordinal (rank) scale. This sort of cases can be often encountered in sociology, economics, medicine, education, etc. [16]. For a one-dimensional case this information is given in the form of an ordered sequence of linguistic variables

$$x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{r_i}, \dots, x_i^{m_i}, 1 \leq \dots \leq r_i - 1 \leq r_i \leq r_{i+1} \leq \dots \leq m_i \leq \dots \leq N$$

where  $x_i^{r_i}$  is actually a linguistic variable,  $r_i$  is a corresponding rank.

It was offered in [12, 15, 17] to perform fuzzification for initial data based on the occurrence frequency distribution analysis of specific linguistic variables for processing data given in the ordinal scale. It was also assumed that these distributions were subject to the Gaussian law. There was an approach in [18] that was not associated with the normal distribution hypothesis which we will use in the future. Thus, initial data for solving the fuzzy clustering task is a set (a sample) of images formed by  $N$   $n$ -dimensional feature vectors  $X = \{x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)\}$  (here

$$x(k) = \{x_i^{r_i}(k)\}, i = 1, 2, \dots, n, r_i = 1, 2, \dots, m_i \text{ is a rank of a specific value of a linguistic variable in the } i\text{-th coordinate of the } n\text{-dimensional space for the } k\text{-th observation) and a sample of reference signals } D = \{d(1), d(2), \dots, d(k), \dots, d(N)\} \text{ where } d(k) = d^{r_0}(k),$$

$r_0 = 1, 2, \dots, m_0$  is a rank of a reference signal's value in the sample  $D$ . After the double neo-fuzzy neuron has been learnt in data ranking, a partition of an initial data array  $X$  into  $m_0$  overlapping classes with membership functions  $\mu_{l0}$  of the  $k$ -th image to the  $l$ -th class should be provided.

The fuzzification procedure for a sequence of rank linguistic variables should be considered by an example of a one-dimensional sample  $x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(N)$  where every observation  $x_i(k)$  may be assigned to one of the ranks  $r_i$ ,  $r_i = 1, 2, \dots, m_i$ .

Let's assume that a value  $x_i(k)$  (that corresponds to the  $r_i$ -th rank) is met  $N_{r_i}$  times in the dataset. Then a relative occurrence frequency may be introduced for the  $r_i$ -th rank,  $r_i = 1, 2, 3, \dots, m_i$ . In this case, this condition should be met

$$\sum_{r_i=1}^{m_i} f_{r_i} = 1.$$

Based on the obtained frequencies, asymmetrical unevenly located membership functions  $\mu_{ji}$  and  $\mu_{l0}$  are formed with centers which are calculated with the help of recurrent ratios

$$c_{1i} = 0.5f_{1i}; c_{ji} = c_{j-1,i} + 0.5(f_{r_i-1} + f_{r_i}), j = 1, 2, \dots, m_i.$$

These membership functions are computed with the help of expressions similar to the expressions (2)–(7). The only difference is that one should use

$$\mu_{1i}(x_i) = \begin{cases} 1, x_i \in [0, c_{1i}], \\ \frac{c_{2i} - x_i}{c_{2i} - c_{1i}}, x_i \in [c_{1i}, c_{2i}], \\ 0, x_i \notin [0, c_{2i}] \end{cases} \quad (8)$$

instead of the expression (2),

$$\mu_{m_i i}(x_i) = \begin{cases} \frac{x_i - c_{m_i-1,i}}{c_{m_i i} - c_{m_i-1,i}}, x_i \in [c_{m_i-1,i}, c_{m_i i}], \\ 1, x_i \in [c_{m_i i}, 1], \\ 0, x_i \notin [c_{m_i-1,i}, 1] \end{cases} \quad (9)$$

instead of the expression (4),

$$\mu_{10}(u) = \begin{cases} 1, u \in [0, c_{10}], \\ \frac{c_{20} - u}{c_{20}}, u \in [c_{10}, c_{20}], \\ 0, u \notin [0, c_{20}] \end{cases} \quad (10)$$

instead of the expression (5),

$$\mu_{m_0 0}(u) = \begin{cases} \frac{u - c_{m_0-1,0}}{c_{m_0 0} - c_{m_0-1,0}}, & u \in [c_{m_0-1,0}, c_{m_0 0}], \\ 1, & u \in [c_{m_0 0}, 1], \\ 0, & u \notin [c_{m_0-1,0}, 1] \end{cases} \quad (11)$$

instead of the expression (7).

A way of setting membership functions (3), (6), (8), (9), (10), (11) also provides meeting the condition (1).

A gradient minimization procedure with a variable parameter of a search step  $\eta_i(k)$  should be used for learning the double neo-fuzzy neuron. An algorithm for tuning an output synapse  $NS_0$  can be written down in the form

$$\begin{cases} w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k) + \eta_0(k)e(k)\mu_{l0}(u(k)), l = p, p+1, \\ w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k), \forall l \neq p \neq p+1. \end{cases} \quad (13)$$

Thus, the weights are adjusted at every iteration step. These weights correspond to activated membership functions  $\mu_{p0}$  and  $\mu_{p+1,0}$ . To increase the convergence speed and to introduce additional smoothing properties, it's expedient to use an algorithm in the form of [19]

$$\begin{cases} w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k) + \eta_0^{-1}(k)e(k)\mu_{l0}(u(k)), l = p, p+1, \\ \eta_0(k+1) = \alpha\eta_0(k) + \mu_{p0}^2(u(k+1)) + \mu_{p+1,0}^2(u(k+1)), \\ w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k), \forall l \neq p \neq p+1, \\ 0 \leq \alpha \leq 1 \end{cases} \quad (14)$$

which coincides (when  $\alpha = 0$ ) with the one-step optimal algorithm by Kaczmarz-Widrow-Hoff [20, 21] and when  $\alpha = 1$  it coincides with the stochastic approximation procedure by Goodwin-Ramagge-Caines [22, 23].

To tune the synaptic weights of the first layer, a learning criterion can be written down like

$$E(k) = \frac{1}{2}(d(k) - f_0(u(k)))^2 = \frac{1}{2}(d(k) - f_0(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \mu_{ji}(x_i(k))w_{ji})). \quad (15)$$

Introducing a derivative

$$\frac{\partial E(k)}{\partial w_{ji}} = -e(k) \frac{\partial f_0(u(k))}{\partial u(k)} \cdot \frac{\partial u(k)}{\partial w_{ji}} = -e(k)a_0(k) \frac{\partial u(k)}{\partial w_{ji}},$$

the gradient minimization procedure (15) can be written down in the form

$$\begin{cases} w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta_i(k)e(k)a_0(k)\mu_{ji}(x_i(k)), \\ j = p, p+1; i = 1, 2, \dots, n, \\ w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k), \forall j \neq p \neq p+1 \end{cases}$$

where  $\eta_i(k)$  is a step parameter to be defined.

Introducing a designation

$$\mu_{ji0}(x_i(k)) = a_0(k)\mu_{ji}(x_i(k))$$

and using optimization techniques from [24, 25], we come to a simple and effective learning procedure for nonlinear synapses of the first layer

$$\begin{cases} w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k) + \eta_i^{-1}(k)e(k)\mu_{ji0}(x_i(k)), \\ j = p, p+1; i = 1, 2, \dots, n, \\ \eta_i(k+1) = \alpha\eta_i(k) + \mu_{pi0}^2(x_i(k+1)) + \mu_{p+1,i0}^2(x_i(k+1)), \\ w_{ji}(k+1) = w_{ji}(k), \forall j \neq p \neq p+1, \\ 0 \leq \alpha \leq 1 \end{cases}$$

which completely structurally coincides with the procedure (14).

#### 4 EXPERIMENTS

We chose the sample Nursery from the UCI Repository [26] for the first experiment to demonstrate effectiveness of the proposed neuro-fuzzy system based on the double neo-fuzzy neuron and its learning method for our first experiment. The sample contained 12958 observations with 8 ordinal attributes for each one. The sample was divided into a training one and a test one with a ratio 70/30.

A set of experiments was performed for the second experiment for an adaptive fuzzy clustering method based on the double neo-fuzzy neuron. A synthetic sample was created for this purpose that consisted of 3 non-overlapping clusters, and 20% outliers were additionally added. The generated sample was ranked in heterogeneously broken ranges from 1 to 7 in order to obtain ordinal attributes. The sample is shown in Fig. 2. There's a separate enlarged sampling area on the right where outliers have been previously cut off.

#### 5 RESULTS

We were comparing results obtained from architectures based on the traditional neo-fuzzy neuron, the double neo-fuzzy neuron and the extended neo-fuzzy neuron [27–32]. During the experiment, we were measuring the clustering accuracy for the training sample and the test one as well as the system's learning speed. The results are demonstrated in Table 1.

One can see clustering results of the second experiment with the help of the FCM algorithm (Fig. 3) that's known for its instability to outliers and partition with the help of the adaptive fuzzy clustering methods based on the double neo-fuzzy neuron. Outliers don't influence the result when we apply the adaptive procedure while traditional methods are hypersensitive to observations that lie far enough from all prototypes (centroids).

Table 1 – Clustering results for the dataset Nursery

Neuro-fuzzy Systems	Learning time, sec	Training error	Test error
NFN	1,30	0,0167	0,0171
DNFN	1,45	0,0121	0,0127
ENFN	1,74	0,0076	0,084

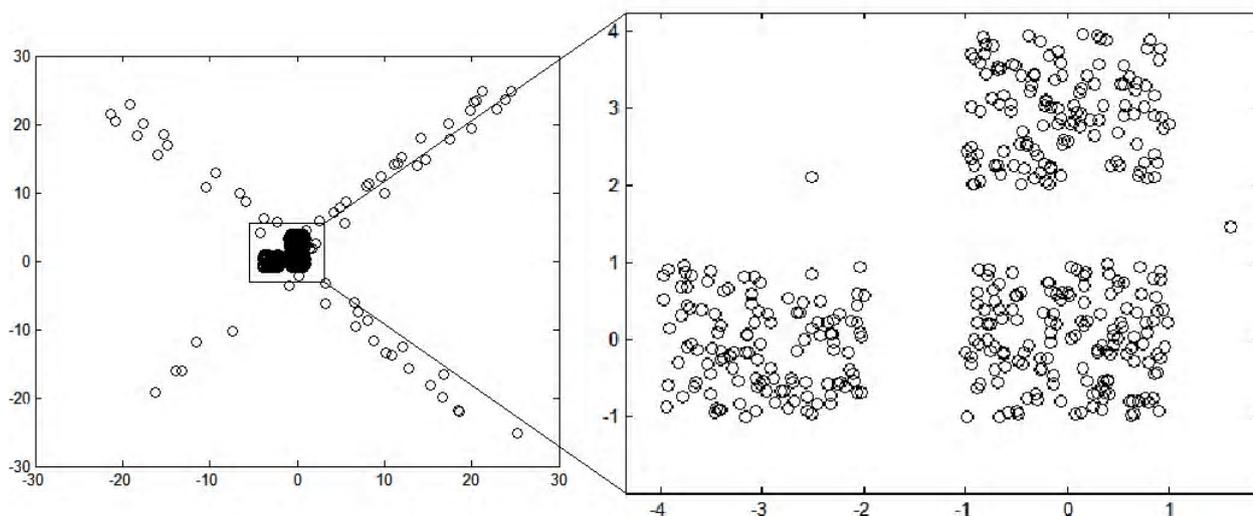


Figure 2 – An initial dataset

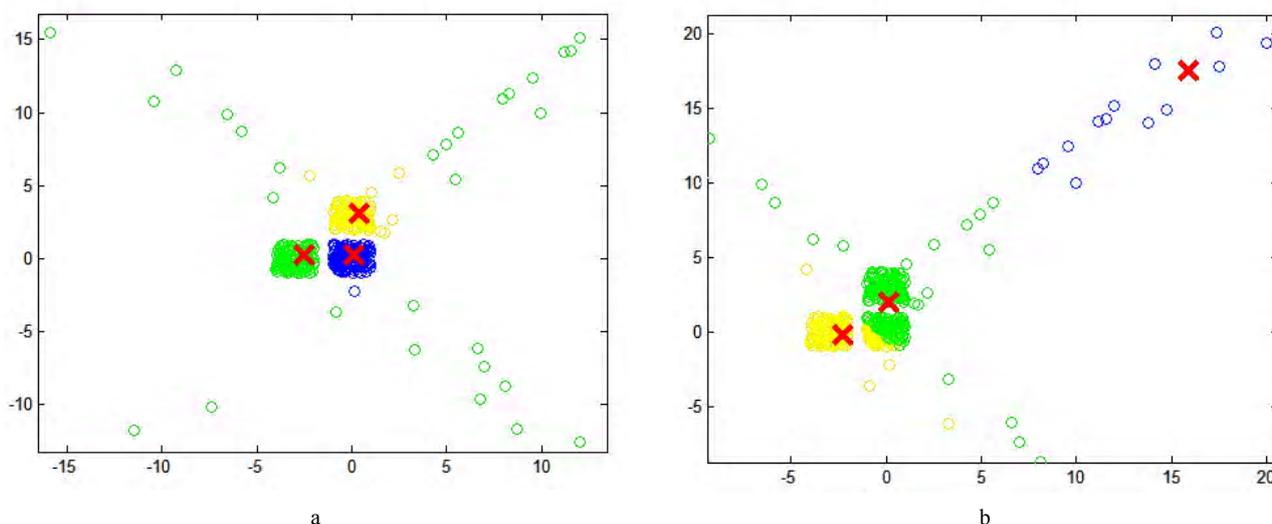


Figure 3 – Comparing methods: a – with the help of FCM; b – a result of the adaptive fuzzy clustering based on the double neo-fuzzy neuron

## 6 DISCUSSION

We could come to a conclusion that if we need higher accuracy we should use either ENFN or DNFN (here everything depends on a level of accuracy you'd like to achieve). But if there's a system that's characterized by some speedy reasoning, probably the traditional NFN would be of a great benefit. Speaking of the demonstrated performance, DNFN was 12% slower than the conventional NFN and 20% faster than ENFN. Speaking of forecasting accuracy, DNFN was 35% better than NFN and about 50% worse compared to ENFN.

As it can be seen in Fig. 3, FCM and the proposed method demonstrated different partition. Although both algorithms divided all the data into 3 clusters but FCM assigned all outliers/tails into one cluster that was previously determined (Fig. 3a). At the same time, the proposed method carried out a more reasonable partition. A part of outliers/tails was assigned to a new cluster. Frankly speaking, the adaptive fuzzy clustering method performed more like what a human expert would do. It demonstrated the fact that it was more robust compared to FCM.

Considering the results, we can assert that the proposed system provides high-quality clustering for ordinal data. The additional layer if the proposed neuro-fuzzy system makes it possible to increase the clustering accuracy, although it may take a little longer if we talk about the learning time.

## CONCLUSIONS

It has been widely known that pattern vectors to be clustered may have attributes of various types including ordinal. Ordinal attributes with values such as «poor», «very poor», «good», and «very good» are neither entirely numerical nor entirely qualitative. That's why it leads to some troubles with clustering since it doesn't make any sense to take differences of values for these ordinal attributes as it is required for finding distances between pattern vectors.

An approach to fuzzy data clustering in the ordinal (rank) scale based on the double neo-fuzzy neuron is proposed. The double neo-fuzzy neuron is learnt by a fast learning algorithm that possesses additional smoothing properties.

The obtained results make it possible to process data (given in both the numerical and rank scales) effectively. Multiple simulations demonstrated that the algorithm was quite efficient.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This scientific work was supported by RAMECS and CCNU16A02015.

#### REFERENCES

- Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms / J. C. Bezdek. – N.Y. : Plenum Press, 1981. – 272 p.
- Jang J.-Sh. R. Neuro-Fuzzy and Soft Computing / J.-Sh. R. Jang, Ch.-T. Sun, E. Mizutani. – Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, 1997. – 614 p.
- Hoeppner F. Fuzzy Cluster Analyse / F. Hoeppner, F. Klawonn, R. Kruse. – Braunschweig : Vieweg, 1999. – 280 p.
- Nelles O. Nonlinear System Identification / O. Nelles. – Berlin : Springer, 2001. – 785 p.
- A neo-fuzzy neuron and its applications to system identification and prediction of the system behavior / [T. Yamakawa, E. Uchino, T. Miki, H. Kusanagi] // IIZUKA – 92: 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka, Japan, 1992 : proceedings. – P. 477–483.
- Miki T. Analog implementation of neo-fuzzy neuron and its onboarding learning / T. Miki, T. Yamakawa // Ed. by N. S. Mastorakis «Computational Intelligence and Application». – Piraeus : WSES Press, 1999. – P. 144–149.
- Evolving network based on double neo-fuzzy neurons / [Ye. Bodyanskiy, Ye. Gorshkov, V. Kolodyazhnyi, P. Otto] // Computer Science Meets Automation : 52<sup>nd</sup> Int. Scientific Coll., TU Ilmenau (Thuer), 2007: proceedings. – P. 35–40.
- Brouwer R. K. Fuzzy Relational Fixed Point Clustering / R. K. Brouwer // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2009. – Vol. 2, Iss.1. – P. 69–82.
- Brouwer R. K. Clustering feature vectors with mixed numerical and categorical attributes / R. K. Brouwer // International Journal of Computational Intelligence Systems. – 2008. – Vol. 1, Iss. 4. – P. 285–298.
- Brouwer R. K. Fuzzy relational clustering based on comparing two proximity matrices with utilization of particle swarm optimization / R. K. Brouwer, A. Groenwold // Soft Computing. – 2009. – Vol. 13, Iss. 6. – P. 577–589.
- Brouwer R. K. Fuzzy clustering of feature vectors with some ordinal valued attributes using gradient descent for learning / R. K. Brouwer // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. – 2008. – Vol. 16, No. 2. – P. 195–218.
- Butkiewicz B.S. Robust fuzzy clustering with fuzzy data / B. S. Butkiewicz // Lecture Notes in Computer Science. – V. 3528. – Berlin-Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – P. 76–82.
- Lee M. Fuzzy Clustering and Mapping of Ordinal Values to Numerical / M. Lee, R. K. Brouwer // IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007), 2007. – P. 538–543.
- Lee M. Likelihood Based Fuzzy Clustering for Data Sets of Mixed Features / M. Lee, R. K. Brouwer // IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007), 2007. – P. 544–549.
- Brouwer R. K. Fuzzy set covering of a set of ordinal attributes without parameter sharing / R. K. Brouwer // Fuzzy Sets and Systems. – 2006. – Vol. 157, № 13. – P. 1775–1786.
- Лбов Г. С. Методы обработки разнотипных экспериментальных данных / Г. С. Лбов. – Новосибирск : Наука, 1985. – 160 с.
- Brouwer R. K. A feedforward neural network for mapping vectors to fuzzy sets of vectors / R. K. Brouwer, W. Pedrycz // Processing ICANN/ICOMP 2003: Int. Conf. on Artificial Neural Networks and Neural Information, Istanbul, Turkey, 2003. – P. 45–48.
- Бодянский Е. В. Нечеткая кластеризация данных, заданных в порядковой шкале / Е. В. Бодянский, В. А. Опанасенко, А. Н. Слипченко // Системы обработки информации. – 2007. – Вып. 4(62). – С. 5–9.
- Бодянский Е. В. Многошаговые оптимальные упределители многомерных нестационарных стохастических процессов / Е. В. Бодянский, И. П. Плисс, Т. В. Соловьева // Доклады АН УССР. – 1986. – Сер. А, №12. – С. 47–49.
- Kaczmarz S. Approximate solution of systems of linear equations / S. Kaczmarz // Int. J. Control. – 1993. – № 53. – P. 1269–1271.
- Widrow B. Adaptive switching circuits / B. Widrow, M. E. Hoff Jr. // 1960 IRE Western Electric Show and Connection Record. – 1960. – Part 4. – P. 96–104.
- Goodwin G. C. Discrete time stochastic adaptive control / G. C. Goodwin, P. J. Ramadge, P. E. Caines // SIAM J. Control and Optimization. – 1981. – № 19. – P. 829–853.
- Goodwin G. C. A globally convergent adaptive predictor / G. C. Goodwin, P. J. Ramadge, P. E. Caines // Automatica. – 1981. – № 17. – P. 135–140.
- Бодянский Е. В. Адаптивные алгоритмы идентификации нелинейных объектов управления / Е. В. Бодянский // АСУ и приборы автоматики. – Харьков : Выща школа. – 1987. – Вып. 81. – С. 43–46.
- Bodyanskiy Ye. An adaptive learning algorithm for neuro-fuzzy network / Ye. Bodyanskiy, V. Kolodyazhnyi, A. Stephan // Ed. by B. Reusch «Computational Intelligence. Theory and Applications». – Berlin-Heidelberg, – New York : Springer, 2001. – P. 68–75.
- UCI machine learning repository [Electronic resource]. – Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/>.
- Bodyanskiy Ye. Adaptive learning of an evolving cascade neo-fuzzy system in data stream mining tasks / Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko, D. Kopaliani // Evolving Systems. – 2016. – Vol. 7, No. 2. – P. 107–116.
- Bodyanskiy Ye. An Extended Neo-Fuzzy Neuron and its Adaptive Learning Algorithm / Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko, D. Kopaliani // I. J. Intelligent Systems and Applications (IJISA). – 2015. – Vol. 7, No. 2. – P. 21–26.
- Bodyanskiy Ye. A hybrid cascade neural network with an optimized pool in each cascade / Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko, D. Kopaliani // Soft Computing. A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications (Soft Comput). – 2015. – Vol. 19, Iss. 12. – P. 3445–3454.
- An Evolving Cascade System Based on a Set of Neo-Fuzzy Nodes / [Zhengbing Hu, Yevgeniy V. Bodyanskiy, Oleksii K. Tyshchenko, Olena O. Boiko] // International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). – 2016. – Vol. 8, No. 9. – P. 1–7.
- Бодянский Е. В. Еволюційна каскадна система на основі нейро-фаззі вузлів / Е. В. Бодянский, О. К. Тищенко, О. О. Бойко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – №2(37). – С. 40–45.
- Bodyanskiy Ye. A Multidimensional Cascade Neuro-Fuzzy System with Neuron Pool Optimization in Each Cascade / Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko, D. Kopaliani // Int. Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS). – 2014. – Vol. 6, No. 8. – P. 11–17.

Article was submitted 14.12.2016.

After revision 27.01.2017.

Женьбінг Гу<sup>1</sup>, Бодянський Є. В.<sup>2</sup>, Тищенко О. К.<sup>3</sup>, Самітова В. А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Школи освітніх інформаційних технологій, Central China Normal University, Вухань, Китай

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, професор, професор кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, науковий керівник Проблемної НДЛ АСУ, Харків, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, старший науковий співробітник Проблемної НДЛ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>4</sup>Аспірантка кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

### **НЕЧІТКА КЛАСТЕРИЗАЦІЯ ДАНИХ У РАНГОВІЙ ШКАЛІ НА ОСНОВІ ПОДВІЙНОГО НЕО-ФАЗЗИ НЕЙРОНУ**

**Актуальність.** У статті розглянуто задачу кластерування даних за умов кластерів, що перетинаються. Передбачено, що оброблювану інформацію задано в ранговій (порядковій) шкалі.

**Мета.** Для кластерування запропоновано використати архітектуру спеціального вигляду – подвійний нео-фаззи нейрон, який є модифікацією класичного нео-фаззи нейрона зі спеціально сконструйованими несиметричними функціями належності та володіє поліпшеними апроксимуючими властивостями.

**Метод.** Подвійний нео-фаззи нейрон, як і звичайний нео-фаззи нейрон, призначений для обробки інформації, що її задано у шкалі натуральних чисел. Однак ситуація істотно ускладниться, якщо вихідні дані будуть задані не в числовій, а в порядковій шкалі, що досить часто зустрічається в різних практичних завданнях.

**Результати.** Для навчання подвійного нео-фаззи нейрона використовувалася градієнтна процедура мінімізації із змінним параметром кроку пошуку. Запропонований підхід до нечіткої класифікації даних у порядковій шкалі на основі подвійного нео-фаззи нейрона, що його навчають за допомогою швидкодійного алгоритму, має додаткові згладжуючі властивості. Точність кластеризації для навчальної та тестової вибірок, а також швидкість навчання системи були виміряні в ході проведення експериментів. Запропонована архітектура подвійного нео-фаззи нейрона є своєрідним компромісом між традиційним та розширеним нео-фаззи нейронами. Дана архітектура гарно себе проявила у тих випадках, коли точність результатів має більше значення, ніж час, який витрачається на обробку даних.

**Висновки.** Експериментальне моделювання (на штучних і реальних наборах даних) довело ефективність запропонованого підходу. У ході експериментів було проведено дослідження властивостей запропонованої системи, що ще раз підтвердило доцільність використання даного підходу для вирішення широкого кола завдань інтелектуального аналізу даних.

**Ключові слова:** нейро-фаззи система, обчислювальний інтелект, функція належності, нечітке кластерування, нео-фаззи нейрон, рангова шкала.

Женбинг Гу<sup>1</sup>, Бодянский Е. В.<sup>2</sup>, Тищенко А. К.<sup>3</sup>, Самитова В. А.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент Школы образовательных информационных технологий, Central China Normal University, Вухань, Китай

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, научный руководитель Проблемной НИЛ АСУ, Харьков, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, старший научный сотрудник Проблемной НИЛ АСУ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

<sup>4</sup>Аспирантка кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина

### **НЕЧЕТКАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ДАННЫХ В РАНГОВОЙ ШКАЛЕ НА ОСНОВЕ ДВОЙНОГО НЕО-ФАЗЗИ НЕЙРОНА**

**Актуальность.** В статье рассмотрена задача кластеризации данных в условиях перекрывающихся кластеров. Предполагается, что обрабатываемая информация задана в ранговой (порядковой) шкале.

**Цель.** Для кластеризации предлагается использовать архитектуру специального вида – двойной нео-фаззи нейрон, который является модификацией классического нео-фаззи нейрона со специально сконструированными несимметричными функциями принадлежности и обладающий улучшенными аппроксимируемыми свойствами.

**Метод.** Двойной нео-фаззи нейрон, как и обычный нео-фаззи нейрон, предназначен для обработки информации, заданной в шкале натуральных чисел. Однако ситуация существенным образом усложнится, если исходные данные будут заданы не в числовой, а в порядковой шкале, что довольно часто встречается в различных практических задачах.

**Результаты.** Для обучения двойного нео-фаззи нейрона использовалась градиентная процедура минимизации с переменным параметром шага поиска. Предложенный подход к нечеткой классификации данных в порядковой шкале на основе двойного нео-фаззи нейрона, обучаемого с помощью быстродействующего алгоритма, обладает дополнительными сглаживающими свойствами. Точность кластеризации для обучающей и тестовой выборок, а также скорость обучения системы были измерены в ходе проведения экспериментов. Предложенная архитектура двойного нео-фаззи нейрона является своеобразным компромиссом между традиционным и расширенным нео-фаззи нейронами. Данная архитектура хорошо себя показывает в тех случаях, когда точность результатов имеет большее значение, чем время, затрачиваемое на обработку данных.

**Выводы.** Экспериментальное моделирование (на искусственных и реальных наборах данных) доказало эффективность предлагаемого подхода. В ходе экспериментов было произведено исследование свойств предложенной системы, что еще раз подтвердило целесообразность использования предложенной системы для решения широкого круга задач интеллектуального анализа данных.

**Ключевые слова:** нейро-фаззи система, вычислительный интелект, функция принадлежности, нечеткая кластеризация, нео-фаззи нейрон, ранговая шкала.

## **REFERENCES**

1. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. N.Y., Plenum Press, 1981, 272 p.
2. Jang J.-Sh. R., Sun Ch.-T., Mizutani E. Neuro-Fuzzy and Soft Computing, Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1997, 614 p.
3. Hoepfner F., Klawonn F., Kruse R. Fuzzy Cluster Analyse. Braunschweig, Vieweg, 1999, 280 p.
4. Nelles O. Nonlinear System Identification. Berlin, Springer, 2001, 785 p.
5. Yamakawa T., Uchino E., Miki T., Kusanagi H. A neo-fuzzy neuron and its applications to system identification and prediction of the system behavior, *IIZUKA – 92: 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks, Iizuka*. Japan, 1992, proceedings, pp. 477–483.
6. Miki T., Yamakawa T. Analog implementation of neo-fuzzy neuron and its on-boarding learning, *Ed. by N. S. Mastorakis «Computational Intelligence and Application»*. Piraeus, WSES Press, 1999, pp. 144–149.

7. Bodyanskiy Ye., Gorshkov Ye., Kolodyazhniy V., Otto P. Evolving network based on double neo-fuzzy neurons, *Computer Science Meets Automation: 52<sup>nd</sup> Int. Scientific Coll., TU Ilmenau (Thuer), 2007*, proceedings, pp. 35–40.
8. Brouwer R. K. Fuzzy Relational Fixed Point Clustering, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2009, Vol. 2, Iss.1, pp. 69–82.
9. Brouwer R. K. Clustering feature vectors with mixed numerical and categorical attributes, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2008, Vol. 1, Iss. 4, pp. 285–298.
10. Brouwer R. K., Groenwold A. Fuzzy relational clustering based on comparing two proximity matrices with utilization of particle swarm optimization, *Soft Computing*, 2009, Vol. 13, Iss. 6, pp. 577–589.
11. Brouwer R. K. Fuzzy clustering of feature vectors with some ordinal valued attributes using gradient descent for learning, *International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems*, 2008, Vol. 16, No. 2, pp. 195–218.
12. Butkiewicz B. S. Robust fuzzy clustering with fuzzy data, *Lecture Notes in Computer Science*, V.3528. Berlin-Heidelberg, Springer-Verlag, 2005, pp. 76–82.
13. Lee M., Brouwer R. K. Fuzzy Clustering and Mapping of Ordinal Values to Numerical, *IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007)*, 2007, pp. 538–543.
14. Lee M., Brouwer R. K. Likelihood Based Fuzzy Clustering for Data Sets of Mixed Features, *IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence (FOCI 2007)*, 2007, pp. 544–549.
15. Brouwer R. K. Fuzzy set covering of a set of ordinal attributes without parameter, *Fuzzy Sets and Systems*, 2006, Vol. 157, No. 13, pp. 1775–1786.
16. Lbov G. S. Methods of processing different-type experimental data. Novosibirsk, Nauka, 1985, 160 p. (in Russian)
17. Brouwer R. K., Pedrycz W. A feedforward neural network for mapping vectors to fuzzy sets of vectors, *Processing ICANN/ICOMIP 2003: Int. Conf. on Artificial Neural Networks and Neural Information*, Istanbul. Turkey, 2003, pp. 45–48.
18. Bodyanskiy Ye. V., Opanasenko V. A., Slipchenko A. N. Fuzzy clustering for ordinal data, *Sistemy Obrobky Informacii*, 2007, Iss. 4(62), pp. 5–9. (in Russian)
19. Bodyanskiy Ye. V., Pliss I. P., Solovyova T. V. Multistep optimal predictors of multidimensional nonstationary stochastic processes, *Doklady AN USSR*, 1986, Iss. A, №12, pp. 47–49. (in Russian)
20. Kaczmarz S. Approximate solution of systems of linear equations, *Int. J. Control*, 1993, No. 53, pp. 1269–1271.
21. Widrow B., Hoff Jr. M. E. Adaptive switching circuits, *1960 IRE Western Electric Show and Connection Record*, 1960, Part 4, pp. 96–104.
22. Goodwin G. C., Ramadge P. J., Caines P. E. Discrete time stochastic adaptive control, *SIAM J. Control and Optimization*, 1981, No. 19, pp. 829–853.
23. Goodwin G. C., Ramadge P. J., Caines P. E. A globally convergent adaptive predictor, *Automatica*, 1981, No. 17, pp. 135–140.
24. Bodyanskiy Ye. V. Adaptive algorithms for identification of nonlinear control objects, *ASU and automation devices*. Kharkov, Vyscha skola, 1987, Iss. 81, pp. 43–46. (in Russian)
25. Bodyanskiy Ye., Kolodyazhniy V., Stephan A. An adaptive learning algorithm for neuro-fuzzy network, Ed. by B. Reusch «Computational Intelligence. Theory and Applications». Berlin-Heidelberg, New York, Springer, 2001, pp. 68–75.
26. UCI machine learning repository [Electronic resource]. Access mode: <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/>.
27. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. Adaptive learning of an evolving cascade neo-fuzzy system in data stream mining tasks, *Evolving Systems*, 2016, Vol. 7, No. 2, pp. 107–116.
28. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. An Extended Neo-Fuzzy Neuron and its Adaptive Learning Algorithm, *I. J. Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2015, Vol. 7, No. 2, P. 21–26.
29. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. A hybrid cascade neural network with an optimized pool in each cascade, *Soft Computing. A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications (Soft Comput)*, 2015, Vol. 19, Iss. 12, pp. 3445–3454.
30. Zhengbing Hu, Yevgeniy V. Bodyanskiy, Oleksii K. Tyshchenko, Olena O. Boiko An Evolving Cascade System Based on a Set of Neo-Fuzzy Nodes, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2016, Vol. 8, No. 9, pp. 1–7.
31. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Boiko O. An evolving cascade system based on neuro-fuzzy nodes, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 2(37), pp. 40–45. (in Ukrainian)
32. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. A Multidimensional Cascade Neuro-Fuzzy System with Neuron Pool Optimization in Each Cascade, *Int. Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS)*, 2014, Vol. 6, No. 8, pp. 11–17.

# ПРОГРЕССИВНИ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

## ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.94:004.932

Агаджанян А. Р.<sup>1</sup>, Лоза Е. И.<sup>2</sup>, Нариманова Е. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиотехнических устройств Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

<sup>2</sup>Аспирант Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информатики и управления защитой информационных систем Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

#### ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ СИГНАЛОВ ЭКГ С ПАТОЛОГИЯМИ

**Актуальность.** Работа посвящена актуальной проблеме генерации сигналов электрокардиограмм с искажениями, соответствующими различным патологиям. Такие сигналы могут быть использованы в качестве эталонных для создания новых и верификации существующих методов анализа биомедицинских сигналов, нацеленных на диагностику кардиологических заболеваний.

**Цель.** Целью данной работы является формирование сигналов электрокардиограмм с известными видами искажений, соответствующих распространенным патологиям. Формирование сигналов электрокардиограмм с патологиями проводилось в соответствии с заболеванием «инфаркт миокарда» как наиболее распространенного среди всех кардио заболеваний с возможным летальным исходом.

**Метод.** Изучено описание совокупности диагностических признаков заболевания, проявляющихся для элементов сигнала электрокардиограммы, в зависимости от вида инфаркта (мелкоочагового или крупноочагового) и его стадии. Для формирования сигналов электрокардиограммы с заданными патологиями проведено моделирование с использованием смещения, сдвига, масштабирования или исключения во временной области выделенных компонент нормального сигнала электрокардиограммы. В качестве метода обнаружения компонент электрокардиограммы и определения их параметров использованы методы частотно-временного анализа: непрерывное вейвлет-преобразование с материнской функцией «Мексиканская шляпа» и вейвлет-преобразование с вейвлет-функцией «fio1.5».

**Результаты.** Удалось сформировать сигналы электрокардиограмм без патологий, а также с патологиями в виде мелкоочагового и крупноочагового инфаркта. На основании проведенного частотно-временного анализа полученных электрокардиограмм удалось определить особенности искусственно сформированных сигналов, отвечающие заложенным патологиям.

**Выводы.** Решена задача искусственного формирования сигналов электрокардиограмм, содержащих отклонения от нормы в соответствии с патологиями «мелкоочаговый инфаркт миокарда» и «крупноочаговый инфаркт миокарда». В результате последующего исследования полученных сигналов с патологиями получил дальнейшее развитие метод анализа электрокардиограмм на основе вейвлет-преобразования. Даны рекомендации для использования указанного метода с целью выявления патологий в виде крупноочагового и мелкоочагового инфаркта миокарда. Результаты данной работы в дальнейшем планируется использовать для разработки методов анализа электрокардиограмм с целью ранней диагностики известных кардиологических патологий.

**Ключевые слова:** электрокардиограмма, патология, инфаркт, QRS-комплекс, вейвлет-преобразование.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$P$  – волна сокращений предсердий в ЭКГ;  
 $QP$  – изоэлектрический сегмент ЭКГ перед сокращением желудочков;  
 $QRS$  – волна сокращения желудочков в ЭКГ;  
 $ST$  – изоэлектрический сегмент в ЭКГ во время сокращения желудочков;  
 $T$  – волна фазы расслабления желудочков в ЭКГ;  
 $SWT(b, a)$  – непрерывное вейвлет-преобразование;

$x(t)$  – анализируемый сигнал электрокардиограммы;  
 $\psi$  – вейвлет-функция;  
 $a$  – коэффициент масштаба;  
 $b$  – параметр сдвига.

#### ВВЕДЕНИЕ

Электрокардиограмма (ЭКГ) является электрическим проявлением сократительной активности сердца и наи-

более широко известным, признанным и используемым биомедицинским сигналом. Клиническую ЭКГ можно использовать для диагностики большинства кардиологических заболеваний, поскольку форма волн ЭКГ изменяется под действием сердечно-сосудистых заболеваний и патологий. Диагностика кардиологических заболеваний может быть проведена измерением и выявлением ряда компонент сигнала ЭКГ. Для создания новых и проверки существующих методов анализа ЭКГ, нацеленных на диагностику кардиологических заболеваний, актуальной является задача формирования эталонных сигналов ЭКГ с искажениями, соответствующими различным патологиям. Анализ таких сигналов будет полезен при разработке и верификации методов определения характера и величины искажений в ЭКГ, которые могут свидетельствовать о наличии той или иной патологии.

В связи с этим, целью данной работы является формирование сигналов электрокардиограмм с известными видами искажений, соответствующих распространенным патологиям. В качестве таких патологий выбраны крупноочаговый и мелкоочаговый инфаркты миокарда – заболевания, которые лидируют по количеству летальных исходов среди всех кардио заболеваний и заболеваний системы кровообращения.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для выбранных патологий (крупноочаговый и мелкоочаговый инфаркты миокарда) необходимо исследовать проявление диагностических признаков для элементов ЭКГ и повторить их в синтезированных сигналах. В отличие от реальных сигналов ЭКГ людей, страдающих от указанных заболеваний, синтезированные сигналы должны быть эталонными, т.е. иметь ярко выраженные диагностические признаки соответствующей патологии и не содержать шумовой составляющей.

Для проверки сформированных сигналов ЭКГ с патологиями необходимо также провести исследование возможности применения вейвлет-преобразования для обнаружения и определения компонент сигнала, которые подвергаются искажениям вследствие указанных заболеваний.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

ЭКГ обычно включает 12 каналов последовательно или параллельно записанных сигналов. Сердечный цикл отражается в повторяющемся сигнале ЭКГ в виде периода, состоящего из последовательности волн (зубцов), обозначаемых *P*, *QRS* и *T*. В сердечном цикле в норме наблюдается следующая последовательность волн и интервалов [1]:

– *P*-зубец – медленная волна с длительностью 60–80 мс и амплитудой 0,1–0,3 мВ;

– *QP*-сегмент – изоэлектрический сегмент продолжительностью 60–80 мс (важен для распознавания базовой линии);

– *QRS*-комплекс (волна с большой скоростью распространения) острая двух фазная или трех фазная волна с амплитудой около 1мВ и длительностью 80 мс;

– *ST*-сегмент – изоэлектрический сегмент продолжительностью 100–120 мс;

– *T*-зубец – волна с амплитудой 0,1–0,3 мВ и длительностью 120–160 мс.

Нормальные значения параметров указанных элементов ЭКГ приведены в таблице 1 [1].

В [1] указано влияние ишемии и инфаркта миокарда на форму *QRS*-комплекса, которое носит в основном описательный характер. Кроме того, в [1] были предложены математические модели, частично или полно представляющие процесс генерации некоторых биомедицинских сигналов. Однако при моделировании сигналов ЭКГ внимание было уделено анализу ритма, вследствие чего больший интерес представляли временные соотношения между комплексами, чем индивидуальные формы их волн. Таким образом, в [1] было рассмотрено моделирование ритма ЭКГ без учета специфических особенностей форм волн ЭКГ, относящихся к предсердиям и желудочкам. Моделирование сигналов ЭКГ с патологиями не проводилось.

Существует несколько основных методов анализа ЭКГ сигналов: временной, спектрально-временной, анализ в фазовом пространстве и другие [1]. Однако измерения амплитуды и длительности ЭКГ-компонент с помощью методов анализа временной области не всегда достаточно для описания всех особенностей ЭКГ-сигнала. Использование информации совместно временной и частотной областей дает исчерпывающие результаты [2], вследствие чего использование вейвлет-преобразования для анализа сигналов ЭКГ является наиболее перспективным и нашло свое отражение во многих работах. Так, например, в [2–3] вейвлет «Мексиканская шляпа» находит применение при оценке параметров *QRS*-комплекса и отклонений ЭКГ от нормы, что обусловлено свойствами вейвлета [4].

Большая часть клинической информации ЭКГ содержится в длительности волн (комплексов) и их амплитудах [5]. Для обнаружения компонент ЭКГ были протестированы различные типы вейвлет-функций. Авторами работ [6–7] для анализа ЭКГ предложено использование семейства биортогональных вейвлетов, а в работе [8] используют гауссовы вейвлеты. В [9] в результате сравнительного анализа нескольких материнских функций была выбрана вейвлет-функция «*bio1.5*». Вейвлет является симметричным, имеет компактный носитель, равен первой производной от скейлинг-функции и имеет один нулевой момент, что делает его применение очень удобным для использования при анализе сигнала ЭКГ. Вейвлет-преобразование на различных масштабах описывает временной характер в различных диапазонах частот, что дает при выборе оптимального значения масштаба свести к минимуму влияние помех и артефактов.

Таблица 1 – Параметры сигнала ЭКГ в норме

Параметр	Значение параметра элемента ЭКГ					
	Волна P	Интервал PQ	QRS- комп.	Интервал QT	Сегмент ST	Волна T
Амплитуда, мВ	0–0,25	–	0,3–5	–	–	0,4–1
Длительность, с	0,07–0,11	0,12–0,2	0,06–0,1	0,35–0,44	0,06–0,15	0,1–0,2

Представленный в [9] подход использует один оптимальный масштабный коэффициент для каждого компонента ЭКГ в отдельности: масштаб 15 для обнаружения *QRS*-комплекса и масштаб 41 для *P* и *T*-волн.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно [1] ЭКГ представляет собой квазипериодический сигнал, в котором *P*-зубец является суммарным результатом потенциалов действия двигательных единиц предсердия, в то время как *QRS*-комплекс и *T*-зубец формируются в результате пространственно-временного суммирования потенциалов действия двигательных единиц желудочков.

При ишемии и инфаркте миокарда первичные изменения отражаются на ЭКГ в виде модифицированного *ST*-сегмента, который либо приподнят, либо опущен, в зависимости от используемого отведения и местоположения поврежденной части сердца; *T*-волна может также быть инвертирована. Хронический инфаркт миокарда вызывает возврат к нормальному *ST*-сегменту и выраженный *Q*-зубец [1].

В зависимости от площади поражения миокарда выделяют два типа инфаркта: мелкоочаговый и крупноочаговый. Выделяют также два типа мелкоочагового инфаркта [1]: субэндокардиальный (сопровождается смещением *ST*-сегмента ниже изоэлектрической линии) и интрамуральный (сопровождается отрицательным *T*-зубцом). Крупноочаговый инфаркт имеет следующие стадии [1]: острый (*ST*-сегмент выше изолинии, *T*-зубец не определяется), подострый (*ST*-сегмент начинает опускаться к изолинии и появляется отрицательный *T*-зубец) и период рубцевания (*ST*-сегмент находится на изолинии, *T*-зубец отрицателен, *Q*-зубец отчетливо выделяется).

Сигнал ЭКГ как периодическая функция с основной частотой, определяемой сердцебиением, и удовлетворяющая условию Дирихле, может быть представлена в виде ряда Фурье. Такое представление сигнала ЭКГ в норме реализовано, например, в Matlab в виде функции *ecg*.

Для формирования сигналов ЭКГ с заданными патологиями предлагается провести моделирование с использованием смещения, сдвига, масштабирования или исключения во временной области выделенных компонент нормального сигнала ЭКГ. Кроме того, при необходимости в моделируемый сигнал ЭКГ могут быть включены шумовые составляющие (сетевая наводка в виде пилообразных колебаний, неправильные частые мелкие колебания различной частоты и амплитуды, дрейф изолиний), которые на практике могут быть вызваны мышечным тремором, кашлем, дыханием, а также плохим контактом с кожей.

Формирование сигналов ЭКГ с патологиями с последующим их исследованием позволяют проверять различные методы их анализа. Предлагается использовать методы анализа, которые позволяют обнаруживать компоненты ЭКГ и определять их параметры (длительности волн *P* и *T*, *QRS*-комплекса), основанные на применении непрерывного вейвлет-преобразования:

$$CWT(b, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для правильной диагностики по данным таблицы 1 параметров ЭКГ в норме необходимо сформировать сигнал без патологий и шумов. Для формирования сигналов с патологиями (крупноочаговый и мелкоочаговый инфаркт) предлагается использовать стандартные сигналы ЭКГ путем изменения параметров *T*-волны и *QRST*-комплекса (изменения значений их амплитуд и временных границ). Моделирование сигнала ЭКГ проводится в среде Matlab с использованием функции *ecg*.

Для проверки всех сформированных сигналов ЭКГ (с патологиями и без) предлагается получать вейвлет-спектр с материнской функцией «Мексиканская шляпа».

Для обнаружения *QRS*-комплекса необходимо применить вейвлет-преобразование с использованием вейвлет-функции «*bio1.5*» и масштаба 15 [9]. После чего определить пороговое значение, равное половине глобального максимума (минимума) в результате вейвлет-преобразования. Поиск комплекса заключается в поиске и анализе *S*-образной кривой, начало и конец которой будет соответствовать границам *QRS*-комплекса, а центральный переход через ноль совпадать с пиком в комплексе. Далее следует осуществить поиск двух последовательных пар значений времени, при которых результат вейвлет-преобразования, при заданном масштабном коэффициенте, пересекает уровень нуля, между которыми находится результате вейвлет-преобразования, превышающий по модулю значение ранее рассчитанного порога. Таким образом, начало первого интервала времени и конец второго должны соответствовать границам *QRS*-комплекса, а конец первого интервала времени (или начало второго) соответствовать его пику.

Для исключения влияния большой разницы между амплитудами *QRS*-комплекса, *P* и *T* волнами, предлагается после обнаружения *QRS*-комплекса удалить его и линейно аппроксимировать участок сигнала.

После удаления *QRS*-комплекса аналогично определяются положение *P* и *T*-волн, используя масштабный коэффициент 41.

На основании анализа метода [9], предлагается для определения *QRS*-комплекса использовать четыре последовательных интервала времени для определения пиков волн (*Q*, *R*, *S*) в составе *QRS*-комплекса и его границы. Установлено, что для исключения влияния возможного дрейфа базовой линии оптимально использовать масштабный коэффициент 70 для обнаружения *T*-волны.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Сигнал ЭКГ без патологии и его вейвлет-спектр представлены на рис. 1. Сигнал ЭКГ с патологиями в виде мелкоочагового и крупноочагового инфаркта, а также их вейвлет-спектры с материнской функцией «Мексиканская шляпа» представлены на рис. 2 и 3 соответственно.

Из приведенных сигналов четко выделяются патологии: в первом случае (рис. 2, а) это отрицательная волна *T* в отведениях под областью инфаркта; во втором (рис. 3, а) – сегмент *ST*, который находится выше изолинии, и волна *T*, которая не дифференцируется (имеет постоянный уровень 0,35).

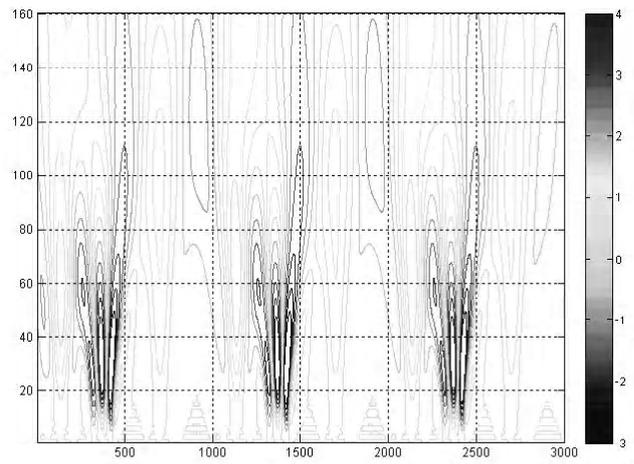
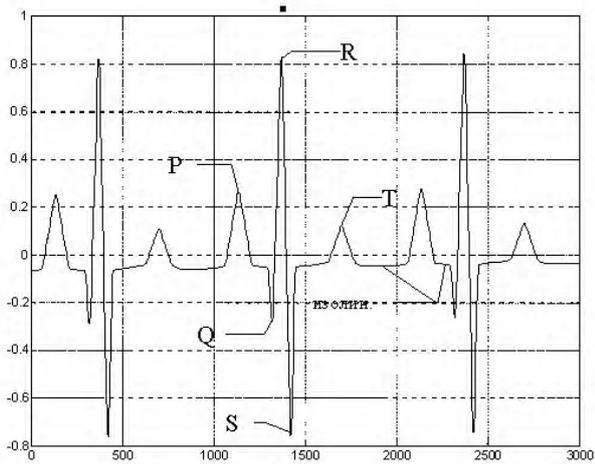


Рисунок 1 – Представление ЭКГ: а – сигнал в норме; б – вейвлет-спектр ЭКГ

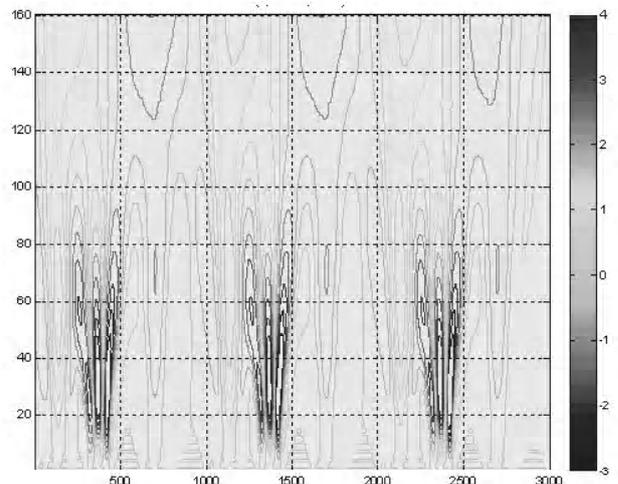
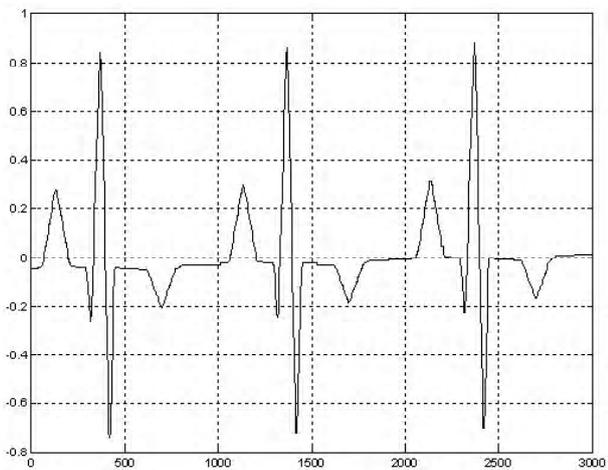


Рисунок 2 – Сформированная ЭКГ: а – сигнал с патологией «мелкоочаговый инфаркт»; б – вейвлет-спектр ЭКГ

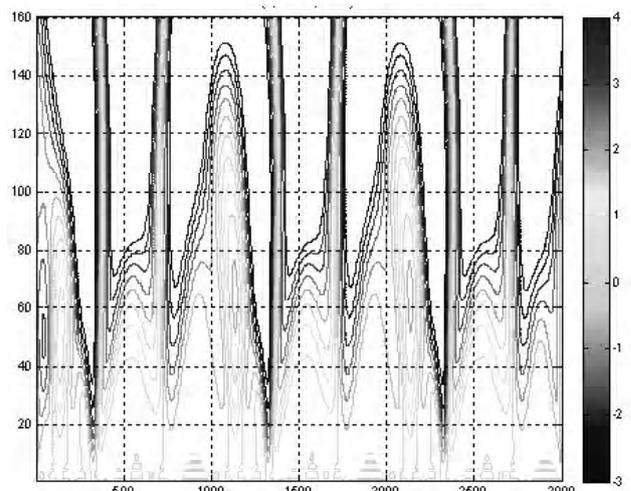
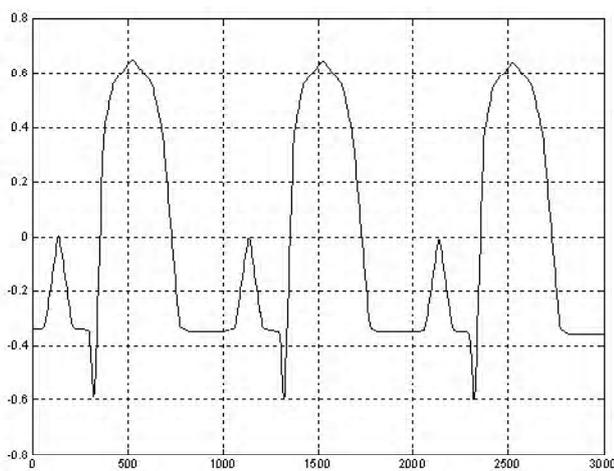
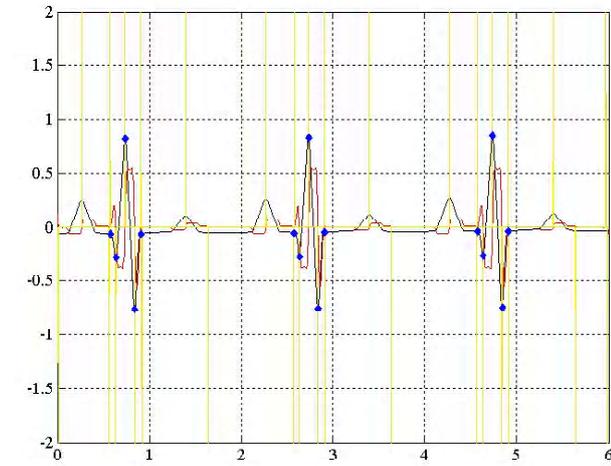


Рисунок 3 – Сформированная ЭКГ: а – сигнал с патологией «крупноочаговый инфаркт»; б – вейвлет-спектр ЭКГ

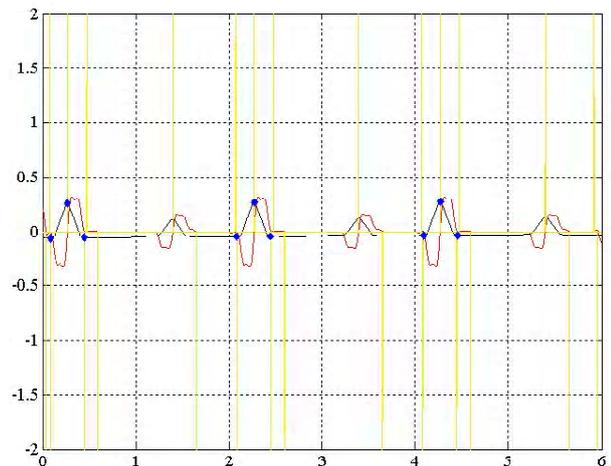
Обнаруженный в сигнале ЭКГ без патологии QRS-комплекс с использованием масштабного коэффициента 15 представлен на рисунке 4, а. На рисунках 4, б и 4, в изображены выделенные *P* и *T*-волны с применением масштабных коэффициентов 41 и 70. Вертикальными

линиями обозначены переходы через ноль. Маркерами обозначены пики и границы комплекса.

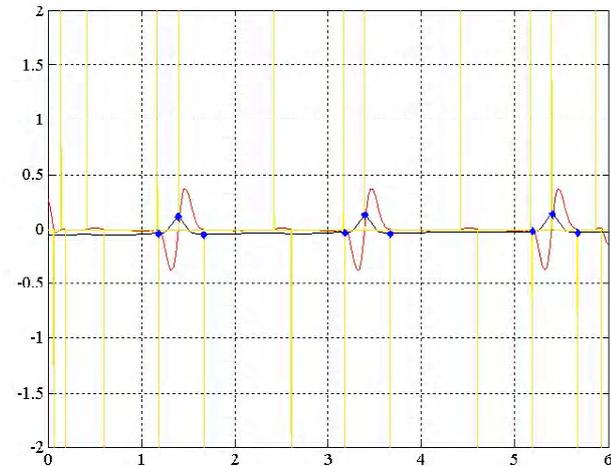
При наличии нарушений в работе сердца форма ЭКГ сигнала меняется. Возможны изменения формы *QRS*-комплекса и инверсия *T*-волны. Результат анализа ЭКГ с заданными патологиями представлен на рисунках 5 и 6.



а

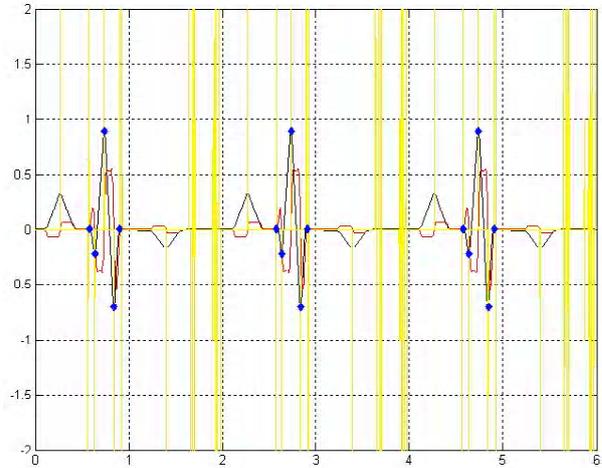


б

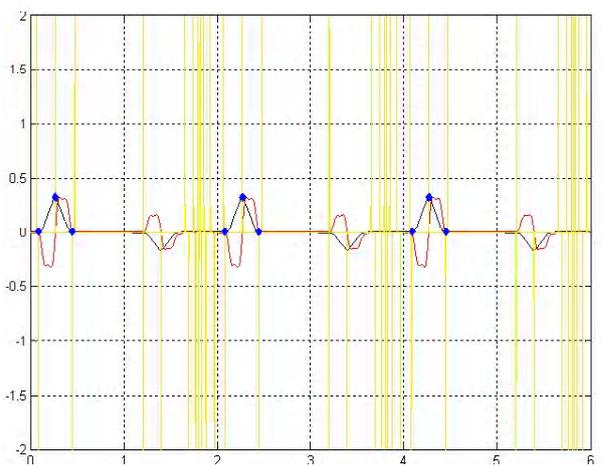


в

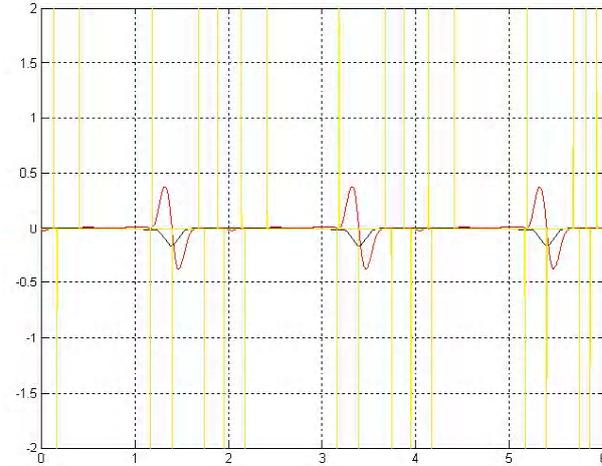
Рисунок 4 – Результаты обнаружения: а – QRS-комплекса; б – *P*-волны; в – *T*-волны



а

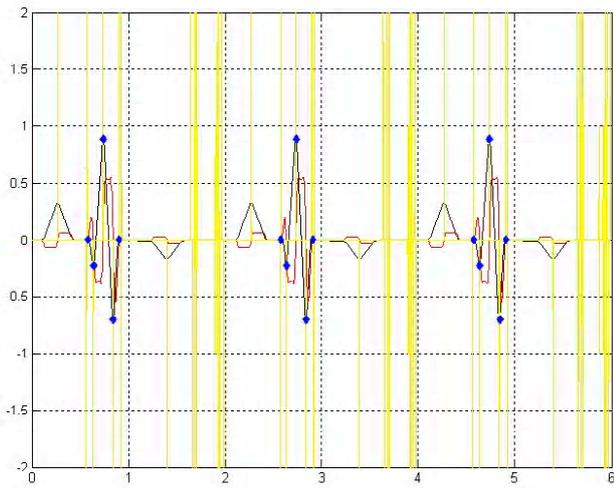


б

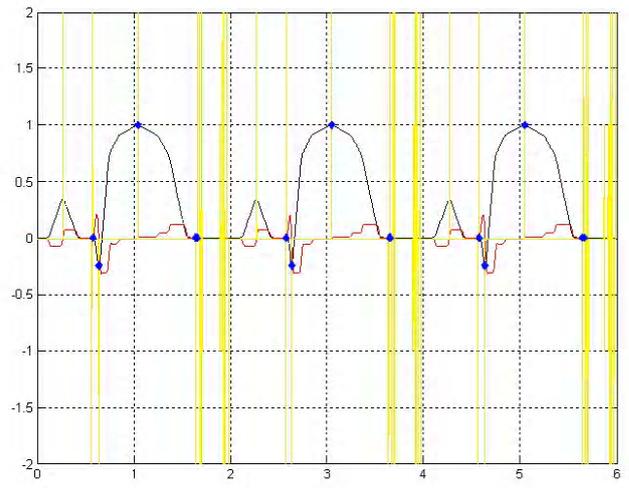


в

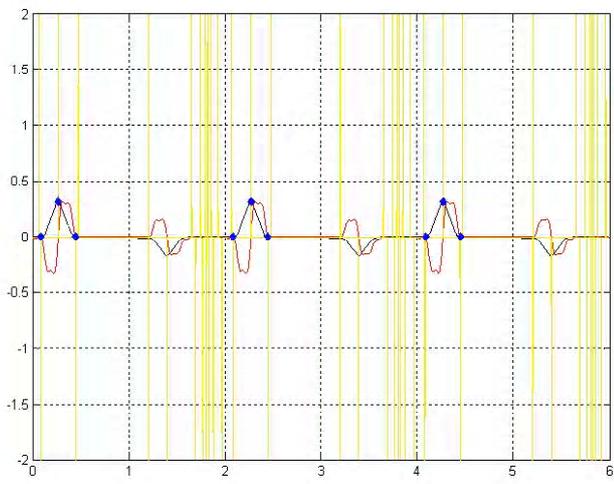
Рисунок 5 – Результаты обнаружения для сигнала ЭКГ с патологией «мелкоочаговый инфаркт»: а – *QRS*-комплекса; б – *P*-волны; в – *T*-волны



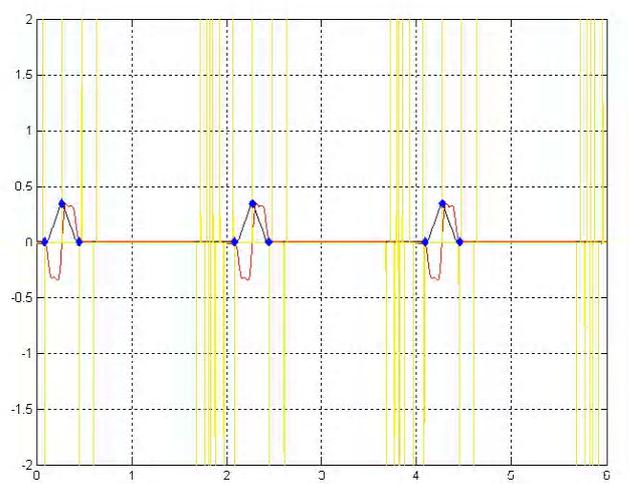
а



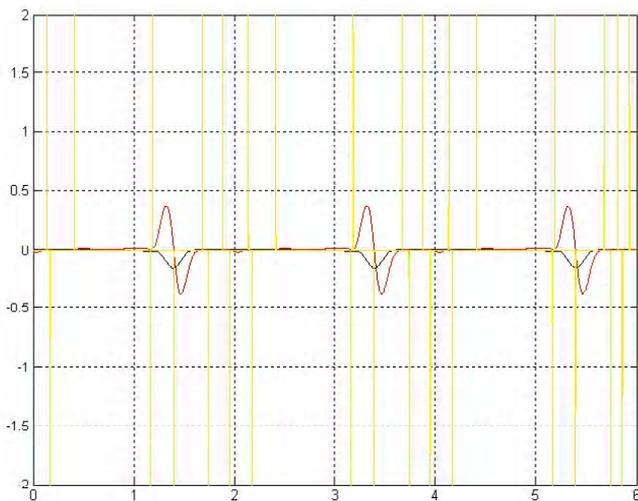
а



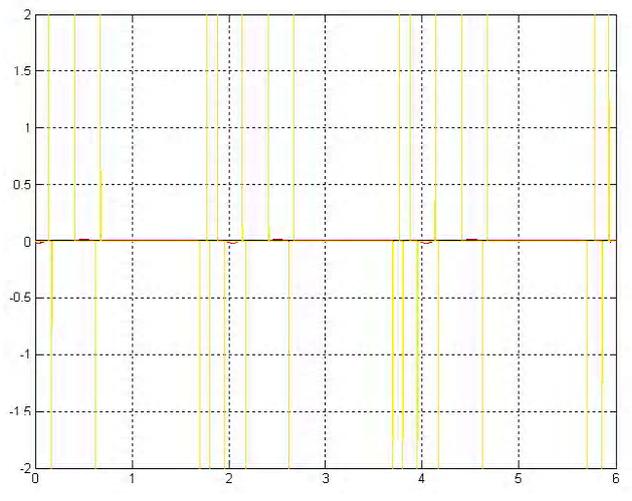
б



б



в



в

Рисунок 5 – Результаты обнаружения для сигнала ЭКГ с патологией «мелкоочаговый инфаркт»: а – QRS-комплекса; б – P-волны; в – T-волны

Рисунок 6 – Результаты обнаружения для сигнала ЭКГ с патологией «крупноочаговый инфаркт»: а – QRS-комплекса; б – P-волны; в – T-волны

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Удалось сформировать сигналы ЭКГ как в норме, так и с заданными видами патологий. Некоторые примеры сигналов ЭКГ с патологиями приведены на рисунках 2а и 3а.

Следующая задача исследования – выявление особенностей искусственно сформированных сигналов ЭКГ решалась с использованием методов частотно-временного анализа. Так априорная неопределенность свойств сигналов и помех, определяемая индивидуальными особенностями пациентов, может быть устранена с использованием методов частотно-временного анализа, что позволило четко диагностировать патологии в сигналах ЭКГ (см. рис. 2б и рис. 3б). При известных патологиях ЭКГ сигнала масштабные коэффициенты в изоклинах спектра имеют четкие ограничения. В первом случае (рис. 2а) выделенные патологии визуально сопоставимы (рис. 1, б и рис. 2б), и определение отрицательного сегмента  $T$  возможно при расширении изоклина (рис. 2б) в границах воздействия отрицательного  $T$ -сегмента (600–750 отсчетов по оси времени) и 60–80 единиц по оси масштабов. Во втором случае (рис. 3б) выделение смещенного  $ST$ -сегмента трудно определить по приведенному вейвлет-спектру (рис. 3б).

В результате выполнения анализа сигнала ЭКГ с патологией «мелкоочаговый инфаркт» не была обнаружена волна  $T$  (рис. 5в). Причиной является то, что волна  $T$  при заданной патологии имеет отрицательную амплитуду, и, соответственно, результат вейвлет-преобразования содержит инверсную  $S$ -кривую, которая выбранным методом анализа не может быть обнаружена. Для обнаружения  $T$ -волны такого вида необходимо выполнить поиск  $S$ -кривой, исходя из предположения о ее инверсном характере.

При анализе сигнала ЭКГ с патологией «крупноочаговый инфаркт» также не была обнаружена  $T$ -волна (рис. 6в), поскольку при данной патологии происходит слияние  $QRS$ -комплекса и  $T$ -волны (рис. 6а). В связи с этим увеличение длительности  $QRS$ -комплекса, является диагностическим критерием. Не обнаружение  $T$ -волны или обнаружение  $T$ -волн, имеющих малую амплитуду (например, вследствие шумов измерений), может являться критерием обнаружения для патологии «крупноочаговый инфаркт».

Реализованный метод анализа на основе вейвлет-преобразования позволяет выделять составляющие и параметры ЭКГ сигнала. Однако, при анализе сигнала с различными патологиями не всегда выделяются составляющие, форма которых отличается от принятой в качестве исходной, например, наличие отрицательных пиков или их уширения и сглаживания. В случае не обнаружения характерных составляющих сигнала ЭКГ должно быть сделано заключение о нарушении работы сердца.

Предлагается в методе анализа сигналов ЭКГ применять повторный анализ для поиска компонент с отрицательными амплитудами или более протяженных во времени, чем ожидалось, если они не были обнаружены в результате начального анализа. Это позволит выполнить первичное распознавание характера патологии.

Агаджанян А. Р.<sup>1</sup>, Лоза К.И.<sup>2</sup>, Наріманова О. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радіотехнічних пристроїв Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

<sup>2</sup>Аспірант Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформатики та управління захистом інформаційних систем Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

## ФОРМУВАННЯ І АНАЛІЗ СИГНАЛІВ ЕКГ З ПАТОЛОГІЯМИ

**Актуальність.** Робота присвячена актуальній проблемі генерації сигналів електрокардіограм зі спотвореннями, що відповідають різним патологіям. Такі сигнали можуть бути використані в якості еталонних для створення нових та верифікації існуючих методів аналізу біомедичних сигналів, що мають на меті діагностику кардіологічних захворювань.

## ВЫВОДЫ

На основе описательных характеристик элементов сигналов ЭКГ при наличии различных патологий, доступных из медицинской литературы, впервые удалось сформировать эталонные сигналы электрокардиограмм с заданными искажениями, соответствующими различным видам патологий. Для проверки некоторые сформированные сигналы, приведенные в работе, подверглись исследованию на основе вейвлет-преобразования, в результате чего получил дальнейшее развитие метод анализа электрокардиограмм на основе вейвлет-преобразования. По результатам исследования даны рекомендации для выявления нарушений в сигналах, соответствующих патологиям в виде крупноочагового и мелкоочагового инфаркта.

Несмотря на то, что упор в работе делается на моделировании сигналов электрокардиограмм с патологиями и без, основной и дальнейшей целью авторов является разработка методов и устройств анализа ЭКГ для возможности диагностики известных патологий, в том числе на ранних стадиях развития.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в Одесском национальном политехническом университете в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры радиотехнических устройств № 1–58 «Динамика и устройства сигнальных преобразований».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Р. М. Рангайян. – М. : Физматлит, 2007. – 440 с.
2. Чесноков Ю. В. Вейвлет-преобразование в обработке электрокардиограмм / Ю. В. Чесноков, В. И. Чижиков // Вестник новых медицинских технологий. – 2003. – Т. X, № 1. – С. 5–8.
3. Хафизов А. Р. Использование вейвлет-преобразования при анализе ЭКГ / А. Р. Хафизов, М. В. Башашин // Издание МИФИ. – 1999. – Т. 7. – С. 16–17.
4. Брюханов Ю. А. Основы цифровой обработки сигналов / Ю. А. Брюханов, А. Л. Приоров. – Ярославль : ЯрГУ, 2013. – 344 с.
5. Vitec M. A Wavelet-Based ECG Delineation with Improved P Wave Offset Detection Accuracy / M. Vitec, J. Hrubes // Analysis of Biomedical Signals and Images. – 2010. – P. 160–165.
6. Vitec M. A wavelet-based ECG delineation in Multilead ECG signals: Evaluation on the CSE Database / M. Vitec, J. Hrubes // IFMBE Proceedings. – 2009. – Vol. 25. – P. 177–180.
7. Martínez J. P. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases / [J. P. Martínez, R. Almeida, S. Olmos and other] // IEEE Transactions on Biomedical Engineering. – 2004. – Vol. 51, No. 4. – P. 570–581.
8. Sahambi J. S. Using wavelet transform for ECG characterization / J. S. Sahambi, S. Tandon, R.K.P. Bhatt // IEEE Engineering in Medicine and Biology. – 1997. – Vol. 16, No. 1. – P. 77–83.
9. Дубровин В. И. Усовершенствование методов анализа ЭКГ-сигналов на основе вейвлет-преобразования в системе электрокардиографии высокого разрешения / В. И. Дубровин, Ю. В. Твердохлеб // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2011. – № 1. – С. 91–98.

Статья поступила в редакцию 14.12.2016.

После доработки 27.01.2017.

**Мета.** Метою даної роботи є формування сигналів електрокардіограм з відомими видами спотворень, що відповідають поширеним патологіям. Формування сигналів електрокардіограм з патологіями проводилось у відповідності з захворюванням «інфаркт міокарда» як найбільш розповсюдженого серед всіх кардіо захворювань з можливим летальним кінцем.

**Метод.** Досліджено опис сукупності діагностичних при знаків захворювання, що проявляються для елементів сигналу електрокардіограми, в залежності від виду інфаркту (дрібновогнищезового чи великовогнищезового) і його стадії. Для формування сигналів електрокардіограми з заданими патологіями проведено моделювання з використанням зміщення, зсуву, масштабування або виключення у часовій області виділених компонент нормального сигналу електрокардіограми. В якості методів виявлення компонент електрокардіограми і визначення їх параметрів використані методи частотно-часового аналізу: неперервне вейвлет-перетворення з материнською функцією «Мексиканська шляпа» і вейвлет-перетворення з вейвлет-функцією «bior1.5».

**Результати.** Вдалось сформувати сигнали електрокардіограм без патологій, а також з патологіями у вигляді дрібновогнищезового і великовогнищезового інфаркту. На основі проведеного частотно-часового аналізу отриманих електрокардіограм вдалось виявити особливості штучно сформованих сигналів, що відповідають закладеним патологіям.

**Висновки.** Вирішено задачу штучного формування сигналів електрокардіограм, що містять відхилення від норми у відповідності з патологіями «дрібновогнищезовий інфаркт міокарда» і «великовогнищезовий інфаркт міокарда». В результаті наступного дослідження отриманих сигналів з патологіями отримав подальший розвиток метод аналізу електрокардіограм на основі вейвлет-перетворення. Надано рекомендації для використання зазначеного методу з метою виявлення патологій у виді великовогнищезового і дрібновогнищезового інфаркту міокарда. Результати даної роботи в подальшому плануються використовувати для розробки методів аналізу електрокардіограм з метою ранньої діагностики відомих кардіологічних патологій.

**Ключові слова:** електрокардіограма, патологія, інфаркт, QRS-комплекс, вейвлет-перетворення.

Ahadzhanian A. R.<sup>1</sup>, Loza K. I.<sup>2</sup>, Narimanova O. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Radiotechnical Devices, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

<sup>2</sup>Postgraduate student, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

<sup>3</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Informatics and Information System's Protection Management, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

#### FORMATION AND ANALYSIS OF ECG SIGNALS WITH PATHOLOGIES

**Context.** The work is devoted to the actual problem of the generation of electrocardiogram signals with distortions corresponding to the different pathologies. These signals can be used as a standard for developing new and verification of existing methods for biomedical signals analyzing aimed at the diagnosis of heart diseases.

**Objective.** The aim of this work is the formation of electrocardiogram signals with the known types of distortions corresponding to the common pathologies. The formation of electrocardiogram signals with pathologies is carried out in accordance with heart disease «myocardial infarction» as it is the most widespread among all the heart diseases which can be lethal.

**Method.** The description of a set of diagnostic disease symptoms for elements of electrocardiogram signal depending on the type of infarction (subendocardial or transmural) and its stage is studied. To generate the electrocardiogram signals with the given pathologies the modeling using an offset, shift, scale or exception in the time domain of allocated signal component of the normal electrocardiogram is conducted. The time-frequency analysis methods (continuous wavelet transform with the maternal function «Mexican hat» and wavelet transform with the wavelet function «bior1.5») are used for electrocardiogram component detection and determination of their parameters.

**Results.** It came possible to generate electrocardiogram signals both without and with pathologies in the forms of subendocardial and transmural myocardial infarction. Based on the time-frequency analysis of the obtained electrocardiograms it came possible to determine the features of artificially generated signals corresponding to the pledged pathologies.

**Conclusions (scientific novelty and practical significance).** The problem of synthetic formation of an electrocardiogram signal containing deviations from the norm in accordance with the pathologies «subendocardial infarction» and «transmural infarction» is resolved. As a result of the subsequent studies of the received signals with pathologies the method of analysis of electrocardiograms based on wavelet transform is further developed. Recommendations for the use of this method to detect the pathologies in the forms of subendocardial and transmural myocardial infarctions are given. The results of this work are planned to be used in the future to develop electrocardiograms analysis methods for early detection of known cardiac pathologies.

**Keywords:** electrocardiogram, pathology, infarction, QRS-complex, wavelet transform.

#### REFERENCES

1. Rangayyan R. M. Analiz biomeditsinskih signalov. Prakticheskiy podhod. Moscow, Fizmatlit, 2007, 440 p.
2. Chesnokov Yu. V., Chizhikov V. I. Veyvlet-preobrazovanie v obrabotke elektrokardiogramm, *Vestnik novyih meditsinskih tehnologiy*, 2003, Vol. X, No. 1, pp. 5–8.
3. Hafizov A. R., Bashashin M. V. Ispolzovanie veyvlet-preobrazovaniya pri analize EKG, *Izdanie MIFI*, 1999, Vol. 7, pp. 16–17.
4. Bryuhanov Yu. A., Priorov A. L. Osnovy tsifrovoy obrabotki signalov. Yaroslavl, YarGU, 2013, 344 p.
5. Vitec M., Hrubes J. A Wavelet-Based ECG Delineation with Improved P Wave Offset Detection Accuracy, *Analysis of Biomedical Signals and Images*; 2010, pp. 160–165.
6. Vitec M., Hrubes J. A wavelet-based ECG delineation in Multilead ECG signals: Evaluation on the CSE Database, *IFMBE Proceedings*, 2009, Vol. 25, pp. 177–180.
7. Martnez J. P., Almeida R., Olmos S., Rocha A. P., Laguna P. A wavelet-based ECG delineator: evaluation on standard databases, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2004, Vol. 51, No. 4, pp. 570–581.
8. Sahambi J. S., Tandon S., Bhatt R.K.P. Using wavelet transform for ECG characterization, *IEEE Engineering in Medicine and Biology*, 1997, Vol. 16, No. 1, pp. 77–83.
9. Dubrovin V. I., Tverdohleb Yu. V. Usovshenstvovanie metodov analiza EKG-signalov na osnove veyvlet-preobrazovaniya v sisteme elektrokardiografii vyisokogo razresheniya, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2011, No. 1, pp. 91–98.

## ДЕКОМПОЗИЦИЯ СУММЫ ГАУССИАН, ИСКАЖЕННЫХ ИМПУЛЬСНЫМ ШУМОМ

**Актуальность.** Применение традиционных методов декомпозиции суммы гауссовых функций для случая, когда исходные данные искажены шумом импульсного типа, приводит к значительным ошибкам. Объектом данного исследования является процесс декомпозиции суммы гауссовых функций в импульсной шумовой обстановке.

**Цель работы** – разработка метода декомпозиции суммы гауссовых функций для случая, когда данные искажены шумом импульсного типа.

**Метод.** Предложенный метод основан на решении задачи безусловной минимизации заданной целевой функции по неизвестным параметрам. Постановка задачи выполнена на основе критерия минимума протяженности, который применяется к невязке решения. Процесс декомпозиции реализуется итерационно путем последовательного выделения гауссовых функций из их суммы, где вначале выделяется самая протяженная гауссова функция, затем выделяется менее протяженная и т. д. Для определения значений параметров гауссовой функции описано два подхода. Первый подход основан на методе итераций, который применяется для решения системы нелинейных уравнений, получаемой из необходимого условия минимума целевой функции. Второй подход основан на методе прямого пассивного поиска минимума целевой функции, в котором пробные точки выбираются из условия равенства нулю невязки решения в этих точках. Отмечено, что второй подход имеет более широкую область применимости, чем первый. На основе второго подхода построен итерационный алгоритм, для которого описан способ выбора начальных значений параметров гауссовой функции в условиях наличия импульсного шума, сформулированы правила выбора наилучших значений ее параметров на каждой итерации и приведено правило остановки вычислений.

**Результаты.** Моделирование задач подгонки одиночной гауссовой кривой к данным и декомпозиции суммы пяти гауссовых функций для случая, когда соответствующие исходные данные искажены шумом импульсного типа с законом распределения Коши, подтвердили эффективность предложенного метода.

**Выводы.** Предложенный метод является эффективным инструментом декомпозиции суммы гауссовых функций, искаженных шумом импульсного типа с законом распределения Коши. Он может быть распространен на случай суммы функций другой формы и других неизвестных параметров.

**Ключевые слова:** гауссова декомпозиция, обработка данных, протяженность.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A$  – амплитуда гауссианы;

$f_i$  –  $i$ -ый элемент последовательности, которая отвечает модели;

$g_i$  –  $i$ -ый элемент последовательности известных данных;

$i$  – номер отсчета;

$m$  – положение максимума гауссианы;

$N$  – количество отсчетов;

$q$  – свободный параметр, который отвечает за степень сглаживания значений;

$x$  – независимая переменная;

$x_i$  –  $i$ -ый отсчет независимой переменной  $x$ ;

$\alpha$  – свободный параметр, который отвечает за величину сглаживания значений;

$\beta$  – свободный параметр, который отвечает за форму закона распределения;

$\Delta x$  – шаг дискретизации независимой переменной  $x$ ;

$\nu$  – параметр масштаба шума с законом распределения Коши

$\sigma$  – полуширина гауссианы.

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих случаях преимущество модели в виде суммы гауссовых функций обусловлено набором тех математических свойств, которые делают удобным ее применение для аналитических расчетов. В первую очередь, такие свойства связаны с «бесконечной» гладкостью га-

уссовой функции из-за наличия ее производной любого конечного порядка, а также с простотой определения значений ее нелинейных параметров – местоположения и полуширины – на основе второй производной. Кроме этого, быстрого затухания «хвостов» гауссовой функции обеспечивает квазиортогональность набора гауссовых функций при отсутствии их существенного перекрытия, а ее интегрируемость и дифференцируемость позволяют проводить теоретические исследования. Недостатком применения модели в виде суммы гауссовых функций является необходимость решения проблемы их декомпозиции, которая заключается в разложении этой суммы на отдельные составляющие.

Успешное решение проблемы гауссовой декомпозиции зависит от двух основных факторов, а именно от близости расположения гауссовых функций и от шума. Эти факторы взаимосвязаны. Так, чем меньше уровень шума, тем ближе друг к другу могут быть расположены гауссовы функции, для которых декомпозиция выполняется верно. Более того, при отсутствии шума декомпозиция теоретически возможна для сколь угодно близко расположенных гауссовых функций. С другой стороны, при наличии достаточно большого шума декомпозиция становится невозможной. Однако не только уровень, но и природа шума влияет на возможность и качество декомпозиции. Так, даже в случае слабого шума импульсного типа (например, шума с законом распределения Коши) качество декомпозиции может оказаться низким.

В данной работе рассмотрен подход к решению проблемы гауссовой декомпозиции в условиях наличия импульсного шума. Постановка задачи гауссовой декомпозиции основана на критерии минимума протяженности. Результаты числового моделирования задачи подгонки гауссовой кривой под данные и задачи декомпозиции суммы гауссовых функций показывают возможность предложенного подхода.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Изложение постановки задачи и последующего материала выполняется для дискретного случая, а непрерывный случай может быть записан по аналогии. При этом применяются следующие обозначения. Запись  $x_i$  обозначает  $i$ -ый дискретный отсчет независимой переменной  $x$ , причем  $i = 1, \dots, N$ , где  $N$  обозначает количество отсчетов. Далее считается, что  $x_i = i \cdot \Delta x$ , где  $\Delta x = 1$  есть шаг дискретизации независимой переменной  $x$ , т.е. фактически  $x_i = i$ . Запись независимой переменной  $x$  без нижнего индекса используется тогда, когда нет разницы, к какому из отсчетов относится записываемое соотношение, т.е. когда оно заведомо справедливо для любого  $i = 1, \dots, N$ . Запись  $g_i$  обозначает  $i$ -ый элемент исходной последовательности известных данных. Модель одиночного объекта, который описывается гауссовой функцией

$$f(x) = A e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}; |x| < \infty, \quad (1)$$

сокращенно именуется «гауссиана», где  $A$  обозначает ее амплитуду,  $m$  задает положение ее максимума, а  $\sigma$  есть ее полуширина, определяемая примерно на уровне  $0,606 \cdot A$ . Запись  $f_i$  обозначает  $i$ -ый элемент дискретной последовательности, которая отвечает модели (1).

Математическая постановка рассматриваемой задачи основана на требовании минимизировать протяженность (extent) результирующей последовательности данных. Укажем, что применительно к абстрактной функциональной зависимости допустима строгая и нестрогая формулировка понятия ее протяженности [2]. Строгая формулировка основана на определении Титчмарша [1], которое трудно использовать конструктивно. Нестрогая формулировка основана на использовании стоимостной функции [2]

$$\psi_S^{(\alpha, \beta, q)}(x) = k_S^{(\alpha, \beta, q)} [(1 + |x|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]; |x| < \infty, \quad (2)$$

где  $\alpha > 0$ ;  $-\infty < \beta \leq 1$ ;  $0 < q < \infty$ ;  $\beta < q$ ;  $k_S^{(\alpha, \beta, q)} = 1 / [(1 + |x_1|^q / \alpha^q)^{\beta/q} - 1]$ ;  $\psi_S^{(\alpha, \beta, q)}(x_1) = 1$  и где  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $q$  являются свободными параметрами, которые предназначены для настройки процесса обработки на текущую шумовую обстановку. Путем изменения значений свободных параметров функция (2) может трансформироваться в степенную от модуля, квадратичную, модульную, псевдо-Хьюберовскую, корневую и логарифмическую стоимостные функции, в обобщенные стоимостные функции Демиденко и Мешалкина, а также в идеальную стоимостную функцию Титчмарша, формируя различные способы обработки данных [2].

Учитывая (1), (2) и принятые обозначения, для дискретного случая постановка задачи декомпозиции суммы гауссиан на основе указанного выше требования минимума протяженности имеет вид

$$\arg \min_{A_1, \dots, A_P, m_1, \dots, m_P, \sigma_1, \dots, \sigma_P} \left\{ k_S^{(\alpha, \beta, q)} \sum_{i=1}^N \left[ 1 + \left| g_i - \sum_{p=1}^P A_p e^{-\frac{(x_i - m_p)^2}{2\sigma_p^2}} \right|^q / \alpha^q \right]^{\beta/q} - 1 \right\}, \quad (3)$$

где  $P$  обозначает количество гауссиан,  $A_p, m_p, \sigma_p$  обозначают амплитуду, положение максимума и полуширину  $p$ -ой гауссианы, а параметры  $\alpha, \beta$  и  $q$  удовлетворяют указанным выше неравенствам. Подчеркнем, что для  $0 < \beta \leq 1$  имеем  $k_S^{(\alpha, \beta, q)} > 0$ , а для  $-\infty < \beta < 0$  имеем  $k_S^{(\alpha, \beta, q)} < 0$ . Однако для  $\beta = 0$  (точнее, для  $\beta \rightarrow 0$ ) запись задачи (3) и коэффициента  $k_S^{(\alpha, \beta, q)}$  трансформируется в запись на основе логарифмов [3]. Поэтому для практического использования задачу (3) необходимо переписать в виде двух задач оптимизации. Так, отбрасывая несущественные коэффициенты, для  $\beta \neq 0$  из (3) имеем

$$\arg \min_{A_1, \dots, A_P, m_1, \dots, m_P, \sigma_1, \dots, \sigma_P} \left\{ \operatorname{sgn}(\beta) \sum_{i=1}^N \left[ 1 + \left| g_i - \sum_{p=1}^P A_p e^{-\frac{(x_i - m_p)^2}{2\sigma_p^2}} \right|^q / \alpha^q \right]^{\beta/q} \right\}, \quad (4)$$

где  $\operatorname{sgn}(\beta) = 1$  для  $0 < \beta \leq 1$  и  $\operatorname{sgn}(\beta) = -1$  для  $-\infty < \beta < 0$ , а для  $\beta = 0$  из (3) путем предельного перехода по  $\beta \rightarrow 0$  получаем

$$\arg \min_{A_1, \dots, A_P, m_1, \dots, m_P, \sigma_1, \dots, \sigma_P} \left\{ \sum_{i=1}^N \ln \left[ 1 + \left| g_i - \sum_{p=1}^P A_p e^{-\frac{(x_i - m_p)^2}{2\sigma_p^2}} \right|^q / \alpha^q \right] \right\}. \quad (5)$$

Таким образом, (4) и (5) есть частные случаи (3).

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Традиционный подход к гауссовой декомпозиции основан на методе наименьших квадратов в предположении, что шум имеет нормальный закон распределения и умеренную дисперсию. В рамках этого подхода гауссова декомпозиция рассматривается как задача квадратичной оптимизации, где основное внимание уделяется выбору хороших начальных приближений для неизвестных параметров и применению эффективных методов оптимизации. Так, в [4] выбор хороших начальных приближений для неизвестных нелинейных параметров (в том числе, для количества гауссовых функций) достигался путем построения и последующего анализа «пространственно-масштабного изображения» (scale-space image) для заданной одномерной последовательности данных, а в качестве эффективного метода оптимизации использовался метод Марквардта. Устойчивость такого решения фактически обеспечивалась за счет ограничения количества функций в неортогональном гауссовом базисе. Современный вариант [5] гауссовой декомпозиции на базе метода наименьших квадратов использует аддитивный нелинейный регуляризирующий член – регуляризатор, который формально описывает обобщенную длину контура кривой получаемого решения и который имеет один свободно настраиваемый параметр. Применение свободного параметра позволяет менять свойства регуляризатора, настраивая процесс обработки данных. Так, если значение свободного параметра равно нулю, то этот регуляризатор становится  $L_1$ -нормой первой производной искомого решения, реализуя принцип ограничения полной вариации решения («minimal total variation principle» [6]) в рамках метода LASSO Тибширани. Однако если значение свободного параметра является достаточно большим, то регуляризатор становится близким к  $L_2$ -норме первой производной искомого решения, реализуя указанный принцип в рамках метода регуляризации Тихонова. Результаты [5] показывают хорошие возможности предложенного подхода по автоматической (автономной) декомпозиции суммы гауссиан, которые не уступают возможностям человека. Однако область его применимости ограничена теми случаями, когда отсутствуют выбросы или пропуски значений в исходных данных.

Пакет MATLAB [7] содержит встроенную функцию  $\text{fit}()$ , которая позволяет выполнять подгонку (fitting) различных кривых под последовательность данных и, в частности, подгонку от одной гауссовой кривой до суммы из восьми гауссовых кривых. Функция  $\text{fit}()$  показывает хорошие результаты в тех случаях, когда исходная последовательность данных отвечает хорошо различимым объектам и когда она искажена умеренным шумом гауссовского типа. Нарушение одного из этих условий может привести к неверным результатам или даже к сбою в ее работе. В частности, функция  $\text{fit}()$  терпит крах для шума с законом распределения Коши. Так, простой тест (длина последовательности данных  $N = 256$ ; шаг  $\Delta x = 1$ ; одна гауссиана с параметрами:  $A = 1$ ,  $m = 100 \Delta x$ ,  $\sigma = 8 \Delta x$ ; параметры шума Коши: сдвиг равен нулю, мас-

штаб равен  $0,1 \Delta x$ ; начальное состояние генератора псевдослучайных чисел равно нулю) дал положительный результат только для одной из 10 случайных реализаций. Более того, при продолжении этого теста функция  $\text{fit}()$  дала программный сбой для 15-й реализации шума, формируя нечисло (Not-a-Number) и аварийно завершаясь.

Существуют различные модели импульсного шума. Одной из них является шум с законом распределения Коши [8], для подавления которого разработан метод «мириадной фильтрации» [9]. Другой моделью импульсного шума с более тяжелыми хвостами является шум с «меридианным» законом распределения, для подавления которого предложен метод «меридианной фильтрации» [10]. В [11] на базе принципа максимального правдоподобия выполнено обобщение этих двух методов на случай шума с законом обобщенного распределения Коши, где параметр тяжести хвостов закона распределения меняется в диапазоне от 0 до 2, причем «меридианному» шуму отвечает значение 1, а шуму Коши отвечает значение 2. Однако в [9] отмечено, что использование принципа максимального правдоподобия не позволяет получить аналитическое описание методов оптимальной обработки для всех типов шума. Это обусловлено тем, что не всегда есть возможность получить аналитическое выражение для закона распределения шума, причем даже тогда, когда известна соответствующая характеристическая функция [8].

В [3] описан другой принцип обработки, который основан на требовании минимизировать протяженность данных. Учитывая физический смысл независимой переменной, понятие «протяженность» интерпретируется поразному: как длительность временных сигналов [12], как пространственная протяженность [13] или просто протяженность [14] одномерных пространственных сигналов и их спектров, как площадь, объем и т.д. многомерных сигналов и изображений [3]. Для решения практических задач понятие «протяженность» задано нестрогой формулировкой, которую для общего случая отражает стоимостная функция (2). Ниже данный принцип применяется к решению задачи гауссовой декомпозиции.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Далее рассмотрим только задачу (5) по следующим причинам: 1) простота записи из-за отсутствия свободного параметра  $\beta$ ; 2) возможность указать на некорректность алгоритма, построенного в [11]; 3) рассмотрение задачи (4) выполняется аналогично.

Так как в общем случае количество гауссиан неизвестно, то для решения задачи (5) в качестве прототипа используем подход Гольцмана Ф. М. [15]. Он заключается в последовательном наращивании порядка используемой модели (в данном случае, количества гауссиан) с проверкой качества получаемых результатов и принятием решения о продолжении или об останове процесса наращивания. Здесь этот подход модифицируется относительно критерия обработки данных, методов определения неизвестных параметров с выбором их начальных значений, а также правила останова.

Фактически, подход в [15] основан на критерии наименьших квадратов и предположении, что шум имеет

нормальный закон распределения с известной дисперсией. Поэтому этот подход невозможно применить, например, к шуму Коши, так как дисперсия шума Коши равна бесконечности в силу расходимости соответствующего интеграла (не путать дисперсию с параметром масштаба шума Коши!). Для устранения этого недостатка далее используем критерий минимума протяженности, согласно которому требуется минимизировать не энергию, а *протяженность* результирующей последовательности данных. Тогда можно предположить, что «декомпозиция» (decomposer) суммы гауссиан, который будет работать по алгоритму наращивания порядка модели, вначале будет выделять самую протяженную гауссиану (точнее, самый протяженный кусок одной из гауссиан), затем гауссиану с меньшей протяженностью и т.д. Поскольку импульсы (выбросы) шума можно считать крайним случаем гауссианы с нулевой протяженностью, то правило останова процесса наращивания порядка модели можно связать с параметром полуширины гауссианы, которая была построена последней. Это правило для дискретного случая можно сформулировать так: останов процесса наращивания порядка модели выполняется тогда, когда после исключения из рассмотрения всех гауссиан с малой полушириной невозможно построить ни одной гауссианы с большей полушириной. Таким образом, правило останова состоит в сравнении полуширины последней построенной гауссианы с заданным порогом полуширины, который для случая наличия одиночных выбросов можно выбрать равным  $\Delta x / 2$ . Для существенного уменьшения вероятности построения ложной гауссианы из-за появления двух выбросов подряд в одну сторону, правило останова можно усилить, полагая порог полуширины равным не  $\Delta x / 2$ , а  $\Delta x$  или еще большей величине. Отметим, что указанное правило оказалось результативным не только для шума Коши, но и для шума Гаусса. Однако для случая отсутствия шума оно является пассивным.

Рассмотрим два возможных подхода к определению значений неизвестных параметров одиночной гауссианы на основе задачи (5). Полагая  $p = 1$ , из (5) имеем

$$\arg \min_{A, m, \sigma} \left\{ \sum_{i=1}^N \ln \left( 1 + |g_i - A e^{-\frac{(x_i - m)^2}{2\sigma^2}}|^q / \alpha^q \right) \right\}. \quad (6)$$

Для удобства обозначим  $\gamma = 1/(2\sigma^2)$  и перепишем (6) в виде

$$\arg \min_{A, m, \gamma} \left\{ \sum_{i=1}^N \ln \left( 1 + |g_i - A e^{-\gamma(x_i - m)^2}|^q / \alpha^q \right) \right\}. \quad (7)$$

Первый подход к решению задачи (7) основан на методе итераций, который применяется к системе нелинейных уравнений, получаемой из необходимого условия минимума целевой функции в (7). Вычисляя первые производные и формально учитывая  $\partial / \partial x(|x|^q) = q|x|^{q-1} \operatorname{sgn}(x)$ , из (7) получаем систему нелинейных уравнений

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \theta(x_i) &= 0; \\ \sum_{i=1}^N \theta(x_i)(x_i - m) &= 0; \\ \sum_{i=1}^N \theta(x_i)(x_i - m)^2 &= 0; \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\theta(x) = \left( 1 + |r(x)|^q / \alpha^q \right)^{-1} |r(x)|^{q-1} \operatorname{sgn}[r(x)] e^{-\gamma(x-m)^2}$$

и  $r(x) = g(x) - A e^{-\gamma(x-m)^2}$ . Если далее использовать соотношение  $|x|^{q-1} \operatorname{sgn}(x) = x|x|^{q-2}$  и метод неподвижной точки (fixed-point algorithm), то можно построить такие рекурсии для неизвестных параметров:

$$\begin{aligned} A &= \sum_{i=1}^N \phi(x_i) g(x_i) / \sum_{i=1}^N \phi(x_i) e^{-\gamma(x_i - m)^2}; \\ m &= \sum_{i=1}^N x_i \phi(x_i) r(x_i) / \sum_{i=1}^N \phi(x_i) r(x_i); \\ \gamma &= -\frac{1}{m^2} \ln \left[ \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 \phi(x_i) g(x_i) / \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2 \phi(x_i) A e^{-\gamma(x_i^2 - 2x_i m)} \right], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\phi(x) = \left( 1 + |r(x)|^q / \alpha^q \right)^{-1} |r(x)|^{q-2} e^{-\gamma(x-m)^2}$  и где правая часть равенств вычисляется для предыдущих значений параметров  $A$ ,  $m$  и  $\gamma$ , а слева записаны вычисляемые текущие значения параметров. Рекурсии (9) продолжают до стабилизации получаемых значений  $A$ ,  $m$  и  $\gamma$ . Отметим, что по такой же схеме в [11] построен алгоритм совместного оценивания параметров сдвига, масштаба и тяжести хвостов импульсного шума с законом обобщенного распределения Коши.

К сожалению, применение описанного подхода является ограниченным по двум причинам. Во-первых, необходимое условие минимума не является достаточным. Например, непрерывная функция  $|x|$  имеет минимум в точке  $x = 0$ , однако ее первая производная в точке  $x = 0$  не только не равна нулю, а просто не существует, так как она терпит разрыв со значения  $-1$  на  $+1$ . Непрерывная функция  $|x|^q$ ;  $0 < q < 1$  также достигает минимум в точке  $x = 0$ , однако и ее первая производная в точке  $x = 0$  не существует, так как терпит «бесконечный» разрыв, меняясь скачком со значения  $-\infty$  на  $+\infty$ . Поэтому описанный подход не будет работать в случае, когда локальный (глобальный) минимум не является строго выпуклым, т.е. когда  $0 < q \leq 1$ . Во-вторых, из-за способа организации рекурсии (9) данный подход не будет работать и

в случае  $1 < q < 2$ , так как каждая из формул (9) содержит дробь, в которой и числитель, и знаменатель могут одновременно обращаться в бесконечность, формируя при вычислениях неопределенность вида  $\infty/\infty$  и приводя к сбою. Такой сбой обязательно произойдет в том случае, если хотя бы в одной точке  $x_i$  значение функции  $r(x)$ , которая задает невязку модели и данных, будет равно нулю. Здесь возникает парадоксальная ситуация, когда алгоритм подгонки модельной кривой к данным работает тем нестабильнее, чем точнее модельная кривая соответствует данным. В частности, если данные искажены шумом Коши с параметром масштаба  $\nu$ , а  $\varepsilon$  есть граница точности по представлению самого малого числа, то вероятность того, что шум примет «нулевое» значение (т.е. значение внутри интервала  $(-\varepsilon, \varepsilon)$ , которое равносильно нулю), равна  $(2/\pi)\arctg(\varepsilon/\nu)$ . Отсюда видно, что при уменьшении масштаба  $\nu$  шума Коши вероятность сбоя действительно повышается, т.е. чем меньше шум, тем вероятнее сбой. Однако эта проблема не возникает тогда, когда  $q \geq 2$ . Таким образом, неравенство  $q \geq 2$  определяет область применимости первого подхода и, в частности, алгоритма в [11].

Второй подход основан на минимизации функционала протяженности с помощью метода прямого пассивного поиска, в котором пробные точки выбираются из условия равенства нулю невязки в этих точках, а именно из условия

$$g_i - Ae^{-\gamma(x_i-m)^2} = 0; \quad i = 1, \dots, N. \quad (10)$$

Таким способом можно построить не больше  $N$  пробных точек для каждого параметра, среди которых необходимо выбрать ту точку, которая дает наименьшее значение целевой функции в (7). Далее рассмотрим построение пробных точек более детально.

Из (10) непосредственно следует набор пробных точек для определения значения амплитуды гауссианы, а именно

$$A_i = g_i e^{\gamma(x_i-m)^2}; \quad i = 1, \dots, N, \quad (11)$$

где параметры  $m$  и  $\gamma$  считаются фиксированными. Набор пробных точек, получаемый из (10) для определения значения положения гауссианы, имеет вид

$$m_i = x_i - \sqrt{|\ln(g_i/A)|/\gamma} = x_i - \sigma\sqrt{2|\ln(g_i/A)|}; \quad i = 1, \dots, N, \quad (12)$$

где  $0 < g_i/A \leq 1$ , а фиксированными считаются параметры  $A$  и  $\gamma$ . Подчеркнем, что указанное здесь неравенство позволяет отсеять выбросы, знак которых совпадает со знаком амплитуды, а также те элементы данных, знак которых противоположен знаку амплитуды. Наконец, набор пробных точек, получаемый из (10) для определения значения полуширины гауссианы, имеет вид

$$\sigma_i = 1/\sqrt{2\gamma_i} = |x_i - m|/\sqrt{2|\ln(g_i/A)|}; \quad x_i \neq m; \quad i = 1, \dots, N, \quad (13)$$

где  $0 < g_i/A < 1$ , а фиксированными считаются параметры  $A$  и  $m$ . В отличие от (12), здесь используется неравен-

ство со строгой правой частью. Это обусловлено: 1) требованием  $x_i \neq m$ ; 2) предположением, что случай  $\sigma = \infty$ , когда гауссиана превращается в константу, исследуется отдельно, например, на самом первом этапе вычислений. С целью уменьшения количества требуемых вычислений каждый из наборов пробных точек (11)–(13) можно уменьшить путем отбрасывания заведомо непригодных значений. Алгоритмически использование любого набора пробных точек должно быть таким: сначала в качестве наилучшего значения текущего параметра фиксируется предыдущее значение этого параметра, а затем выполняется его сравнение с другими возможными значениями, получаемыми из соответствующего набора (11), (12) или (13). На самом первом шаге вычислений предыдущими значениями параметров должны быть их начальные значения.

Удачный выбор начальных значений параметров гауссианы является предпосылкой успешного решения задачи (7). Предлагаемый способ выбора начальных значений параметров гауссианы заключается в том, чтобы поочередно испытать все возможные элементы исходных данных в качестве таких, которые задают положение и амплитуду гауссианы, а третий параметр – полуширину – рассчитать путем решения задачи минимизации для набора (13). Эти вычисления для каждого элемента данных необходимо предварить установкой значения полуширины в бесконечность и вычислением соответствующего значения целевой функции в (7), а завершить сравнением всех полученных значений целевой функции с целью выбора той тройки значений параметров  $A$ ,  $m$  и  $\sigma$ , для которых целевая функция принимает наименьшее значение.

Алгоритм наращивания порядка модели имеет следующий вид. Вначале полагаем  $P=1$ , вычисляем  $A_1, m_1, \sigma_1$  и проверяем условие останова вычислений. Если оно выполняется, то делаем вывод: « $P=0$ » и завершаем вычисления. Иначе наращиваем порядок модели, полагая  $P=2$ . Далее фиксируем  $A_1, m_1, \sigma_1$ , вычисляем  $A_2, m_2, \sigma_2$  и проверяем условие останова. Если оно выполняется, то делаем вывод: « $P=1$ » и завершаем вычисления. Иначе, фиксируя  $A_2, m_2, \sigma_2$ , уточняем  $A_1, m_1, \sigma_1$ . Затем фиксируем  $A_1, m_1, \sigma_1$  и уточняем  $A_2, m_2, \sigma_2$ . Далее фиксируем  $A_2, m_2, \sigma_2$  и уточняем  $A_1, m_1, \sigma_1$  и т.д. до стабилизации значения целевой функции в (5). После этого опять наращиваем порядок модели на единицу, вычисляем значения новой тройки параметров, проверяем условие останова и, в случае продолжения вычислений, уточняем полученные значения параметров. И так далее. Процесс наращивания  $P$  прекращается по выполнению условия останова.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для демонстрации возможностей предложенного подхода было выполнено числовое моделирование задач подгонки одиночной гауссовой кривой и декомпозиции суммы пяти гауссиан. Результаты этого моделирования сравнивались с результатами работы MATLAB-функции  $fit()$  при задании типовой модели ‘gauss1’ (для задачи подгонки) и ‘gauss5’ (для задачи декомпозиции) и

опцій 'Method'='NonlinearLeastSquares' и 'Robust'='LAR'. Генерация шума Коши выполнялась по формуле:  $\zeta = v \cdot \text{tg}[\pi(\xi - 0,5)]$ , где  $\zeta$  – случайная величина, которая распределена по закону Коши,  $\xi$  – случайная величина, которая распределена по равномерному закону в открытом интервале (0, 1) и которая генерировалась MATLAB-функцией *rand()*,  $v$  – параметр масштаба шума Коши. Для генерации шума Гаусса использовалась функция *randn()*. Моделирование выполнялось для  $N = 500$  и  $\Delta x = 1$ .

Для задачи подгонки исходная последовательность данных была образована одиночной гауссовой кривой (1) с параметрами  $A = 1$ ,  $m = 200\Delta x$ ,  $\sigma = 16\Delta x$ . Эта последовательность искажалась шумом Коши с нулевым параметром сдвига и параметром масштаба  $v = 0,1$ . Для набора статистики была выполнена генерация 100 различных реализаций шума Коши. При числовом решении этой задачи априорно считалось, что  $P = 1$ .

Для задачи декомпозиции исходная последовательность данных была образована суммой пяти гауссовых функций с параметрами  $A_1 = 1$ ,  $m_1 = 140\Delta x$ ,  $\sigma_1 = 16\Delta x$ ;  $A_2 = 0,5$ ,  $m_2 = 180\Delta x$ ,  $\sigma_2 = 64\Delta x$ ;  $A_3 = 1,25$ ,  $m_3 = 200\Delta x$ ,

$\sigma_3 = 10\Delta x$ ;  $A_4 = 0,5$ ,  $m_4 = 300\Delta x$ ,  $\sigma_4 = 16\Delta x$ ;  $A_5 = 1$ ,  $m_5 = 320\Delta x$ ,  $\sigma_5 = 5\Delta x$ . Моделировались три случая, когда эта последовательность данных не искажалась шумом, искажалась шумом Гаусса (математическое ожидание равно нулю; стандартное отклонение равно 0,1) и искажалась шумом Коши (параметр сдвига равен нулю; параметр масштаба равен 0,1). При числовом решении задачи декомпозиции для случая отсутствия шума априорно полагалось  $P = 5$ , а для случаев наличия шума Гаусса и шума Коши считалось, что значение  $P$  априорно неизвестно, но будет определено после останова процесса наращивания порядка модели. При моделировании этот останов выполнялся тогда, когда полуширина последней построенной гауссианы оказывалась меньше величины  $\Delta x$ , что для случаев наличия шума практически происходило при увеличении значения  $P = 5$  на единицу. При использовании MATLAB-функции *fit()* для всех трех случаев априорно считалось, что  $P = 5$ .

**5 РЕЗУЛЬТАТЫ**

Результаты числового моделирования задачи подгонки одиночной гауссовой кривой и ее решения на основе критерия минимума протяженности для случая, когда данные искажены шумом Коши, представлены на рис. 1 и рис. 2.

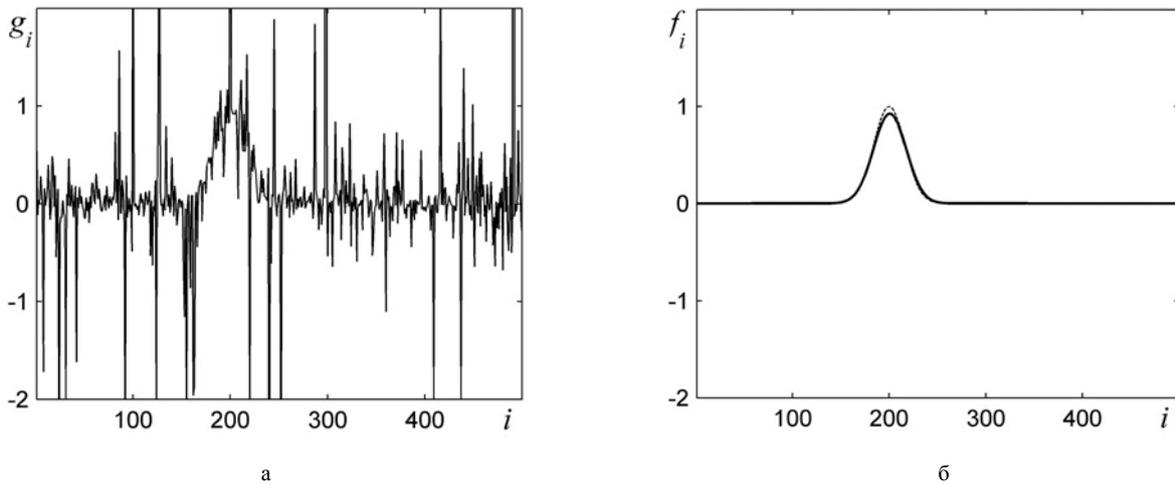


Рисунок 1 – Подгонка одиночной гауссовой кривой под данные, искаженные шумом Коши: а – исходные данные; б – результат подгонки на основе критерия минимума протяженности

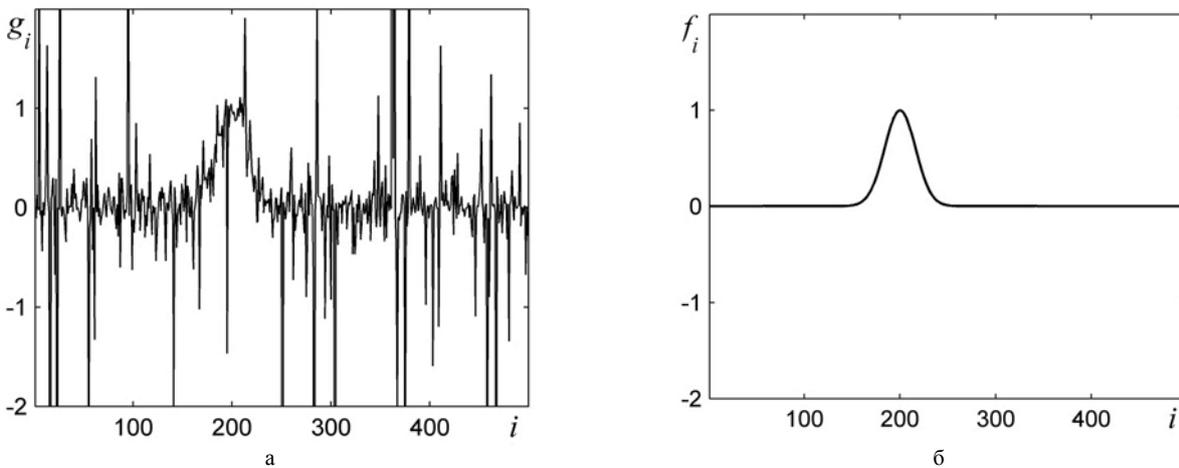


Рисунок 2 – Арифметическое усреднение по 100 случайным реализациям: а – исходных данных, искаженных шумом Коши; б – результатов подгонки

На рис. 1а приведена исходная последовательность данных, а на рис. 1б – модель гауссианы (пунктирная линия) и результат обработки (сплошная линия), который получен путем решения задачи (7) для  $q = 2$  и  $\alpha = v$ . Видно, что сплошная линия почти полностью накрыла пунктирную линию, за исключением окрестности точки  $i = 200$ . На рис. 2а приведен результат арифметического усреднения исходных данных по 100 реализациям шума Коши, который демонстрирует бесполезность такого усреднения (теоретически, арифметическое усреднение не меняет ни природу, ни параметры шума Коши). На рис. 2б приведен график арифметического усреднения результатов подгонки, который визуально полностью совпал с графиком модели.

Результаты работы MATLAB-функции `fit()` для решения этой задачи здесь не иллюстрируются, но они показали следующее. Только малое число (около 10) из 100 реализаций зашумленной последовательности данных обрабатывалось визуально верно. Обработка остальных реализаций приводила к существенным ошибкам, так как за полезную гауссиану принимался выброс импульсного шума большой амплитуды. Однако в отличие от упомянутого выше примера, при этих вычислениях программный сбой не происходил.

Результаты числового моделирования задачи декомпозиции приведены на рис. 3.

На рис. 3а, рис. 3г и рис. 3ж отображена исходная последовательность данных при отсутствии шума, при наличии шума Гаусса и при наличии шума Коши, соот-

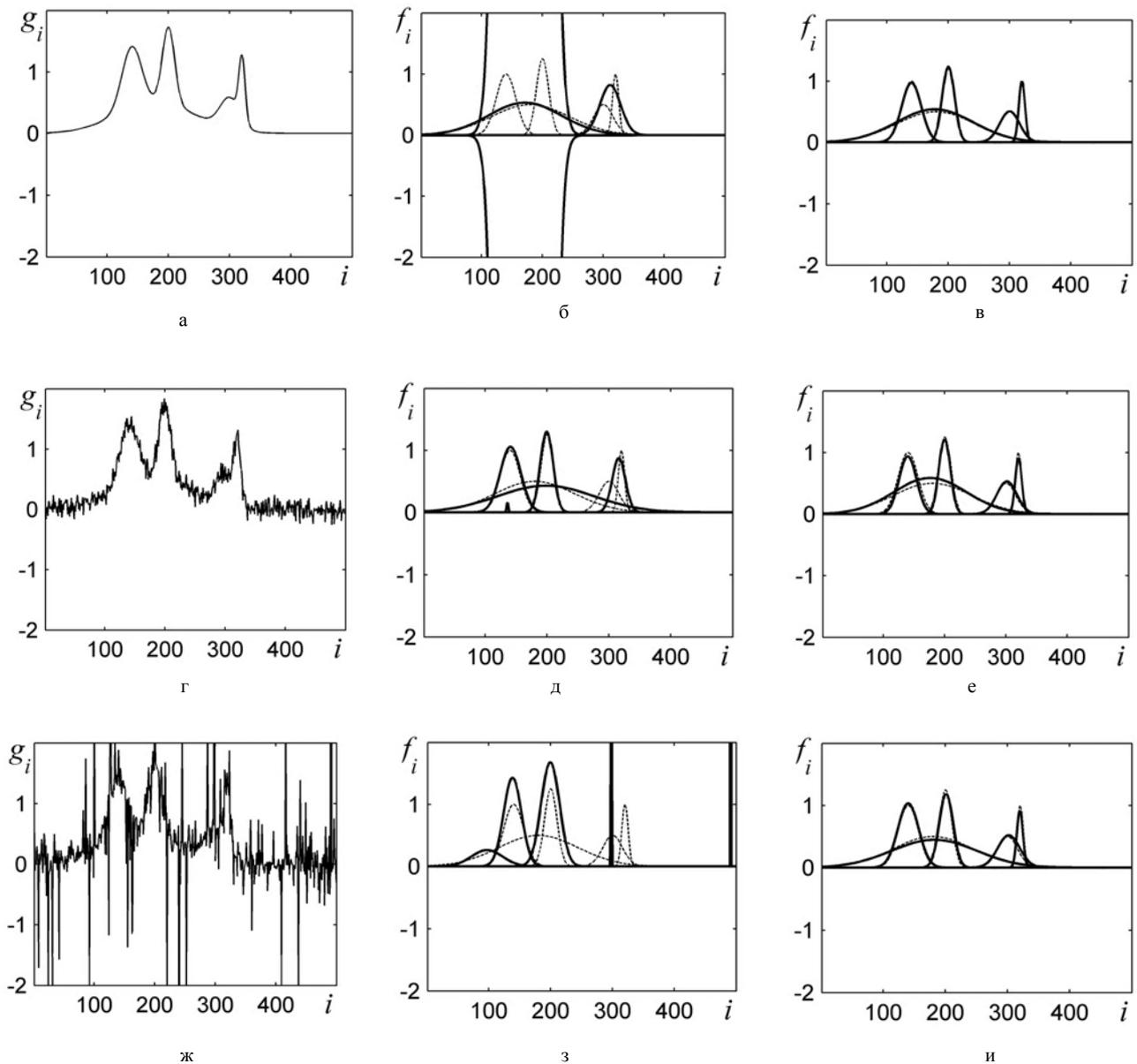


Рисунок 3 – Декомпозиция суммы пяти гауссовых кривых. Исходная последовательность при: а – отсутствии шума, г – наличии шума Гаусса, ж – наличии шума Коши. Результаты декомпозиции на основе функции `fit()`: б – а, д – г, з – ж. Результаты декомпозиции на основе критерия минимума протяженности: в – а, е – г, и – ж

ветственно. На рис. 3б, рис. 3д и рис. 3з отобраны истинные гауссианы (пунктирные линии) и результат декомпозиции (сплошные линии), который получен с помощью функции  $\text{fit}()$  при использовании типовой модели 'gauss5'. Видно, что графики функций, которые описывают результат декомпозиции, редко совпадают с графиками функций, которые описывают истинные гауссианы. На рис. 3в, рис. 3е и рис. 3 и также отобраны истинные гауссианы (пунктирные линии) и результат декомпозиции (сплошные линии), который получен с помощью числового решения задачи (5) на основе алгоритма наращивания порядка модели при  $q = 2$  для  $\alpha = 10^{-3}$ ,  $\alpha = 10^{-1}$  и  $\alpha = 10^{-1}$ , соответственно. Здесь налицо практически полное совпадение всех графиков результата декомпозиции с графиками истинных гауссиан.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты числового моделирования задачи подгонки одиночной гауссовой кривой для случая, когда данные искажены импульсным шумом Коши, демонстрируют высокое качество и устойчивость работы предложенного подхода.

Результаты числового моделирования задачи декомпозиции для суммы пяти гауссовых функций демонстрируют плохое качество работы стандартной функции  $\text{fit}()$  не только для случаев наличия шума, но и для случая его отсутствия. Последнее обусловлено тем, что в заданной сумме не все гауссовы функции являются хорошо различимыми. С другой стороны, предложенный подход, который построен на основе критерия минимума протяженности, уверенно решает задачу декомпозиции для всех трех случаев.

Недостатком предложенного подхода является большой объем вычислений. Однако его можно уменьшить за счет привлечения априорных сведений об ожидаемых диапазонах и сетке значений параметров гауссовых функций.

## ВЫВОДЫ

На основе критерия минимума протяженности предложен новый подход к решению задачи декомпозиции суммы гауссиан. Данный подход основан на решении задачи минимизации соответствующего функционала и реализуется с помощью метода прямого пассивного поиска, в котором пробные точки выбираются из условия равенства нулю невязки в этих точках. Результаты числового моделирования показали, что предложенный подход является эффективным инструментом декомпозиции суммы гауссовых функций как для случая отсутствия шума и их плохой различимости (отделимости друг от друга), так и при наличии обычного шума с законом распределения Гаусса и импульсного шума с законом распределения Коши.

Представленные результаты могут быть обобщены на случай суммы функций другой формы и/или с другим числом неизвестных параметров. В частности, исходной моделью для обработки может выступать сумма функций Лоренца.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской темы Днепропетровского национального университета «Методы и информационные технологии цифровой обработки многоканальных данных» (номер государственной регистрации 0116U001297).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Titchmarsh E. C. The theory of functions / E. C. Titchmarsh. – New York : Oxford University Press, 1939. – 454 p.
2. Borulko V. F. Minimum-duration filtering / V. F. Borulko, S. M. Vovk // Радиоэлектроника, информатика, управління. – 2016. – № 1. – С. 7–14. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-1.
3. Vovk S. M. Statement of a problem of definition of linear signals parameters in quasinormed space / S. M. Vovk, V. F. Borul'ko // Radioelectronics and Communications Systems. – 2010. – Vol. 53. – P. 367–375.
4. Goshtasby A. Curve fitting by a sum of Gaussians / A. Goshtasby, W. D. O'Neill // Graphical Models and Image Processing. – 1994. – Vol. 56, No. 4. – P. 281–288.
5. Lindner R. R. Autonomous Gaussian decomposition / [R. R. Lindner, C. Vera-Ciro, C. E. Murray, S. Stanimirovic, B. L. Babler, C. Heiles, P. Hennebel, W. M. Goss, J. Dickey // The Astronomical Journal. – 2015. – Vol. 149, No. 4. – P. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
6. Little M. A. Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. I. Background theory / M. A. Little, N. S. Jones // Proceedings of the Royal Society A. – 2011. – Vol. 467. – P. 3088–3114. DOI: 10.1098/rspa.2010.0671.
7. Гилат А. MATLAB. Теория и практика / А. Гилат. – М.: ДМК ПРЕСС, 2016. – 416 с.
8. Speyer J. Stochastic Estimation and Control for Linear Systems with Cauchy Noise / J. Speyer, M. Idan, J. Fernández // Advances in Estimation, Navigation, and Spacecraft Control. – 2015. – Chapter 6. – P. 95–118. DOI: 10.1007/978-3-662-44785-7\_6.
9. Gonzalez J. G. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments / J. G. Gonzalez, G. R. Arce // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2001. – Vol. 49, No. 2. – P. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
10. Aysal T. C. Meridian filtering for robust signal processing / T. C. Aysal, K. E. Barner // IEEE Trans. on Signal Processing. – 2007. – Vol. 55, No. 8. – P. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.
11. Carrillo R. E. Generalized Cauchy distribution based robust estimation / R. E. Carrillo, T. C. Aysal, K. E. Barner // Proc. of Int. Conf. Acoustic, Speech and Signal Processing, ICASSP 2008, Las Vegas, 2008. – P. 3389–3392. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518378.
12. Vovk S. M. A minimum-duration method for recovering finite signals / S. M. Vovk, V. F. Borul'ko // Radioelectronics and Communications Systems. – 1991. – Vol. 34. – P. 67–69.
13. Борулько В. Ф. Определение источников в одномерной решетке электрических диполей на основе принципа минимальной пространственной протяженности решения / В. Ф. Борулько, С. М. Вовк // Радиофизика и электроника. – 2011. – Т. 2(16), № 2. – С. 14–20.
14. Borulko V. F. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources / V. F. Borulko, S. M. Vovk // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, No. 7. – P. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
15. Гольцман Ф. М. Физический эксперимент и статистические выводы / Ф. М. Гольцман. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1982. – 192 с.

Статья поступила в редакцию 09.08.2016.

После доработки 08.10.2016.

Вовк С. М.

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

#### ДЕКОМПОЗИЦІЯ СУМИ ГАУССІАН, СПОТВОРЕНИХ ІМПУЛЬСНИМ ШУМОМ

**Актуальність.** Застосування традиційних методів декомпозиції суми гауссових функцій для випадку, коли початкові дані спотворені шумом імпульсного типу, приводить до значних помилок. Об'єктом даного дослідження є процес декомпозиції суми гауссових функцій в імпульсному шумовому середовищі.

**Мета роботи** – розробка методу декомпозиції суми гауссових функцій для випадку, коли дані спотворені шумом імпульсного типу.

**Метод.** Запропонований метод ґрунтується на решенні задачі безумовної мінімізації заданої цільової функції за невідомими параметрами. Постановка задачі виконана на основі критерія мінімуму протяжності, який вживається до відхилення рішення. Процес декомпозиції реалізується ітераційно шляхом послідовного виокремлення гауссових функцій з їх суми, де спочатку виокремлюється найбільш протяжна гауссова функція, потім виокремлюється менш протяжна і т.д. Для визначення значень параметрів гауссової функції описано два підходи. Перший підхід заснований на методі ітерацій, який використовується для рішення системи нелінійних рівнянь, що отримується з необхідної умови мінімуму цільової функції. Другий підхід заснований на методі прямого пасивного пошуку мінімуму цільової функції, в якому спробні точки обираються за умови, що відхил в цих точках дорівнює нулю. Зазначено, що другий підхід має більш широку область застосувань, ніж перший. На основі другого підходу побудовано ітераційний алгоритм, для якого описано спосіб вибору початкових значень параметрів гауссової функції в умовах наявності імпульсного шуму, сформульовані правила вибору найкращих значень її параметрів на кожній ітерації та приведено правило зупинки обчислень.

**Результати.** Моделювання задач припасування поодинокі гауссової кривої до даних та декомпозиції суми п'яти гауссових функцій для випадку, коли відповідні початкові дані спотворені шумом імпульсного типу з законом розподілу Коші, підтвердили ефективність запропонованого методу.

**Висновки.** Запропонований метод є ефективним інструментом декомпозиції суми гауссових функцій, спотворених шумом імпульсного типу з законом розподілу Коші. Він може бути поширений на випадок суми функцій іншої форми та інших невідомих параметрів.

**Ключові слова:** гауссова декомпозиція, обробка даних, протяжність.

Vovk S. M.

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

#### DECOMPOSITION OF SUM OF GAUSSIANS DISTORTED BY IMPULSIVE NOISE

**Context.** Using of the conventional methods of Gaussian decomposition in the case, when the original data are distorted by impulsive noise, leads to considerable errors. The object of this study is the process of Gaussian decomposition in an impulsive noise environment.

**Objective.** The goal of this work is the development of a method of Gaussian decomposition for the case when the data are distorted by impulsive noise.

**Method.** The proposed method of Gaussian decomposition is based on solving the problem of unconstrained minimization the objective function by unknown parameters. The problem statement is built on the criterion of a minimum extent which is used to the solution residual. Process of Gaussian decomposition is implemented iteratively by successive selecting from the sum of Gaussian functions such a Gaussian function, which initially is the most extended, and then the one which is less extended, etc. To determine the parameter values of Gaussian function the two approaches are described. The first approach is based on the iterative method, which is used for solving the set of nonlinear equations, derived from the necessary conditions for the minimum of objective function. The second approach is based on the method of passive searching of objective function minimum, where the test points are chosen from the condition that in these points the discrepancy is zero. It is indicated that the second approach has a wider range of applicability than the first one. On the basis of the second approach, an iterative algorithm is built. The way of selecting the initial parameter values of Gaussian function under impulsive noise environment is presented. Also, the rule for choosing the best values of Gaussian parameters and the rule to stop of computing are formulated.

**Results.** Simulations for the problems of the single Gaussian curve fitting to data and of the Gaussian decomposition for the sum of five Gaussians in the case, when the data are distorted by Cauchy noise, confirmed the performance of the proposed method.

**Conclusions.** The proposed method is the efficient tool of Gaussian decomposition for the sum of Gaussians distorted by the impulsive noise with Cauchy distribution. It can be expanded to the case when the functions have other shape and other unknown parameters.

**Keywords:** Gaussian decomposition, data processing, extent.

#### REFERENCES

1. Titchmarsh E. C. The theory of functions. New York, Oxford University Press, 1939, 454 p.
2. Borulko V. F., Vovk S. M. Minimum-duration filtering, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 1, pp. 7–14. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-1.
3. Vovk S. M., Borul'ko V. F. Statement of a problem of definition of linear signals parameters in quasinormed space, *Radioelectronics and Communications Systems*, 2010, Vol. 53, pp. 367–375.
4. Goshtasby A., O'Neill W. D. Curve fitting by a sum of Gaussians, *Graphical Models and Image Processing*, 1994, Vol. 56, No. 4, pp. 281–288.
5. Lindner R. R., Vera-Ciro C., Murray C. E., Stanimirovic S., Babler B. L., Heiles C., Hennebel P., Goss W. M., Dickey J. Autonomous Gaussian decomposition, *The Astronomical Journal*, 2015, Vol. 149, No. 4, pp. 138–149. DOI: 10.1088/0004-6256/149/4/138.
6. Little M. A., Jones N. S. Generalized methods and solvers for noise removal from piecewise constant signals. I. Background theory, *Proceedings of the Royal Society A*, 2011, Vol. 467, pp. 3088–3114. DOI: 10.1098/rspa.2010.0671.
7. Gilat A. MATLAB. Teoriya i praktika. Moskva, DMK PRESS, 2016, 416 p.
8. Speyer J., Idan M., Ferrández J. Stochastic Estimation and Control for Linear Systems with Cauchy Noise, *Advances in Estimation, Navigation, and Spacecraft Control*, 2015, Chapter 6, pp. 95–118. DOI: 10.1007/978-3-662-44785-7\_6.
9. Gonzalez J. G., Arce G. R. Optimality of the myriad filter in practical impulsive-noise environments, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2001, Vol. 49, No. 2, pp. 438–441. DOI: 10.1109/78.902126.
10. Aysal T. C., Barner K. E. Meridian filtering for robust signal processing, *IEEE Trans. on Signal Processing*, 2007, Vol. 55, No. 8, pp. 3949–3962. DOI: 10.1109/TSP.2007.894383.
11. Carrillo R. E., Aysal T. C., Barner K. E. Generalized Cauchy distribution based robust estimation, *Acoustic, Speech and Signal Processing : IEEE International Conference ICASSP 2008, Las Vegas, 31 March – 4 April 2008 : proceedings*, IEEE, 2008, pp. 3389–3392. DOI: 10.1109/ICASSP.2008.4518378.
12. Vovk S. M., Borul'ko V. F. A minimum-duration method for recovering finite signals, *Radioelectronics and Communications Systems*, 1991, Vol. 34, pp. 67–69.
13. Borulko V. F., Vovk S. M. Opredelenie istochnikov v odnomerroy reshetke elektricheskikh dipoley na osnove printsipa minimalnoy prostranstvennoy protyazhennosti resheniya, *Radiofizika i elektronika*, 2011, Vol. 2 (16), No. 2, pp. 14–20.
14. Borulko V. F., Vovk S. M. Principle of minimum extent in spatial spectrum extrapolation problems of complex-valued sources, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 7, pp. 581–592. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v72.i7.30.
15. Goltsman F. M. Fizicheskiy eksperiment i statisticheskie vyivodyi. Leningrad, Izdatelstvo Leningradskogo Universiteta, 1982, 192 p.

## МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РЕЛЕВАНТНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ МЕДИАННОЙ ОБРАБОТКИ СТРУКТУРНЫХ ОПИСАНИЙ

**Актуальность.** Интенсивное развитие и расширение прикладных возможностей современных систем компьютерного зрения требует углубленного исследования и создания более эффективных и универсальных методов обработки визуальной информации. Основные задачи связаны с исследованием и усовершенствованием информационных технологий распознавания в интегрированном пространстве признаков применительно к описаниям в виде множеств дескрипторов ключевых точек (SURF-признаков) изображений, а также необходимостью оценивания результативности распознавания на прикладных образцах.

**Цель.** Статья сосредоточена на изучении возможности построения и оценивании эффективности применения моделей медианной обработки для осуществления структурного распознавания объектов на изображении в плане получения компрессионного представления данных в пространстве признаков прикладной базы изображений.

**Метод.** Осуществлена трансформация пространства структурных признаков путем приведения его к векторному пространству в целях повышения быстродействия процесса распознавания. В качестве аппарата преобразования применена медианная обработка описаний с формированием конечного упорядоченного списка дескрипторов. Результатом исследования есть создание метода для формирования и вычисления релевантности описаний изображений в трансформированном пространстве признаков.

**Результаты.** За счет внедрения медианных характеристик обеспечивается векторное представление, значительно сокращается объем вычислительных затрат и улучшается быстродействие распознавания. Время распознавания в сравнении с традиционным подходом сокращается в сотни раз при сохранении необходимой эффективности.

Проведено моделирование и экспериментальные исследования предложенного метода распознавания на тестовом множестве изображений, представленных описаниями SURF. Подтверждена результативность метода в плане быстродействия, получены сравнительные оценки качества распознавания для разнообразия вариантов обработки.

**Выводы.** В проведенном исследовании систематизированы и получены перспективные свойства систем распознавания в пространстве структурных признаков изображений. Медианный анализ позволяет вскрыть новые закономерности в эталонной информации в целях эффективного по быстродействию распознавания без снижения показателя результативности.

Научная новизна исследования состоит в синтезе метода структурного распознавания изображений путем применения медианного анализа для формирования сжатого векторного представления для множества дескрипторов в структурном описании изображения. Переход к векторно-списочному виду существенно повышает быстродействие распознавания за счет упрощения обработки.

Практическая ценность работы – получение прикладных программных моделей для модификаций метода структурного распознавания и подтверждение результативности предложенной обработки в конкретных примерах баз изображений.

**Ключевые слова:** компьютерное зрение, структурное распознавание изображений, множество характерных признаков, дескрипторы, метод SURF, медианная обработка, релевантность описаний, быстродействие распознавания.

### НОМЕНКЛАТУРА

SURF – Speeded up robust features (ускоренное выделение устойчивых особенностей);

XП – характерный признак;

$Z \subset R^n$  – описание объекта;

$\{Z^j\}_{j=1}^J$  – множество (база) эталонных описаний;

$s_j = \text{card}(Z^j)$  – число элементов эталона  $Z^j$ ;

$m$  – медиана множества;

$\rho[x(i), v]$  – расстояние между элементами множества;

$D$  – критерий для вычисления медианы;

$R = \{r_{ud}\}$  – симметрическая матрица расстояний раз-

мером  $s_i \times s_i$  между всеми элементами  $Z^i$ ;

$(x(i), v)$  – скалярное произведение векторов;

$z^* = z_1^*, z_2^*, \dots, z_{s_j}^*$  – список дескрипторов в результате медианной обработки;

$\mu$  – значение меры релевантности;

$\Psi$  – мера подобия (расстояние) между векторами, каждая компонента которых является числовым вектором SURF;

$H$  – правило формирования подписков векторов на основе медианной обработки;

$\Psi$  – расстояние между векторами  $z_h^*(i, v), z_h^*(k, v)$ ;

$\varepsilon_z$  – значение порога точности для установления равнозначности элементов.

### ВВЕДЕНИЕ

В структурных методах распознавания изображений в качестве описания визуального объекта выступают конечные множества числовых векторов – дескрипторов характерных признаков (ХП). Распознавание реализуется путем сопоставления (вычисления релевантности) двух множеств векторов для структурных описаний объекта и эталона. Основной практический способ вычисления подобия множеств – голосование, в результате подсчитывается число или доля элементов описания эталонного множества, содержащихся в распознаваемом объекте [1]. Иной способ – применение метрик на множествах, включая аппарат анализа мультимножеств [1–3]. В любом случае невозможно избежать принципа сравнения для элементов «каждый с каждым», что при значительном числе эталонов (сотни) и объемных множествах описаний (каждый эталон состоит из 200–300 ХП) требует ощутимых вычислительных затрат.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Как известно, евклидова норма каждого из элементов множества ХП, сформированного известным методом SURF [6], близка к 1, а среднее значение близко к нулевому вектору, поэтому различение ХП по норме или распознавание эталонов по среднему значению элементов описания не осуществимо [1]. В то же время достаточно информативными есть значения расстояний в пространстве дескрипторов между дескрипторами, составляющими отдельное описание, поэтому в качестве информативной интегральной характеристики могут представлять интерес произвольные функции на множестве расстояний. С этой точки зрения обратим внимание на такую стержневую характеристику, как медиана множества [4]. Применение медианной обработки описания, как показывают наши исследования, позволяет сжать исходное описание одновременно с представлением его в виде списка – вектора дескрипторов, что значительно сокращает требуемый объем вычислений для определения релевантности описаний и распознавания. Если кластеризация осуществляет стратификацию множества ХП по степени близости между собой внутри кластеров, то введенная медианная обработка упорядочивает множество ХП в соответствии с близостью к его медиане.

Целью статьи есть изучение возможности и оценивание эффективности применения методов медианной обработки для осуществления структурного распознавания изображений в плане построения компрессионного представления данных в пространстве признаков прикладной базы изображений. За счет анализа и применения медианных характеристик на множестве структурных элементов обеспечивается переход к векторному представлению, что значительно сокращает объем вычислительных затрат и способствует улучшению быстродействия распознавания.

Задачи исследования – изучение особенностей и усовершенствование информационных технологий распознавания в построенном интегрированном пространстве структурных признаков применительно к описаниям в виде множеств дескрипторов характерных точек изображений, а также оценивание результативности распознавания на прикладных образцах.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Реальный путь значительного урезания объема вычислений – трансформирование пространства эталонных признаков в пространство векторов [3, 5, 10]. Построенный единственный вектор описания эталона уже представляет некоторую обобщенную информацию о множестве ХП. Каждая компонента такого вектора отображает свойства множества в установленном введенным преобразованием аспекте. Определение релевантности двух векторов или отнесение ХП распознаваемого объекта к одному из векторов эталонов значительно проще в вычислительном плане.

Другой практичный путь снижения объема вычислений связан с редукцией элементов множества ХП – выбор наиболее информативного для распознавания подмножества из множества дескрипторов описания [1, 5].

Построение прикладных систем и технологий распознавания требует применения новых более совершенных методов формирования векторных описаний, наряду с такими подходами, как кластеризация [1, 8], разложение по ортогональным составляющим [2, 3, 9], и редукция множества [5, 10].

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пусть имеем конечное множество  $Z = \{Z^i\}_{i=1}^J$  как базу из  $J$  структурных описаний изображений эталонов. Обозначим мощности  $s = \text{card } Z$ ,  $s_i = \text{card } Z^i$ . При этом

$s = \sum_{i=1}^J s_i$ . Описание  $Z^i$  – это конечное множество мощностью  $s_i$  из векторов-дескрипторов SURF размерностью 64 [3].

Обобщенная медиана  $m$  конечного множества  $X = \{x(i)\}_{i=1}^s$  определяется путем минимизации функционала  $D$  [4]:

$$D(v) = \sum_{x(i) \in X} \rho[x(i), v], \quad (1)$$

$$m = \arg \min_{v \in X} D(v). \quad (2)$$

В общем случае  $m$  может не принадлежать  $X$ . Значение  $D$  тем меньше, чем меньше отличается число элементов справа и слева от значения  $m$  по расстоянию до  $m$ .

Определим медиану  $m^i$  для эталона  $Z^i = \{z_1, z_2, \dots, z_{s_i}\}$  с числом элементов  $s_i$  как результат процедуры:

1) вычислим симметрическую матрицу  $R = \{r_{ud}\}$  расстояний размером  $s_i \times s_i$  между всеми элементами  $Z^i$ ; на диагонали матрицы  $R$  стоят нули;

2) определим суммы  $D_1, D_2, \dots, D_{s_i}$  элементов в строках/столбцах матрицы  $R$ :  $D_u = \sum_{d=1}^{s_i} r_{ud}$ ;

3) вычислим  $m^i = \arg \min_u D_u$ .

В результате обработки получаем медиану  $m^i$  как один из элементов  $m^i \in Z^i$ . В целях удобства дальнейшего применения отсортируем элементы структурного описания  $z_1, z_2, \dots, z_{s_i}$  по возрастанию значений сумм  $D_1 \leq D_2 \leq \dots \leq D_{s_i}$ . Определим термин «медианная обработка описания» как преобразование списка дескрипторов структурного описания в соответствии с ранжированным значением критерия  $D$ . В отсортированном списке  $z^* = z_1^*, z_2^*, \dots, z_{s_i}^*$  медиана  $m^i$  множества  $Z^i$  будет расположена на первой позиции. Если вместо метрики  $\rho[x(i), v]$  при вычислении медианы использовать меру подобия, например, нормированный коэффициент корреляции векторов

$$\gamma[x(i), v] = \frac{(x(i), v)}{\|x(i)\| \cdot \|v\|}, \quad (3)$$

где в числителе стоит скалярное произведение, а в знаменателе – произведение норм векторов, то медиана (2)

будет соответствовать максимуму критерия  $D$ , а медианная обработка приведет к ранжированному по убыванию  $D$  списку дескрипторов в соответствии с правилом  $D_1 > D_2 > \dots > D_{s_i}$ . Итак, в результате медианной обработки получаем список  $z^* = z_1^*, z_2^*, \dots, z_{s_i}^*$  дескрипторов, упорядоченный по величине критерия (1).

Теперь необходимо ответить на вопрос, насколько информативна медиана структурного описания в плане вычисления уровня релевантности объекта и эталона, а также различения эталонов  $Z^i$  между собой? Также нужно показать, какие выгоды можно получить в результате осуществления медианной обработки структурного описания.

На наш взгляд, в общем случае на первый вопрос однозначного ответа или оценок не существует. Например, если эталоны состоят из заранее отличающихся, но одинаковых внутри эталона дескрипторов, то уже по одному представителю (это точно будет медиана) их можно уверенно различать между собой. Но, как показывают наши исследования [1, 3, 5], эталоны как описания произвольных объектов чаще всего состоят из групп достаточно близких между собой элементов. Поэтому в одних ситуациях медианы эталонов могут значительно отличаться, в то время как для других обстоятельств они окажутся достаточно близкими. Согласимся, что в общем случае надежно различить два множества по одному их представителю достаточно сложно, хотя медиана уже является результатом интегрального анализа всего множества. Более универсальным и эффективным способом нам представляется построение по результатам медианной обработки нового списка элементов (подмножества в виде списка), более точно отражающего индивидуальные отличительные свойства исходного множества.

Учитывая, что принцип медианной обработки приводит к строгой фиксации последовательности элементов в преобразованном множестве дескрипторов, появляется уникальная возможность трансформировать исходное описание путем редукции к сжатоному списку признаков, где каждый элемент-дескриптор может быть представлен как компонента вектора фиксированных размеров. В результате определение степени релевантности двух описаний объектов можно будет свести к вычислению подобия двух одинаковых по размеру массивов векторов, что, несомненно, более эффективно в прикладном и вычислительном аспекте, чем сопоставление редуцированных подмножеств элементов описаний.

Проанализируем полученный в результате медианной обработки список дескрипторов  $z^* = z_1^*, z_2^*, \dots, z_{s_i}^*$  и обсудим возможные пути построения меры подобия описаний на его основе. Для этого рассмотрим два полных списка  $z^*(i), z^*(k)$  дескрипторов для описаний разных объектов, имеющих в общем случае различающиеся объемы.

Предложим варианты построения уровня релевантности для двух списков:

1) вычислим подобие как расстояние или коэффициент корреляции (3) между их медианами, т.е. между первыми элементами списков;

2) по установленному правилу  $H : z^* \rightarrow z_h^*$  выберем из каждого списка  $z^*(i), z^*(k)$  фиксированное число  $q$  элементов и составим редуцированные списки  $z_h^*(i), z_h^*(k)$  как массивы из одинакового числа  $q$  элементов.

Например, в подсписок  $z_h^*$  из  $q = 3$  элементов правилом  $H$  можно включить первый, средний и последний элементы из списка  $z^*$ ; в подсписок из  $q = 10$  элементов можно включить первые и последние 3 элемента из каждого списка, а также центральные 4 элемента, и т.п.

В общем случае меру  $\mu$  релевантности между описаниями  $z^*(i), z^*(k)$  определим как подобие или расстояние  $\Psi$  между преобразованными списками векторов дескрипторов

$$\mu[z^*(i), z^*(k)] = \Psi[z_h^*(i), z_h^*(k)], \quad (4)$$

каждая компонента которых является числовым вектором SURF. Выражение для  $\Psi$  в (4) можно, например, определить как евклидово расстояние

$$\Psi[z_h^*(i), z_h^*(k)] = \sqrt{\sum_{v=1}^q \psi^2(z_h^*(i, v) - z_h^*(k, v))}, \quad (5)$$

где  $\Psi$  – в свою очередь, расстояние между векторами  $z_h^*(i, v), z_h^*(k, v)$ .

В частном случае релевантность  $\mu$  списков можно также вычислить как

$$\mu[z^*(i), z^*(k)] = \sum_{v=1}^q \psi(z_h^*(i, v), z_h^*(k, v)), \quad (6)$$

т.е. как сумму соответствующих элементов сформированных правилом  $H$  подсписков. Как известно, линейная комбинация метрик вида (6) является метрикой [7]. В качестве примера  $\Psi$  в (6) можно использовать непосредственно коэффициент (3) или евклидово расстояние. В целях сопоставления для различных  $q$  меру (6) нормируют коэффициентом  $q^{-1}$ , получив некоторое среднее значение релевантности.

Таким образом, свойство упорядоченности по критерию (1) позволяет перейти от подобия описаний как множеств к более простому виду подобия (4) на основе сформированного списка векторов. В таком случае степень релевантности определяется как функция подобия между «векторами из векторов».

Традиционная мера релевантности, в основе которой лежит голосование элементов эталона путем их сопоставления с элементами описания распознаваемого объекта, отражает значение числа голосов их эквивалентных элементов относительно максимального числа голосов эталона, т.е.

$$\mu[Z^i, Z^*] = \frac{n^*}{s_i}, \quad (7)$$

где  $n^*$  – число элементов объекта  $Z^*$ , эквивалентных элементам эталона в плане выполнения условия

$$\psi(z(i), z^*) \leq \varepsilon_z, \quad z(i) \in Z^i, z^* \in Z, \quad (8)$$

а значение порога точности  $\varepsilon_z$  для подобия  $\psi(\dots)$  устанавливает равнозначность элементов. При вычислении

коэффициента (3) неравенство в условии (8) изменяет вид:  $\gamma(z(i), z^*) > \varepsilon_z$ . Значение  $\varepsilon_z$  является ключевым параметром для всех процедур голосования, т.к. определяет равноценность двух элементов описаний [1].

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С прикладной точки зрения представляет интерес изучение результативности распознавания и оценивание быстродействия обработки с применением предложенных модификаций вычисления релевантности на базе применения медианного анализа описаний. В качестве базы изображений использован комплект 6 изображений человек из заставки Google, пример изображения и координат точек характерных признаков его структурного описания показан на рис. 1. На рис. 2 размещен вычисленный вектор медианы для описания изображения рис. 1.

В ходе проведенных экспериментов в сравнительном плане исследовался ряд методов для определения релевантности структурных описаний эталона и изображения:

- 1) голосование множества ХП и вычисление показателя (7);
- 2) модификации (4), (6) на основе медианной обработки при различных значениях параметра  $q$ :  $q=1$  – на осно-

ве одной медианы;  $q=3$  – первый, средний и последний дескриптор отсортированного описания по значению критерия (1);  $q=10$ ,  $q=30$  – фиксированное количество дескрипторов описания, отобранных в соответствии с выбранной процедурой сжатия после медианной обработки.

Для вычисления подобия дескрипторов в эксперименте использовался коэффициент корреляции (3). Число ХП в описаниях 6-ти эталонов-человечков, один из которых показан на рис. 1, составило: 198, 206, 183, 184, 174, 173.

Вычислены матрицы релевантности размером  $6 \times 6$  в базе эталонов для рассмотренных вариантов обработки. Очевидно, что конкретные числовые оценки релевантности напрямую зависят от содержания базы, т.е. результативность распознавания определяется набором различаемых объектов. Максимальное значение среди недиагональных элементов вычисленной матрицы релевантности (оценка уровня ложного совпадения) составило: для голосования – 0,67 (эталон 1,2), для модификаций  $q=1$ –0,93 (эталон 4,5),  $q=3$ –0,69 (эталон 3,4),  $q=10$ –0,7 (эталон 2,3),  $q=30$ –0,73 (эталон 2,3). Отсюда видим, что значение характеристики ложного подобия естественно зависит от применяемой меры, показатель для модификации метода при  $q=3$  практически совпадает с показателем для традиционного голосования, а

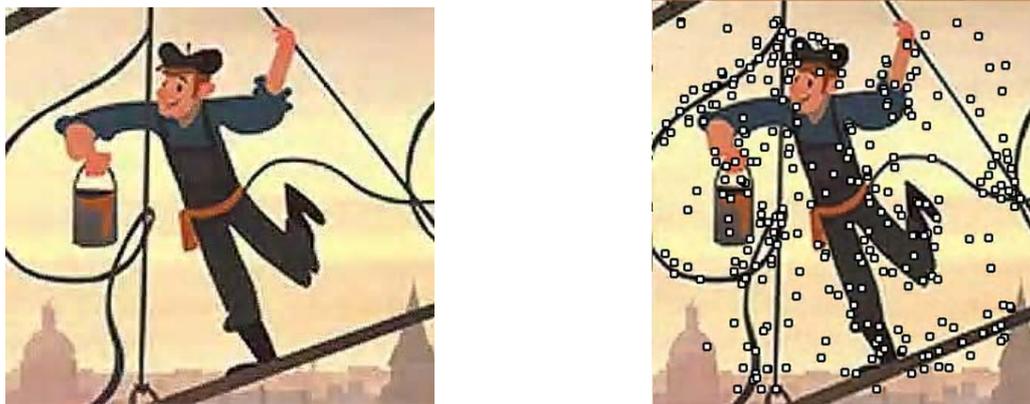


Рисунок 1 – Используемый пример изображения и его множества ХП

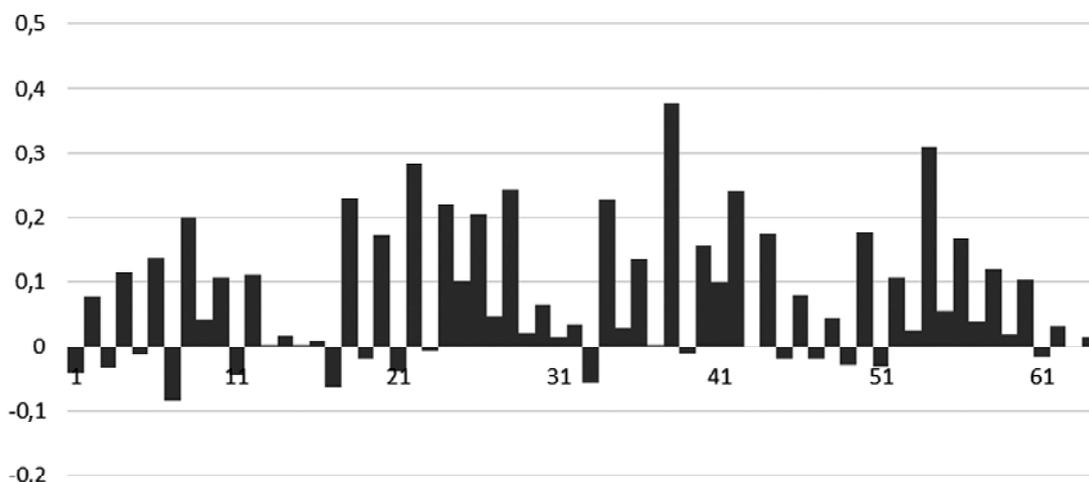


Рисунок 2 – Вектор медианы для описания рис. 1

модификации при  $q=10$ ,  $q=30$  практически не улучшают величину показателя ложного совпадения. Даже при представлении описания только одной медианой ( $q=1$ ) объекты изучаемого комплекта изображений различаются между собой, хотя и в меньшей степени. Для некоторых вариантов отбора списка дескрипторов, например, при равномерном выборе из отсортированного списка, максимум среди недиагональных элементов матрицы достигает значения 0,85, обеспечивая уверенное распознавание.

Изучим теперь вопрос быстродействия распознавания с использованием предложенных модификаций медианной обработки структурного описания. Табл. 1 содержит экспериментальные оценки времени вычисления матрицы релевантности для разных вариантов формирования списка.

Таблица 1 – Оценка времени вычисления для вариантов обработки (мс)

Метод обработки	Голосование (7)	Медианная обработка			
		$q=1$	$q=3$	$q=10$	$q=30$
Время (мс)	12029	10	12	13	41

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видим из табл. 1, применение медианного анализа за счет перехода в пространство векторов и сопоставление векторов вместо множеств впечатляюще сокращают время обработки (до 1200 раз!) в сравнении с традиционным методом голосования, в то время как показатели результативности распознавания, оцениваемые значениями матрицы релевантности, в рассмотренной прикладной базе изображений практически равнозначны традиционному методу. Такой значительный выигрыш во времени обработки можно объяснить реализацией перехода от модели множеств в описании эталонов к пространству упорядоченных списков дескрипторов с сохранением нужной информативности.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Выигрыш в быстродействии возрастает при увеличении числа эталонов и, естественно, уменьшается с ростом  $q$ . Судя по исследуемым вариантам вычислений при разных  $q$ , лучшей в плане показателя времени и эффективности есть модификация медианной обработки при  $q=3$ .

Результативность медианной обработки также подтвердилась в ходе отдельного эксперимента, где входное изображение подвергалось геометрическим преобразованиям поворота и масштабирования, а затем вычислялось значение его релевантности с эталоном для разных модификаций обработки. Если для традиционного метода голосования релевантность снизилась с 1 до 0,7, то для рассмотренных модификаций вычисленные значения составляют: при  $q=1-0,9$ ,  $q=3-0,53$ . Как видим из результатов этого моделирования на конкретных образцах изображений, даже использование лишь одной медианы ( $q=1$ , один вектор в списке) обеспечивает необходимую инвариантность к геометрическим преобразованиям и превышает показатели традиционного подхода.

## ВЫВОДЫ

Медианный анализ позволяет вскрыть новые закономерности в имеющейся эталонной информации в целях эффективного по быстродействию распознавания без снижения показателя результативности.

Важным прикладным свойством применения медианной обработки есть возможность преобразования структурного описания из множественного представления в список ХП, где зафиксирована последовательность дескрипторов по определенному критерию. Это позволяет свести сравнение описания распознаваемого изображения с эталонными описаниями в виде множеств к векторному виду, отражающему релевантность интегрированных характеристик конечного списка дескрипторов.

Предложенная медианная обработка представляет собой вариант редукции структурного описания с формированием вектора-списка дескрипторов, что значительно образом упрощает и ускоряет процесс сопоставления описаний в ходе распознавания.

Медианная обработка непосредственно подходит для вычисления степени релевантности двух структурных описаний, где исключены ложные включения помеховых элементов. Однако описанную процедуру установления релевантности можно усилить традиционной специальной обработкой, учитывающей такого рода помехи.

Научная новизна исследования состоит в синтезе метода структурного распознавания изображений путем применения медианного анализа для формирования стиснутого векторного представления для множества дескрипторов в структурном описании изображения. Переход к векторно-списочному виду существенно увеличивает быстродействие распознавания за счет упрощения обработки.

Практическая ценность работы – получение прикладных программных моделей для модификаций метода структурного распознавания и подтверждение результативности предложенной обработки в конкретных примерах баз изображений.

Перспективой применения медианного анализа на множестве описаний характерных признаков изображений может быть выбор оптимального способа трансформации списка признаков и построение разнообразия моделей релевантности для обеспечения требуемой результативности распознавания.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гороховатский В. А. Структурный анализ и интеллектуальная обработка данных в компьютерном зрении : монография / В. А. Гороховатский. – Х. : Компания СМІТ, 2014. – 316 с.
2. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski. – London : Springer, 2010. – 979 p.
3. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices / [A. V. Gorokhovatsky, V. A. Gorokhovatsky, A. N. Vlasenko, N. V. Vlasenko] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No. 18. – P. 1661–1670.
4. Кохонен Т. Самоорганизующиеся карты / Т. Кохонен ; пер. 3-го англ. изд. – М. : БИНОМ, Лаборатория знаний, 2013. – 655 с.
5. Гороховатский В. А. Систематизация пространства структурных признаков на основе методов самообучения в целях результативного распознавания изображений / В. А. Гороховатский, А. Е. Берестовский, Е. О. Передрий // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 2 (37). – С. 87–94.

6. Bay H. Surf: Speeded up robust features / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Computer Vision: Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings. – Berlin : Springer, 2006. – P. 404–417.
7. Прикладна статистика: Класифікація і зниження розмірності : справ. изд. / [С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин] ; под ред. С. А. Айвазяна. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
8. Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, August 23–27, 2016. – Lviv : Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2016. – 418 p.
9. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / С. Осовский [пер. с польского]. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 344 с.
10. Гороховатский В. А. Применение лингвистических представлений структурных описаний в распознавании изображений / В. А. Гороховатский, М. М. Гридин // Интеллектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту (ISDMCI'2016): матер. міжн. наук. конф., с. Залізний Порт, 24–28 травня 2016. – Херсон : ПП Вишемирський В. С. – С. 271–273.

Статья поступила в редакцию 04.09.2016.

После доработки 19.10.2016.

Гороховатський В. О.

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій, Харківський навчально-науковий інститут ДВНЗ «Університет банківської справи», Харків, Україна

## МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ РЕЛЕВАНТНОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ МЕДІАННОГО ОБРОБЛЕННЯ СТРУКТУРНИХ ОПИСІВ

**Актуальність.** Інтенсивний розвиток і розширення прикладних можливостей сучасних систем комп'ютерного зору вимагає поглибленого дослідження і створення більш ефективних і універсальних методів обробки візуальної інформації. Основні завдання пов'язані з дослідженням та удосконаленням інформаційних технологій розпізнавання в інтегрованому просторі ознак стосовно до описів у вигляді множин дескрипторів ключових точок (SURF-ознак) зображень, а також необхідністю оцінювання результативності розпізнавання на прикладних зразках.

**Мета.** Стаття зосереджена на вивченні можливості побудови і оцінюванні ефективності застосування моделей медіанної обробки для здійснення структурного розпізнавання об'єктів на зображенні в плані отримання компресійного представлення даних у просторі ознак прикладної бази зображень.

**Метод.** Здійснено трансформацію простору структурних ознак шляхом приведення його до векторного простору з метою підвищення швидкодії процесу розпізнавання. Як апарат перетворення застосована медіанна обробка описів з формуванням кінцевого впорядкованого списку дескрипторів. Результатом дослідження є створення методу для формування і обчислення релевантності описів зображень у трансформованому просторі ознак.

**Результати.** За рахунок впровадження медіанних характеристик забезпечується векторне подання, значно скорочується обсяг обчислювальних витрат і поліпшується швидкість розпізнавання. Час розпізнавання в порівнянні з традиційним підходом скорочується в сотні разів при збереженні необхідної ефективності.

Проведено моделювання та експериментальні дослідження запропонованого методу розпізнавання на тестовій множині зображень, представлених описами SURF. Підтверджено результативність методу в плані швидкодії, отримані порівняльні оцінки якості розпізнавання для різноманіття варіантів обробки.

**Висновки.** У проведеному дослідженні систематизовані і отримані перспективні властивості систем розпізнавання в просторі структурних ознак зображень. Медіанний аналіз дозволяє розкрити нові закономірності в еталонній інформації в цілях ефективного за швидкістю розпізнавання без зниження показника результативності.

Наукова новизна дослідження полягає в синтезі методу структурного розпізнавання зображень шляхом застосування медіанного аналізу для формування стислого векторного представлення для множини дескрипторів у структурному описі зображення. Перехід до векторно-спискового виду істотно підвищує швидкість розпізнавання за рахунок спрощення обробки.

Практична значущість роботи – отримання прикладних програмних моделей для модифікацій методу структурного розпізнавання і підтвердження результативності запропонованої обробки в конкретних прикладах баз зображень.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір, структурне розпізнавання зображень, множина характерних ознак, дескриптори, метод SURF, медіанне оброблення, релевантність описів, швидкість розпізнавання.

Gorokhovatsky V. A.

Dr.Sc., Professor, Professor of the Information Technologies Department, Kharkiv Educational and Scientific Institute SHEI «The University of Banking», Kharkiv, Ukraine

## METHODS OF RELEVANT IMAGES SEARCH BASED ON THE MEDIAN PROCESSING OF STRUCTURAL DESCRIPTIONS

**Context.** Intensive development and expansion of the application possibilities of modern computer vision systems requires in-depth research and creation of more efficient and versatile visual information processing methods. The main problems are related with the research and improvement of information recognition technology in an integrated feature space with regard to the descriptions in the form of image point set descriptors (SURF-features), as well as the necessity of recognition performance estimation in a practical applications.

**Objective.** Article is focused on the research of possibility of constructing and evaluating the effectiveness of median processing models to perform structural recognition of objects in the image in terms of obtaining a compression data in feature space of image database.

**Method.** Transformation of space structural features into vector space in order to increase the speed of the recognition process was proposed. Median processing of descriptions to form ordered finite list of descriptors was proposed as transform method. The result is the creation of method to form and calculate the relevance of image descriptions in the transformed feature space.

**Results.** Implementation of median characteristics analysis to form vector representation allowed to reduce the amount of computing costs significantly and improve recognition performance. Recognition time in comparison with the traditional approach is reduced hundreds of times preserving required efficiency.

Simulation and experimental research of the proposed recognition method on the test dataset was performed on the basis of SURF descriptions. Effectiveness in terms of performance is confirmed, comparative evaluation of the quality of recognition for a variety of treatment options is obtained.

**Conclusions.** Perspective properties recognition systems in the space of the structural features of images are systematized. The median analysis allows to reveal new patterns in initial information to provide effective fast recognition.

Scientific novelty of research is the method of structural image recognition by applying the median analysis to form compressed vector representation of set of descriptors in the structural description of an image. Move to the vector-listed view considerably improves performance by simplifying recognition processing.

Application value of the work is to provide practical programming models for the modification of structural method for detection and confirmation of the effectiveness of the proposed approach in the specific datasets.

**Keywords:** computer vision, structural image recognition, set of characteristic features, descriptors, SURF, median processing, relevant definitions, recognition performance.

## REFERENCES

1. Gorokhovatsky V. Strukturny'j analiz i intelektual'naya obrabotka danny'x v komp'yuternom zrenii: monografiya. Kharkiv, Kompaniya SMIT, 2014, 316 p.
2. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. London, Springer, 2010, 979 p.
3. Gorokhovatsky A. V., Gorokhovatsky V. A., Vlasenko A. N., Vlasenko N. V. Quality Criteria for Multidimensional Object Recognition Based Upon Distance Matrices, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, Vol. 73, No 18, pp. 1661–1670.
4. Koxonen T. Samoorganizuyushiesya karty' ; per. 3-go angl. izd. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2013, 655 p.
5. Gorokhovatsky V. A., Berestovsky A. E., Peredriy E. O. Systematyzatsiya prostoru strukturnykh oznak na osnovi metodiv samonavchannya z metoyu rezul'tatyvnoho rozpiznavannya zobrazen', *Radioelektronika, informatyka, upravlinnya*, 2016, No. 2 (37), pp. 87–94 .
6. Bay H., Tuytelaars T., Van Gool L. Surf: Speeded up robust features, *Computer Vision: Ninth European Conference on Computer Vision, Graz, 7–13 May, 2006: proceedings*. Berlin, Springer, 2006, pp. 404–417.
7. Ayvazyan S. A., Bukhshtaber V. M., Enyukov I. S., Meshalkyn L. D. ; pid red. S. A. Ayvazyana Prykladna statystyka: Klasyfikatsiya ta znyzhennya rozmirnosti: dovid. yzd. Moscow, Finansy i statystyka, 1989, 607 p.
8. Proceedings of the 2016 IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP), Lviv, Ukraine, August 23–27, 2016. Lviv, Publishing House of Lviv Polytechnic National University, 2016, 418 p.
9. Osovskyy S. per. z pol's'koho Neyronni merezhi dlya obrobky informatsiyi. Moscow, Finansy i statystyka, 2002, 344 p.
10. Gorokhovatsky V. A., Hridin M. M. Zastosuvannya lnhvistychnykh uyavlen' strukturnykh opysiv v rozpiznavanni zobrazen', *Intelektual'ni systemy Prynyattya Rishen' ta problemy Obchyslyval'nogo intelektu (ISDMCI'2016): mater. mizhn. nauk. konf., s. Zaliznyy Port, 24–28 travnya 2016*. Kherson, PP Vishemirs'kiy V. S., pp. 271–273.

## МОДЕЛІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ПІДТРИМКИ УПРАВЛІННЯ КОМПЛЕКСНОЮ ІНФОРМАЦІЙНОЮ БЕЗПЕКОЮ

**Актуальність.** Існування конкурентного інформаційного середовища, яке є специфічною ареною для проведення спеціальних інформаційних операцій показує на необхідність реалізації комплексного захисту інформаційних ресурсів. Перебіг інформаційної війни, а також проблеми, що виникають при управлінні комплексною інформаційною безпекою визначає актуальність розробки моделей інформаційної підтримки прийняття рішень та створення ситуаційних або інформаційно-аналітичних центрів управління комплексною інформаційною безпекою на рівні «підприємство – регіон – держава».

**Мета.** Метою даного дослідження є розробка моделі інформаційної підтримки прийняття рішень управління комплексною інформаційною безпекою багаторівневої соціотехнічної системи у складі окремих об'єктів, групи об'єктів (регіону) та держави в цілому, що дозволить отримати кількісні показники рівня захищеності системи з можливістю прийняття рішень щодо управління комплексною інформаційною безпекою на рівнях «підприємство – регіон – держава».

**Метод.** Метод дослідження будується на ідеї того, що рівень захищеності держави залежить від рівня захищеності підпорядкованих регіонів, рівень захищеності яких, у свою чергу, залежить від рівня захищеності підпорядкованих локальних об'єктів. Рівень захищеності самого підприємства залежить від порушення хоча б одного з критеріїв: цілісності, доступності, конфіденційності.

**Результати.** Вирішено задачу розробки узагальненої моделі оцінювання комплексної інформаційної безпеки багаторівневої соціотехнічної системи типу «підприємство – регіон – держава», що дозволяє отримати оцінку рівня інформаційної захищеності, як локального об'єкта – підприємства, так і інтегрованих об'єктів – регіону та держави. Для оцінювання ймовірностей виникнення базових загроз можуть бути використані ймовірнісні оцінки або експертні оцінки, які представлені у вигляді нечітких множин. Запропоновано структурну модель багаторівневого інформаційно-аналітичного центру управління комплексною інформаційною безпекою. Результати проведених досліджень показали можливість використання даного підходу для рішення задач оцінювання та управління комплексною інформаційною безпекою багаторівневої соціотехнічної системи.

**Висновки.** Наукова новизна проведеного дослідження полягає в тому, що вперше запропоновано модель оцінювання комплексної інформаційної безпеки багаторівневої соціотехнічної системи на рівнях управління «підприємство – регіон – держава».

Практична новизна полягає у розробці програмного забезпечення, яке реалізує процес аналізу та оцінювання рівня комплексної інформаційної захищеності багаторівневої соціотехнічної системи на рівнях управління «підприємство – регіон – держава», а також синтезу управлінських рішень на базі сформованих баз знань.

**Ключові слова:** соціотехнічна система, комплексна інформаційна безпека, інформаційна війна, спеціальні інформаційні операції, інформаційно-аналітичний центр, підтримка прийняття рішень.

### НОМЕНКЛАТУРА

АС – автоматизована система;

ІАЦ – інформаційно-аналітичного центру;

ІКО – інформаційно-кібернетична операція;

ІПО – інформаційно-психологічна операція;

СТС – соціотехнічна система;

$A$  – нечітке число;

$B$  – нечітке число;

$f$  – логіко-ймовірнісна операція;

$F$  – логіко-ймовірнісна операція;

$m$  – найбільш достовірне значення нечіткого числа;

$n$  – кількість загроз;

$P_{x_i}$  – ймовірність виникнення загрози для окремого

об'єкта захисту;

$x$  – вхідна загроза для окремого об'єкта захисту або підприємства;

$\tilde{x}_i$  – значення елемента нечіткої множини;

$X$  – множина вхідних загроз для окремого об'єкта захисту або підприємства;

$y$  – рівень захищеності локального об'єкта або підприємства;

$Y$  – множина вхідних загроз для окремого регіону;

$Y_{der}$  – рівень захищеності держави;

$Y_{reg}$  – рівень захищеності окремого регіону;

$Y_{rz}$  – множина вхідних загроз для держави;

$\alpha$  – відхилення зліва нечіткого числа;

$\beta$  – відхилення справа нечіткого числа;

$\mu$  – функція приналежності;

$\Phi$  – логіко-ймовірнісна операція.

### ВСТУП

Життєдіяльність сучасних виробничих, економічних, технічних та інших систем, які можна віднести до класу СТС, відбувається в різних конкурентних середовищах, в тому числі, конкурентному інформаційному просторі, що є специфічною ареною для проведення спеціальних інформаційних операцій. Оскільки останні проводяться проти СТС, тобто проводяться або проти соціальної частини СТС у вигляді спеціальних ІПО або проти технічної частини СТС у вигляді спеціальних ІКО, то і процес побудови систем захисту повинен бути комплексним. Спеціальні інформаційні операції можуть проводитися на різних рівнях управління комплексною інформаційною безпекою: рівні одного підприємства, групи підприємств або цілої галузі промисловості, того чи іншого регіону та нарешті держави в цілому. Причому, ефективно проведені спеціальні інформаційні операції проти так званих критичних об'єктів, наприклад, енергетичних

об'єктів, в першу чергу АЕС, хімічно небезпечних об'єктів, спеціальні інформаційні операції проведені на транспорті можуть призвести до ризиків регіонального, державного і загальносвітового масштабів.

Перебіг інформаційної війни супроводжується збільшенням кількості засобів і методів ведення деструктивних інформаційних впливів, постійною трансформацією загроз які супроводжують проведення спеціальних інформаційних операцій. Про це свідчить збільшення кількості інцидентів на різних рівнях управління інформаційною безпекою в різних регіонах світу. Крім того виникає низка специфічних проблем, ефективне рішення яких можливо лише за умови реалізації системного підходу, який полягає у побудові власної цілісної системи комплексного захисту інформаційних ресурсів. Це пов'язано з [1]:

- ускладненням та розширенням кола задач управління інформаційною безпекою.
- підвищенням вимог до оперативності та якості прийняття і реалізації управлінських рішень;
- високою мірою відповідальності за прийняте рішення;
- необхідністю в довгостроковому і короткостроковому прогнозуванні розвитку ситуації;
- необхідністю ефективного реагування на швидкі зміни ситуації;
- необхідністю оцінювання ризиків та загроз;
- необхідністю прийняття оптимальних і обґрунтованих рішень.

Саме тому існує нагальна потреба рішення актуальної задачі розробки моделей інформаційної підтримки та створення ситуаційних або ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою на рівні «підприємство – регіон – держава».

Об'єктом дослідження є процес побудови моделей інформаційної підтримки управління комплексною інформаційною безпекою багаторівневих соціотехнічних систем на базі логіко-ймовірнісних моделей.

Предметом дослідження є моделі та структури ІАЦ прийняття рішень управління комплексною інформаційною безпекою.

Метою даного дослідження є розробка моделі інформаційної підтримки прийняття рішень управління комплексною інформаційною безпекою багаторівневою СТС у складі окремих об'єктів, групи об'єктів або регіону та держави в цілому, що дозволить отримати кількісні показники рівня захищеності системи з можливістю прийняття рішень щодо управління комплексною інформаційною безпекою на рівнях «підприємство – регіон – держава».

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Розробити узагальнену математичну модель для оцінювання рівня комплексної інформаційної безпеки багаторівневої системи «підприємство – регіон – держава».
2. Розробити структурну модель багаторівневого ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою.
3. Розробити програмний засіб для інформаційної підтримки прийняття рішень щодо управління комплексною інформаційною безпекою.

## 1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Нехай маємо множину базових загроз інформаційній безпеці для окремого об'єкта захисту  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  та ймовірності виникнення даних загроз, які можуть бути визначені, як ймовірностями їх виникнення  $\{P_{x_1}, P_{x_2}, \dots, P_{x_n}\}$ , так і експертними оцінками, які формалізуються нечіткою множиною, яка подана у вигляді трійки значень  $A = (m_A, \alpha_A, \beta_A)$ .

Тоді задача розробки інтегрованої математичної моделі оцінювання рівня захищеності багаторівневої соціотехнічної системи буде полягати у побудові інтегрованої логіко-ймовірнісної моделі, яка об'єднує різні рівні управління.

Для оцінки адекватності запропонованої моделі потрібно проведення комп'ютерного експерименту з реальними об'єктами захисту – підприємствами, які складають умовний регіон.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

25 січня 2015 року Президент України Петро Порошенко ввів у дію рішення РНБО про створення та забезпечення діяльності Головного ситуаційного центру України, до якого надходитиме від державних служб і правліль інформація з обмеженим доступом. Згідно з рішенням РНБО, Головний ситуаційний центр функціонуватиме як програмно-апаратний комплекс зі збору, накопичення й обробки інформації, необхідної для підготовки та прийняття рішень у сфері національної безпеки і оборони [2]. Оскільки інформаційна безпека є важливою складовою національної безпеки то створення ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою, як складової Головного ситуаційного центру має бути невід'ємною частиною щодо реалізації рішення РНБО.

Відомі теоретичні розробки математичних моделей для оцінювання інформаційних ризиків, а також структурних моделей ІАЦ. Відомими роботами в даній області є дослідження вітчизняних та зарубіжних вчених, таких як: Корченко О. Г., Архипов О. Є., Ільїн М. І., Демідов М. М. [1, 3, 4]. Однак запропоновані моделі не дозволяють отримати оцінку комплексної інформаційної безпеки багаторівневих соціотехнічних систем з урахуванням умов ведення інформаційної війни.

У роботі [4] наведені структури ІАЦ управління різними технологічними процесами багаторівневих систем, але не враховуються особливості побудови ІАЦ для управління комплексною інформаційною безпекою. Структура ІАЦ на прикладі системи «підприємство – держава» розглянута у роботі [5], проте в ній відсутні математичні моделі підтримки прийняття рішень, а акцент зроблений на класифікацію різних критичних систем. Методи та моделі збирання, оброблення та прийняття рішень у ситуаційних центрах на локальному рівні описані у [6, 7] без врахування особливостей багаторівневого підходу на рівні «підприємство – регіон – держава». Для вирішення задачі оцінювання захищеності інформаційних ресурсів на рівні «підприємство – регіон – держава», з урахуванням структури локальних об'єктів або окремих підприємств, структури регіону, можливих

шляхів доступу зловмисників до ресурсів та проведення спеціальних інформаційних операцій використано логіко-ймовірнісну модель. Такий підхід дозволяє відстежити причинно-наслідкові зв'язки початку, розвитку і закінчення проведення спеціальних інформаційних операцій і реалізації інших загроз [8].

### 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Загальна математична модель оцінювання та забезпечення рівня комплексної інформаційної безпеки багаторівневої системи будується на ідеї того, що рівень захищеності держави залежить від стану захищеності підпорядкованих регіонів, рівень захищеності яких, у свою чергу, залежить від стану рівня комплексної інформаційної захищеності підпорядкованих локальних об'єктів. Стан захищеності самого підприємства залежить від порушення хоча б одного з критеріїв: цілісності, доступності, конфіденційності. Іншими словами, кожне підприємство розглядається, як окрема загроза для відповідного регіону, який об'єднує певну кількість об'єктів захисту, а кожний регіон розглядається, як окрема загроза для держави. Такий підхід надасть можливість використання єдиної інтегрованої логіко-ймовірнісної моделі, яка формалізує всі процеси ймовірних порушень комплексної інформаційної безпеки на відповідних рівнях управління від окремого підприємства до держави.

На локальних об'єктах, або окремих підприємствах, рівень захищеності можна представити такою аналітичною залежністю:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  – множина вхідних загроз для окремого об'єкта захисту або підприємства.

Для рівня комплексної безпеки регіону, який об'єднує декілька підприємств, пропонується така залежність:

$$Y_{reg} = \varphi(y_1, y_2, \dots, y_n), \quad (2)$$

де  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$  – множина вхідних загроз для окремого регіону, які фактично представляють рівні захищеності окремих підприємств, що входять в даний регіон. На державному рівні управління комплексною інформаційною безпекою, зв'язок вихідних параметрів з вхідними представляється такою залежністю:

$$Y_{der} = F(Y_{reg_1}, Y_{reg_2}, \dots, Y_{reg_n}), \quad (3)$$

де  $Y_{rz} = \{Y_{reg_1}, Y_{reg_2}, \dots, Y_{reg_n}\}$  – множина вхідних загроз для держави, які фактично представляють рівні захищеності окремих регіонів. Таким чином узагальнену модель оцінювання рівня комплексної інформаційної безпеки багаторівневої структури «підприємство – регіон – держава» можна представити, як перетворення:

$$Y_{der} = F(\varphi(f(x_1, x_2, \dots, x_n))). \quad (4)$$

Структурна модель ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою, яка відповідає аналітичній моделі (4) представлена на рис. 1.

Структурна модель включає зворотні зв'язки на рівні ІАЦ регіону і ІАЦ держави, які дозволять корегувати управлінські рішення на відповідному рівні. Крім того зворотній зв'язок дозволить організувати і підтримувати базу знань. Сформована база знань дозволяє генерувати правила трьохрівневої політики безпеки, які відповідають поточній безпековій ситуації і мінімізувати ймовірні ризики реалізації зовнішнього керованого хаосу за рахунок самоорганізації системи. Фрагмент логіко-ймовірнісної моделі для оцінювання порушення рівня інформаційної безпеки держави, поданої у вигляді дерева-подій, наведено на рис. 2.

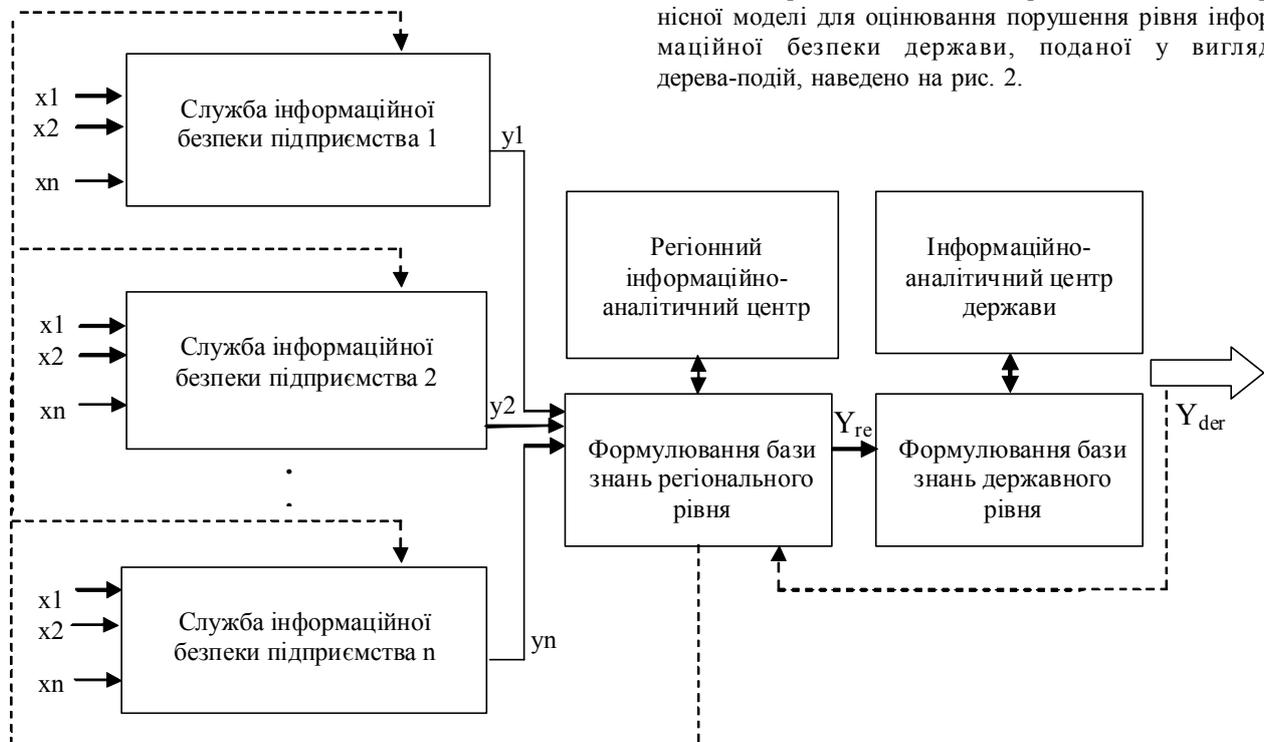


Рисунок 1 – Структурна модель багаторівневого ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою

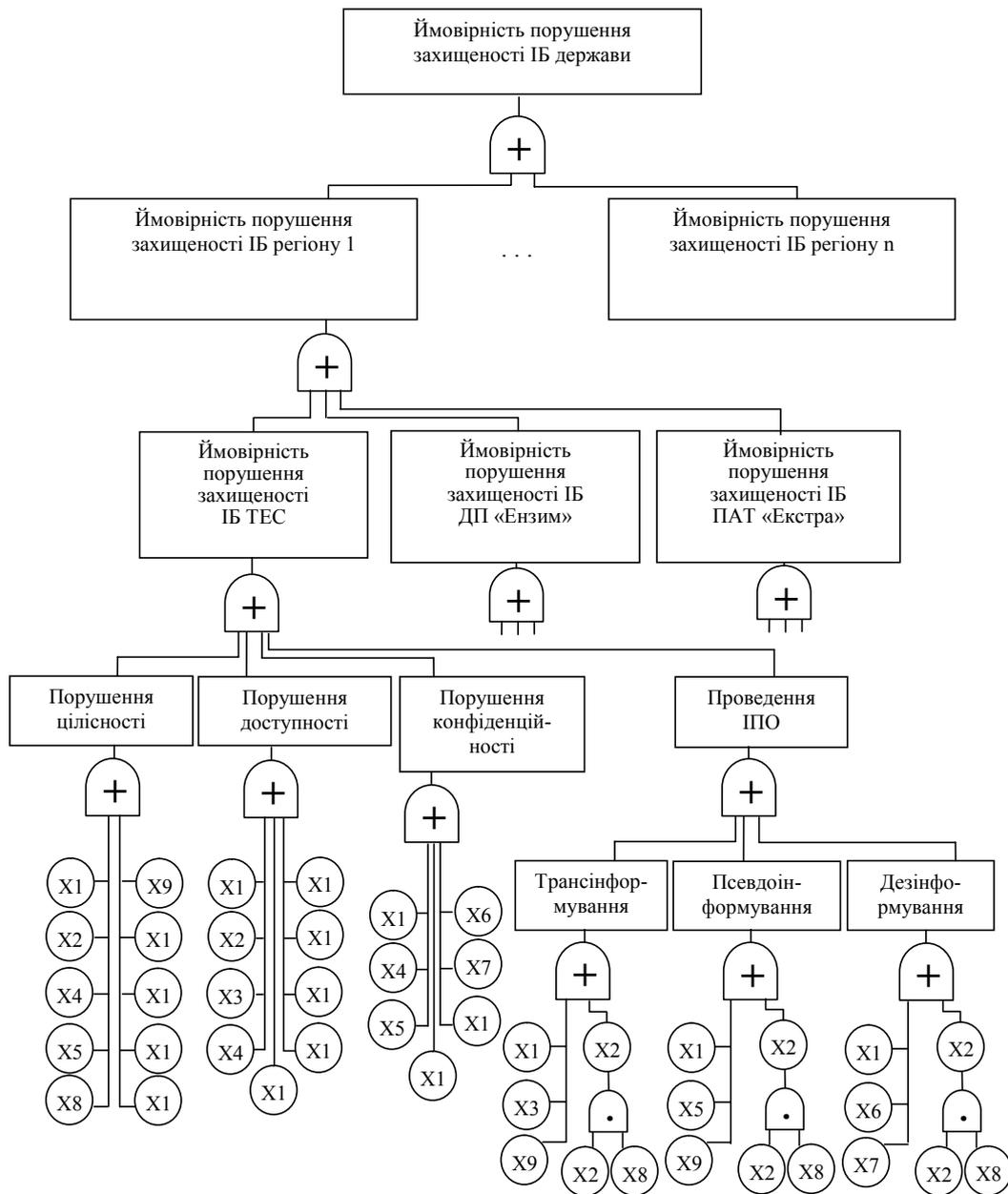


Рисунок 2 – Логіко-ймовірнісна модель оцінювання рівня комплексної інформаційної захищеності держави

Наведений фрагмент логіко-ймовірнісної моделі демонструє інтегрованість моделі формалізованої виразом (4). На базовому рівні представлено загрози, які існують на рівні відповідного об'єкта захисту. Проведення аналізу моделі передбачено у двох режимах: чіткому режимі, та нечіткому режимі. Чіткий режим, характеризується тим, що базові події визначаються ймовірностями, а нечіткий – експертними оцінками, які формалізуються нечіткими множинами.

Приклад аналізу подібних моделей наведений у [9, 10]. Нечіткі оцінки базових подій задано у LR-формі нечіткої множини. LR-форму нечіткого числа  $A$  можна представити у вигляді трійки значень  $A = (m_A, \alpha_A, \beta_A)$ . Для розрахунку ймовірностей виникнення можливих подій використано наступні арифметичні операції над нечіткими

множинами, які можна визначити через операції над відповідними трійками:

$$A - B = (m_A, \alpha_A, \beta_A) - (m_B, \alpha_B, \beta_B) = (m_A - m_B, \alpha_A + \alpha_B, \beta_A + \beta_B), \quad (5)$$

$$A \times B = (m_A, \alpha_A, \beta_A) \cdot (m_B, \alpha_B, \beta_B) = (m_A \cdot m_B, m_A \cdot \alpha_B + m_B \cdot \alpha_A, m_A \cdot \beta_B + m_B \cdot \beta_A). \quad (6)$$

Якщо  $\alpha = \beta = 0$ , то нечітке число  $A$  переходить у чітке число  $m$ .

Розрахунки нечітких множин передбачає використання функцій належності за допомогою яких лінгвістична інформація може бути опрацьована. Для LR-форми не-

чіткої множини аналітичний вигляд функції належності представлено таким аналітичним виразом [11]:

$$\mu_A(\tilde{x}) = \begin{cases} 0, & a < \alpha_A, \\ \frac{a - \alpha_A}{m_A - \alpha_A}, & \alpha_A \leq a < m_A, \\ \frac{\beta_A - a}{\beta_A - m_A}, & m_A < a \leq \beta_A, \\ 0, & a > \beta_A. \end{cases} \quad (7)$$

Дефазифікація отриманих результатів виконується за допомогою методу центру ваг за формулою:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_A(\tilde{x}_i) \cdot \tilde{x}_i}{\sum_{i=1}^n \mu_A(\tilde{x}_i)}. \quad (8)$$

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для інформаційної підтримки щодо управління комплексною інформаційною безпекою розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє автоматизувати процес аналізу рівня захищеності багаторівневої системи типу «підприємство – регіон – держава». Виконаємо експериментальне дослідження за допомогою розробленого програмного засобу, який реалізує запропоновані моделі.

Наведений нижче інтерфейс демонструє послідовність дій для виконання моделювання виконання ймовірних спеціальних інформаційних операцій. На рис. 3 представлено головне вікно програми, яке демонструє можливість

вибору регіону. В даному випадку під регіоном розуміється кожна область України, хоча за необхідністю певні області можна об'єднувати і отримати, наприклад, Подільський регіон, регіон Полісся, тощо.

Наступним кроком після вибору регіону є вибір локальних об'єктів захисту або окремих підприємств. Вікно представлене на рис. 4 надає можливість побудови логіко-ймовірнісної моделі оцінювання рівня захищеності для окремого підприємства, а також вибору режиму розрахунку – чіткого або нечіткого.

На рис. 4. наведено приклад введення вхідних даних для аналізу окремого підприємства – Ладжижинської ТЕС, яке розташовано у Вінницькій області.

Отримані рівні захищеності окремих підприємств, які ототожнюються з ймовірностями несанкціонованого доступу до інформаційних ресурсів є вхідними даними для виконання аналізу рівня захищеності відповідного регіону. Аналогічні дії операції виконані для локальних об'єктів захисту, що розташовані у Львівському та Волинському регіонах.

Результати аналізу комплексної інформаційної безпеки на рівні держави, який в даному випадку включає 3 регіони, представлені Львівською, Волинською та Вінницькою областями, представлені на рівні рис. 5.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 4. наведено приклад введення вхідних даних для аналізу окремого підприємства – Ладжижинської ТЕС, яке розташовано у Вінницькій області. Крім того експертні оцінювання проводилися для підприємств ДП «Ензим» та ПАТ «Екстра».

Фрагмент експертних оцінок ймовірностей виникнення загроз поданих як нечіткі числа з трикутною функцією належності наведено в табл. 1.

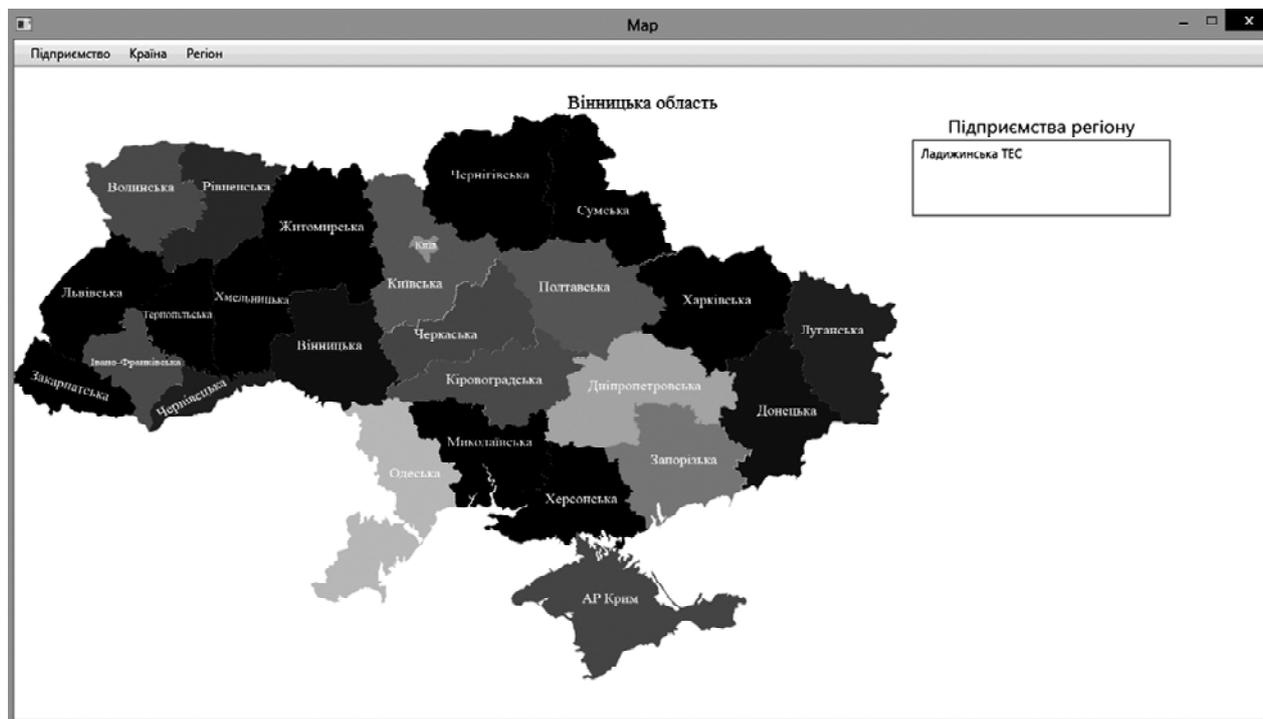


Рисунок 3 – Головне вікно програмного засобу для вибору регіону

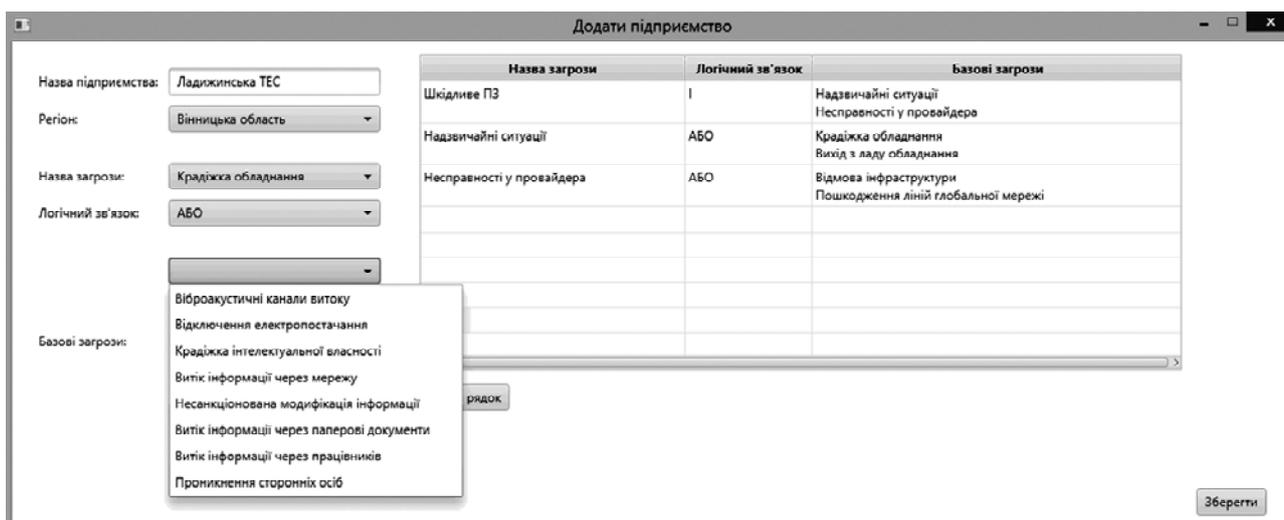


Рисунок 4 – Вікно для введення даних для аналізу окремого підприємства

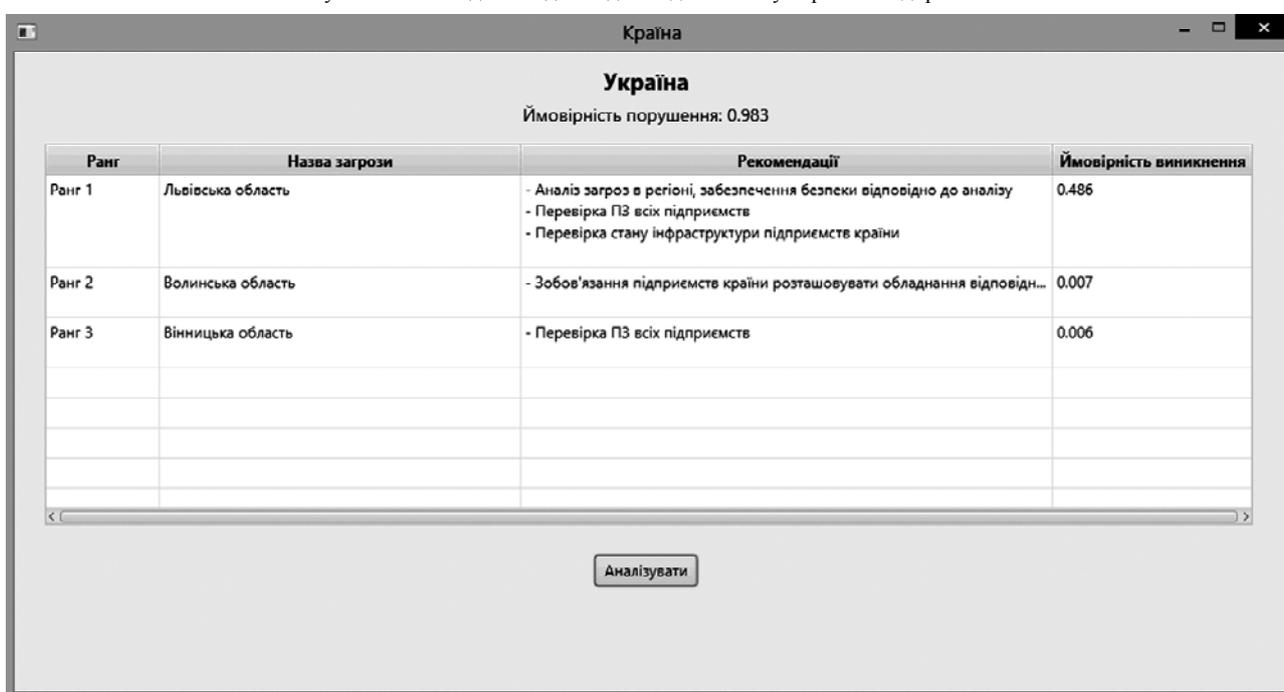


Рисунок 5 – Результати аналізу рівня захищеності на рівні держави

Таблиця 1 – Експертні оцінки ймовірностей виникнення загроз

Загроза		Ймовірність виникнення загрози		
		Лад. ТЕС	ДП «Ензим»	ПАТ «Екстра»
$x_1$	Порушення фізичної цілісності АС (її окремих компонентів), пристроїв, обладнання, носіїв інформації	{0,12; 0,02;0,03}	{0,13; 0,02;0,01}	{0,1; 0,02;0,03}
$x_2$	Модифікація інформаційних ресурсів, в тому числі програмного забезпечення	{0,09; 0,01;0,02}	{0,11; 0,01;0,02}	{0,12; 0,03;0,02}
$x_3$	Порушення режимів функціонування (введення з ладу) систем життєзабезпечення АС (електроживлення, заземлення, охоронної, пожежної сигналізації тощо)	{0,08; 0,03;0,02}	{0,12; 0,03;0,02}	{0,1; 0,01;0,01}

Представлені експертні оцінки є вхідними даними для виконання аналізу рівня захищеності на рівні окремих підприємств. Результати аналізу представлені у табл. 2.

Оцінка порушення захищеності інформаційної безпеки Вінницького регіону:

$$P = (0,99; 1,25 \cdot 10^{-11}; 1,22 \cdot 10^{-11}).$$

Аналіз отриманих даних показав, що ймовірність порушення захищеності інформаційної безпеки районного

рівня становить 99,98%, з відхиленням зліва на  $1,25 \cdot 10^{-9}$  та справа на  $1,22 \cdot 10^{-9}$ .

Висока ймовірність порушення захисту інформаційних ресурсів регіону пояснюється суб'єктивними експертними оцінками, а також врахуванням можливості проведення ІПО проти соціальної частини СТС, як на рівні окремого підприємства, так і на рівні регіону та держави.

Таблиця 2 – Оцінки порушення комплексної інформаційної безпеки підприємств

Підприємство	Оцінка порушення цілісності	Оцінка порушення доступності	Оцінка порушення конфіденційності	Оцінка проведення ППО	Оцінка порушення захищеності ІБ
Ладжинська ТЕС:	(0,940; $1,4 \cdot 10^{-2}$ ; $1,3 \cdot 10^{-2}$ )	(0,882; $2,86 \cdot 10^{-2}$ ; $2,7 \cdot 10^{-2}$ )	(0,813; $3,5 \cdot 10^{-2}$ ; $3,3 \cdot 10^{-2}$ )	(0,883; $3,81 \cdot 10^{-2}$ ; $3,14 \cdot 10^{-2}$ )	(0,9998; $1,5 \cdot 10^{-4}$ ; $1,4 \cdot 10^{-4}$ )
ДП «Ензим»:	(0,945; $1,49 \cdot 10^{-2}$ ; $1,41 \cdot 10^{-2}$ )	(0,881; $2,92 \cdot 10^{-2}$ ; $2,64 \cdot 10^{-2}$ )	(0,816; $3,12 \cdot 10^{-2}$ ; $3,13 \cdot 10^{-2}$ )	(0,871; $3,33 \cdot 10^{-2}$ ; $3,44 \cdot 10^{-2}$ )	(0,9998; $1,4 \cdot 10^{-4}$ ; $1,4 \cdot 10^{-4}$ )
ПАТ «Екстра»:	(0,945; $1,49 \cdot 10^{-2}$ ; $1,41 \cdot 10^{-2}$ )	(0,871; $3,07 \cdot 10^{-2}$ ; $2,76 \cdot 10^{-2}$ )	(0,784; $3,13 \cdot 10^{-2}$ ; $3,23 \cdot 10^{-2}$ )	(0,886; $2,38 \cdot 10^{-2}$ ; $3,37 \cdot 10^{-2}$ )	(0,9998; $1,7 \cdot 10^{-4}$ ; $1,8 \cdot 10^{-4}$ )

Перспективи подальших досліджень полягають у формуванні на бази інцидентів, пов'язаних з проведенням ППО та ІКО, бази знань державного, регіонального та локального рівнів та практичної реалізації запропонованого підходу до побудови ІАЦ управління комплексною інформаційною безпекою.

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована математична модель інформаційної підтримки управління комплексною інформаційною безпекою дозволяє враховувати кількісні оцінки ймовірностей виникнення загроз, а також експертні оцінки, що формалізовані у вигляді нечітких множин.

Результати моделювання показали, що запропонована модель, порівняно із існуючими, дозволяє отримати оцінку рівня захищеності як на рівні локального об'єкту захисту – підприємства, так і на рівнях інтегрованих об'єктів захисту – регіону та держави.

Представлені узагальнена математична модель для оцінювання рівня інформаційної захищеності багаторівневої системи, структурна модель багаторівневого ІАЦ, а також спеціальне програмне забезпечення, дозволяють вирішити актуальну задачу щодо інформаційної підтримки управління комплексною інформаційною безпекою, відповідно до ISO/IEC 27001:2013 та НДТЗІ 1.4-001-2000.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу розробки моделі та структури інформаційно-аналітичних центрів інформаційної підтримки прийняття рішень управління комплексною інформаційною безпекою багаторівневою СТС.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше запропоновано модель оцінювання комплексної інформаційної безпеки багаторівневої СТС на рівнях управління «підприємство – регіон – держава», яка на відміну від існуючих дозволяє отримати оцінку як локального об'єкта захисту – підприємства, так і інтегрованих об'єктів захисту – регіону та держави з урахуванням ризиків ведення інформаційної війни, що дозволило реалізувати прийняття адекватних управлінських рішень.

Практична новизна полягає у розробці програмного забезпечення, яке реалізує процес аналізу та оцінювання рівня комплексної інформаційної захищеності багаторівневої СТС на рівнях управління «підприємство – регіон – держава», а також синтезу управлінських рішень на базі сформованих баз знань. Отримані бази знань дозволяють також організувати навчання управлінського персоналу.

Дудатьев А. В.<sup>1</sup>, Войтович О. П.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри захисту інформації Вінницького Національного Технічного Університету, Вінниця, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри захисту інформації Вінницького Національного Технічного Університету, Вінниця, Україна

## МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОДДЕРЖКИ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

**Актуальность.** Существование конкурентной информационной среды, которая является специфической ареной для проведения специальных информационных операций, показывает необходимость реализации комплексной защиты информационных ресурсов. Ход информационной войны и проблемы, возникающие при управлении комплексной информационной безопасностью, определяет актуальность разработки моделей информационной поддержки принятия решений, а также создания ситуационных или информационно-аналитических центров управления комплексной информационной безопасностью на уровне «предприятие – регион – государство».

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Вінницького національного технічного університету «Методологія комплексного захисту інформації в соціотехнічних системах в умовах інформаційної війни» (номер державної реєстрації 0115U001125).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ситуационные центры в решении проблем информационной безопасности [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://www.itsec.ru/articles2/Inf\\_security/sit\\_cents](http://www.itsec.ru/articles2/Inf_security/sit_cents) [Назва з екрану].
2. Президент ввів у дію рішення РНБО про Головний ситуаційний центр [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: [http://www.ukrinform.ua/rubric-iac/1820573-poroshenko\\_vviv\\_u\\_diyu](http://www.ukrinform.ua/rubric-iac/1820573-poroshenko_vviv_u_diyu) [Назва з екрану].
3. Корченко А. Г. Системы анализа и оценивания рисков информационной безопасности: монография / А. Г. Корченко, А. Е. Архипов, С. В. Казмирчук. – Издательский Дом Palmarium Academic Publishing, 2013. – 316 с.
4. Ильин Н. И. Ситуационные центры. Опыт, состояние, тенденции развития / Н. И. Ильин, Н. Н. Демидов, Е. В. Новикова. – М.: Медиа Пресс, 2011. – 336 с.
5. Simola J. Common Cyber Situational Awareness: An Important Part of Modern Public Protection and Disaster Relief / J. Simola, J. Rajamäki // Proceedings of the 10th International Conference on Computer Engineering and Applications (CEA'16), Barcelona. – 2016.
6. A streaming-based network monitoring and threat detection system / [Z. Chen, H. Zhang, W. Hatcher, etc.] // Software Engineering Research Management and Applications (SERA) 2016 IEEE 14th International Conference on. – 2016. – С. 31–37.
7. A cloud computing based architecture for cyber security situation awareness / [YU, Wei, et al.]. // Communications and Network Security (CNS), 2013 IEEE Conference on. IEEE. – 2013. – P. 488–492.
8. Рябинин И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
9. Дудатьев А. В. Розробка уніфікованих моделей системного проектування оптимальних систем захисту інформаційних ресурсів / А. В. Дудатьев // Вісник Черкаського технологічного університету. – 2008. – № 1. – С. 3–8.
10. Дудатьев А. В. Метод оценки информационной устойчивости социотехнических систем в условиях информационной войны / А. В. Дудатьев, В. А. Лужецкий, Д. А. Коротаев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 1. – С. 4–11.
11. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, генетические алгоритмы, нейронные сети / А. П. Ротштейн. – Винница: УНИВЕРСУМ – Винница, 1999. – 320 с.

Стаття надійшла до редакції 18.11.2016.

Після доробки 21.12.2016.

**Цель.** Целью данного исследования является разработка модели информационной поддержки принятия решений управления комплексной информационной безопасностью многоуровневой социотехнической системой в составе отдельных объектов, групп объектов (региона) и государства в целом, что позволит получить количественные показатели уровня защищенности системы с возможностью принятия решений по управлению комплексной информационной безопасностью на уровнях «предприятие – регион – государство».

**Метод.** Метод исследования строится на идее того, что уровень защищенности государства зависит от уровня защищенности подчиненных регионов, уровень защищенности которых, в свою очередь, зависит от уровня защищенности подчиненных локальных объектов. Уровень защищенности самого предприятия зависит от нарушения хотя бы одного из критериев: целостности, доступности, конфиденциальности.

**Результаты.** Решена задача разработки обобщенной модели оценки комплексной информационной безопасности многоуровневой социотехнической системы типа «предприятие – регион – государство», что позволяет получить оценку уровня информационной защищенности, как локального объекта – предприятия, так и интегрированных объектов – региона и государства. Для оценки вероятностей возникновения базовых угроз могут быть использованы вероятностные или экспертные оценки, представленные в виде нечетких множеств. Предложена структурная модель многоуровневого информационно-аналитического центра управления комплексной информационной безопасностью. Результаты проведенных исследований показали возможность использования данного подхода для решения задач оценки и управления комплексной информационной безопасностью многоуровневой социотехнической системы.

**Выводы.** Научная новизна проведенного исследования заключается в том, что впервые предложена модель оценки комплексной информационной безопасности многоуровневой социотехнической системы на уровнях управления «предприятие – регион – государство».

Практическая ценность заключается в разработке программного обеспечения, реализующего процесс анализа и оценки уровня комплексной информационной защищенности многоуровневой социотехнической системы на уровнях управления «предприятие – регион – государство», а также синтеза управленческих решений на базе сформированных баз знаний.

**Ключевые слова:** социотехническая система, комплексная информационная безопасность, информационная война, специальные информационные операции, информационно-аналитический центр, поддержка принятия решений.

Dudatyev A. V.<sup>1</sup>, Voitovych O. P.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Protection Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

<sup>2</sup>PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Protection Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

#### MODELS OF INFORMATIONAL DECISION SUPPORT FOR THE COMPLEX INFORMATION SECURITY MANAGEMENT

**Context.** The existence of a competitive information environment, which is a specific arena for special information operations, shows the necessity for implementation of information resources complex protection. Information warfare and the problems, those arise in the field of complex information security management, determine the relevance of the information decision support models development, as well as the creation of situational or information-analytical centers of the complex information security at the «Enterprise – Region – State» management levels.

**Objective.** The goal of this research is a development of information decision support model of the complex information security management of the multi-level socio-technical system which is consists of the individual objects, groups of objects (region) and the State en block, which would provide security level quantitative indicators as well as the ability to make decisions for the complex information security at the «Enterprise – Region – State» levels management.

**Method.** The method of this research is based on the idea that the State protection level depends on the subordinate regions protection level, which in its turn, depends on the subordinate local objects (enterprise) protection level. The enterprise protection level depends on the violation of at least one of the criteria: integrity, availability, confidentiality.

**Results.** The task of developing of the generalized model for complex information security of the multi-level socio-technical system evaluation in terms of «Enterprise – Region – State» is solved, which allows obtaining an protection level estimation of the both local (enterprise) and integrated (region and the State) objects. The probabilistic or expert evaluations in the form of fuzzy sets can be used for base threat occurrence estimation. The structural model of multi-level information-analytic center of the complex information security management is proposed. The results of researching have shown the possibility of using this approach for estimation and management problem solution of information security management for complex information security of the multi-level socio-technical systems.

**Conclusions.** Scientific novelty of the research is in the fact that the complex information security at the «Enterprise – Region – State» management levels evaluation model is proposed for the first time.

Practical significance consists in the development of the software implemented the process of complex information security of the multi-level socio-technical systems evaluation in terms of «Enterprise – Region – State» analyzing and estimation, as well as the synthesis of management decisions based on the generated knowledge bases.

**Keywords:** sociotechnical system, complex information security, information warfare, special informational operations, informational-analytic center, decision support.

#### REFERENCES

1. Situational centers in addressing issues of information security. Available on : [http://www.itsec.ru/articles2/Inf\\_security/sit\\_cents](http://www.itsec.ru/articles2/Inf_security/sit_cents).
2. President enacted the National Security Council decision on the main situational center. Available on : [http://www.ukrinform.ua/rubric-iac/1820573-poroshenko\\_vviv\\_u\\_diyu](http://www.ukrinform.ua/rubric-iac/1820573-poroshenko_vviv_u_diyu)
3. Korchenko A. G., Arkhipov A. Ye., Kazmirchuk S. V. Sistemy analiza i otsenivaniya riskov informatsionnoy bezopasnosti: monografiya. Izdatelskiy Dom Palmarium Academic Publishing, 2013, 316 p.
4. Ilin N.I., Demidov N. N., Novikova Ye. V. Situatsionnye tsentry. Opyt, sostoyanie, tendentsii razvitiya. Moscow, MediaPress, 2011, 336 p.
5. Simola J., Rajamäki J. Common Cyber Situational Awareness: An Important Part of Modern Public Protection and Disaster Relief, *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Engineering and Applications (CEA'16)*. Barcelona, 2016.
6. Chen Z., Zhang H., Hatcher W., etc A streaming-based network monitoring and threat detection system, *Software Engineering Research Management and Applications (SERA) 2016 IEEE 14th International Conference on*, 2016, pp. 31–37.
7. YU, Wei, et al. A cloud computing based architecture for cyber security situation awareness, *Communications and Network Security (CNS), 2013 IEEE Conference on. IEEE*, 2013, pp. 488–492.
8. Ryabinin I. A. Nadezhnost i bezopasnost strukturno-slozhnykh sistem. Sankt-Peterburg, Politekhnik, 2000, 248 p.
9. Dudatyev A. V. Rozrobka unifikovanykh modelei systemnoho proektuvannia optimalnykh system zakhystu informatsiynykh resursiv, *Visnyk Cherkaskoho tekhnolohichnoho universytetu*, 2008, No. 1, pp. 3–8.
10. Dudatyev A. V., Luzhetskyy V. A., Korotaev D. A. Metod otsenki informatsionnoy ustoychivosti sotsiotekhnicheskikh sistem v usloviyakh informatsionnoy voyny, *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy*, 2016, No. 1, pp. 4–11.
11. Rotshteyn A. P. Intellectualnye tekhnologii identifikatsii: nechetkie mnozhestva, geneticheskie algoritmy, neyronnye seti. Vinnitsa, UNIVYERSUM-Vinnitsa, 1999, 320 p.

УДК 621.391

Євсєєв С. П.<sup>1</sup>, Рзаєв Х. Н.<sup>2</sup>, Остапов С. Е.<sup>3</sup>, Ніколаєнко В. І.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, старш. наук. співр., доцент кафедри інформаційних систем, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри «КТ та програмування», Азербайджанський державний університет Нафти та Промисловості, Баку, Азербайджан

<sup>3</sup>Д-р физ.-мат. наук, професор, завідувач кафедрою програмного забезпечення комп'ютерних систем, Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

<sup>4</sup>Студентка, Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця, Харків, Україна

## ОЦІНКА ОБМІНУ ДАНИМИ В ГЛОБАЛЬНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ МЕРЕЖАХ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСНОГО ПОКАЗНИКА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ МЕРЕЖІ

**Актуальність.** Збільшення обсягів даних які циркулюють в комп'ютерних системах і мережах вимагає нових підходів до протоколів і механізмів забезпечення якості обслуговування користувачів і безпеки інформації. Оцінку ефективності обміну даними в комп'ютерній мережі виконують на підставі часткових критеріїв і показників якості обслуговування в протоколах обміну даними в глобальних обчислювальних мережах (ГОМ), що не дозволяє в повній мірі оцінити ефективність якості обслуговування з урахуванням економічних витрат на забезпечення необхідного значення показника якості обслуговування. Актуальним завданням в цьому сенсі є обґрунтування комплексного показника ефективності обміну даними в ГОМ з урахуванням економічних витрат.

**Мета.** Розгляд критеріїв комплексного показника якості обслуговування, ефективності криптографічних засобів захисту інформації, обґрунтування ефективності та обміну даними в ГОМ при різних способах управління обміном на основі комплексного показника ефективності з урахуванням економічних витрат на забезпечення необхідного значення показника якості обслуговування.

**Метод.** Комплексний показник ефективності з урахуванням економічних витрат щодо забезпечення необхідного значення показника якості обслуговування в ГОМ.

**Результати.** Запропоновано методику оцінки ефективності обміну даними в глобальних обчислювальних мережах, яка ґрунтується на простому багатofакторному аналізі. Запропоновано та обґрунтовано комплексний показник ефективності обміну даними, в якому враховано як технічні показники (швидкість передавання даних, ймовірність і час доставки пакету, та інші), так і економічні параметри, наприклад, вартість розгортання та обслуговування мережі тощо.

**Висновки.** Розглянуто методику оцінки ефективності передавання даних в глобальних обчислювальних мережах, яка ґрунтується на простому багатofакторному аналізі. За допомогою запропонованої методики проаналізовано ефективність передавання даних у мережах з різними технологіями, зокрема X.25 (v.34), Frame Relay, Fast Ethernet (0.1Gb, 1Gb, 10Gb, 40 Gb) за єдиними критеріями. Показано, що сьогодні найбільш ефективною технологією за сукупністю параметрів є 10Gb Ethernet. Новизна такого підходу полягає у можливості поєднання технічних та економічних параметрів ефективності обміну даними, що дозволяє ввести комплексний показник ефективності. Практичне використання запропонованого комплексного показника дозволить точніше оцінювати ефективність протоколів обміну даними, які використовуються в глобальних IP-мережах, економічні затрати щодо розгортання та обслуговування мережі, затрат на забезпечення необхідного показника якості обслуговування.

**Ключові слова:** конфіденційність, достовірність, показник якості обслуговування.

### НОМЕНКЛАТУРА

$l_{Д1}$  – min допустима довжина ключових даних (біт);  
 $l_{Д2}$  – max допустима довжина ключових даних (біт);  
 $n_{пом}$  – кількість помилково прийнятих одиничних елементів;  
 $n_{заг}$  – загальна кількість переданих одиничних елементів;  
 $N_{пом}$  – кількість помилково прийнятих кодових послідовностей (пакетів);  
 $N_{заг}$  – загальна кількість переданих кодових послідовностей (пакетів);  
 $P_{опр}$  – ймовірність правильного прийому одиничного елемента;  
 $P_{прп}$  – ймовірність правильного прийому пакету;  
 $P_0$  – ймовірність помилкового прийому одиничного елемента, ймовірність помилки біта в каналі передачі даних;  
 $P_{помп}$  – ймовірність помилкового прийому пакету;  
 $t_{д1}$  – час доставки пакету з першої послилки;

$\Delta t_{д}$  – час багатократного повторення передачі інформації при погіршенні якості каналу;  
 $t_{ш}$  – час шифрування пакету даних криптоалгоритмом;  
 $t_{расш}$  – час розшифрування одержувачем пакету даних;  
 $t_{д}$  – час доставки пакету;  
 $\gamma$  – величина, обернена корисній (ефективній) швидкості передачі  $R$ ;  
 $B$  часова складність (стійкість) використаного в системі шифру – кількість операцій; необхідних для розкриття шифру зловмисником;  
 $n$  – кількість біт в пакеті;  
 $h$  – кількість інформаційних розрядів кадру;  
 $s$  – довжина  $S$ -кадру;  
 $C$  – пропускна здатність каналу;  
 $L$  – довжина лінії зв'язку;  
 $V_p$  – швидкість поширення сигналу в середовищі;  
 $t_{ш}$  – час шифрування I-кадру;  
 $t_{рш}$  – час розшифрування I-кадру;

$r$  – кількість виявлених помилок;  
 $P_0$  – ймовірність помилки в каналі;  
 $\theta_{\text{ШВ}}$  – показник часової складності прямого перетворення (шифрування);  
 $\theta_{\text{ШЕ}}$  – показник ємнісної складності прямого перетворення (шифрування);  
 $\theta_{\text{РШВ}}$  – показник часової складності зворотного перетворення (розшифрування);  
 $\theta_{\text{РШЕ}}$  – показник ємнісної складності зворотного перетворення (розшифрування);  
 $P$  – ймовірність досягнення мети операції в заданих умовах;  
 $Q$  – витрати, необхідні для досягнення мети операції;  
 $W^{(u)}$  – показник ефективності комп'ютерної мережі при обраній стратегії (методі підвищення достовірності)  $u_i$ ;  
 $n^{(u)}$  – кількість інформаційних розрядів пакету при обраній стратегії  $u_i$ ;  
 $t^{(u)}$  – час доставки пакету  $t$  при вибраній стратегії  $u_i$ ;  
 $B^{(u)}$  – кількість операцій, необхідних для розкриття криптоалгоритму зловмисником при обраній стратегії  $u_i$ ;  
 $\Psi^{(u)}$  – продуктивність обчислювальної системи, доступної криптоаналітику (протівнику) при обраній стратегії  $u_i$ ;  
 $P_{np, n}^{(u)}$  – ймовірність правильної доставки пакету при обраній стратегії;  
 $U$  – множина допустимих стратегій (методів підвищення достовірності, використовуваних в комп'ютерній мережі);  
 $W_{\text{eff}}$  – показник багатфакторної ефективності, розрахований запропонованим методом;  
 $Z$  – розмір вікна (для систем с ВЗЗбп «Повернення-на-N»);  
 $t$  – кратність виправлення помилки (для систем з виправленням помилок);  
 $P_3$  – задана ймовірність доставки пакету (для систем с ВЗЗпк).

## ВСТУП

Збільшення обсягів даних, що обробляються та передаються в комп'ютерних системах і мережах, перш за все в банківських системах, в системах управління великими фінансовими і нафтовидобувними компаніями, підприємствами енергетичного сектору, транспорту, в системах управління і зв'язку військового призначення вимагає нових підходів до протоколів і механізмів забезпечення безпеки [1–11]. Оцінку ефективності обміну даними в комп'ютерній мережі виконують на підставі часткових критеріїв і показників якості обслуговування в протоколах обміну даними в глобальних обчислювальних мережах [2–4, 12, 13], що не дозволяє в повній мірі оцінити ефективність якості обслуговування з урахуванням економічних витрат на забезпечення необхідного значення показника якості обслуговування.

Актуальним завданням в цьому сенсі є обґрунтування комплексного показника ефективності обміну даними в ГВП з урахуванням економічних витрат.

Метою статті є розгляд критеріїв комплексного показника якості обслуговування, ефективності криптографічних засобів захисту інформації, обґрунтування комплексного показника ефективності обміну даними в глобальних обчислювальних мережах (ГОМ). Для цього

проаналізовано показники і критерії безпеки та достовірності передавання даних в

ІР-мережах, обґрунтовано ефективність та обмін даними при різних способах управління обміном в протоколах ГОМ на основі комплексного показника ефективності з урахуванням економічних витрат на забезпечення необхідного значення показника якості обслуговування.

## 1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Нехай ми маємо комп'ютерні мережі, що різняться способами управління обміном даних: без зворотного зв'язку з виявленням  $r$ -кратної помилки; без зворотного зв'язку з виправленням  $t$ -кратної помилки; з вирішальним зворотним зв'язком і безперервною передачею кадрів (ВЗЗбп) «Повернення-на-N»; з вирішальним зворотним зв'язком і позитивною квитанцією (ВЗЗпк); за параметрами каналу передачі даних: з різною ймовірністю помилки біта, пропускнуою здатністю каналу передачі даних, довжиною лінії зв'язку, швидкістю поширення сигналу в середовищі тощо; та за загальними параметрами формування комп'ютерної мережі: з різною довжиною інформаційного кадру та іншими параметрами, що залежать від способу управління обміном даних.

Необхідно визначити комплексний показник, що дозволить на основі відомих характеристик кількісно оцінити якість обслуговування мережі. Показник повинен включати показники безпеки та приватні показники системи зв'язку, а також обсяг економічних витрат на програмно-апаратні засоби і технології.

Необхідно також обґрунтувати та дослідити визначений комплексний показник для відомих протоколів глобальних обчислювальних мереж.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На основі загального поняття якості стандарту ISO 8402 були визначені основні терміни в області якості послуг зв'язку (Quality of Service, QoS), вперше наведені в Рекомендації МСЕ-Т E.800 [14]. В ISO 9000:2005 [15] дано таке визначення QoS: «сукупний показник експлуатаційних характеристик послуги, що визначає ступінь задоволеності користувача послугою». Крім того використовується поняття «якість сприйняття» (Quality Of Experience, QoE), методологія оцінки якого і основне значення параметрів представлені в Рекомендації G.1011 [16]. В цілому якість послуги характеризується сукупністю наступних основних споживчих властивостей [14]: забезпеченістю, зручністю використання, дієвістю, безпекою та іншими властивості, специфічними для кожної послуги.

Крім таких технічних характеристик мереж, як: продуктивність, латентність, масштабованість, ступінь прозорості для кінцевих користувачів, вкрай важливими характеристиками є комплексні показники надійності: коефіцієнт готовності і середній час недоступності в рік. Від показників надійності безпосередньо залежить доступність інформаційних сервісів для користувачів. Крім того, від надійності мережі побічно також залежать продуктивність і латентність мережі, оскільки причиною пожежі і відмов в мережі веде до необхідності повторної передачі блоків даних, а це в підсумку веде до збільшення затримок при передачі і зменшення обсягів, передаваних даних в одиницю часу [17].

За останній час у зв'язку з підвищенням інтересом і державною необхідністю розвитку інформаційно-комунікаційного простору країни проводяться дослідження в області побудови ефективних інформаційно-комунікаційних систем (ІКС). Впровадження і якісне використання ІКС вимагає серйозного опрацювання питань не тільки ефективності інформаційного обміну в мережах, але і їх продуктивності в цілому [18].

Під час розгляду ефективності передачі даних в комп'ютерних мережах необхідно враховувати різні параметри систем передачі даних: вартість розгортання мережі, швидкість передавання даних, ймовірність доставки пакету, час доставки пакету, продуктивність мережі тощо. Найчастіше оцінка таких параметрів формується у вигляді формалізованого опису, який не має кількісних характеристик.

Найбільш наближеними до задачі, яка розглядається, є різні методи аналізу захищеності та визначення загального рівня захищеності комп'ютерних мереж, наприклад, що базуються на основі кількісних і якісних методик аналізу ризику, в тому числі на основі математичного апарату теорії ймовірностей, байесовських мереж, теорії можливостей, нечітких множин і т. п. Перспективним напрямком в оцінці рівня захищеності є підходи, засновані на побудові уявлення можливих дій порушників у вигляді дерев або графів атак і наступної перевірки властивостей цього дерева (графа) на основі використання різних методів, наприклад, методів верифікації моделі (model checking), а також обчислення на базі даного подання різноманітних метрик захищеності [19–21].

Також існують методики візуального аналізу мереж, що широко використовуються для аналізу функціонування інформаційної системи. В даний час велика частина існуючих рішень призначена для ефективного контролю периметру мережі. Є різні інструменти для аналізу стану всієї мережі в цілому, моніторингу портів і визначення різних патернів сканування портів, виявлення аномалій в «мережевій поведінці» користувача, в той час як питання візуалізації даних про стан комп'ютерної мережі, підтримки прийняття рішень опрацьовані в меншій мірі та не мають кількісного узагальненого показника.

Для того, щоб розрахувати комплексний показник ефективності комп'ютерних мереж на основі різних технологій, необхідно використовувати багатофакторний аналіз, оскільки в цих випадках враховуються абсолютно різні чинники, кожен з яких може бути розрахований окремо з тих чи інших методик, однак для розрахунку інтегрального показника єдиної кількісної методики не існує.

Отже, найбільш доцільним для оцінки ефективності обслуговування комп'ютерної мережі в якості показника ефективності є використання комплексного показника функціональної ефективності з урахуванням економічних витрат з використанням методів, наведених в [2, 3].

### 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

При розгляді функціонування IP-мережі загальний показник ефективності обміну даними повинен включати

в себе показники безпеки і часткові показники системи зв'язку – достовірність і оперативність. Основними критеріями оцінки ефективності секретних систем прийнято вважати наступні [5–9]:

1. Криптографічний стійкість (кількість секретності), яку оцінюють, як складність рішення задачі криптоаналізу найкращим відомим методом.

2. Обсяг ключових даних. Симетрична криптосистема оперує загальними для всіх користувачів секретним ключем. В цьому випадку його поширення вимагає захищених каналів зв'язку, а значить, ключ не повинен бути занадто великим, щоб не виникли проблеми з його розподілом, і не дуже маленьким, щоб його складно було зламати повним перебиранням. У разі асиметричної криптосистеми один з ключів може бути загальнодоступним, його поширюють по відкритих каналах зв'язку.

3. Складність виконання прямого і зворотного криптографічного перетворення (шифрування/розшифрування повідомлень). Ці операції повинні бути по можливості простими, щоб їх легко можна було реалізувати на практиці.

4. Розмноження числа помилок. У деяких типах шифрів помилка в одній літері, допущена при шифруванні або передаванні, призводить до великої кількості помилок в розшифрованому тексті. Природно, бажано мінімізувати це поширення помилок.

5. Збільшення обсягу повідомлення. У деяких типах секретних систем обсяг повідомлення збільшується в результаті операції шифрування. Цей небажаний ефект потрібно мінімізувати.

У табл. 1 наведені розрахункові значення часу, необхідного криптоаналітику при різних довжинах ключа і можливостях доступних обчислювальних потужностей [9].

Аналіз табл. 1 показує, що на сьогоднішній день ключі довжиною <80 біт є нестійкими до зламу методом повного перебирання. З урахуванням прогнозу розвитку обчислювальних засобів на найближчі роки безпечна ефективна довжина ключа сягне значення 100 біт, що відповідає потужності множини ключів  $\geq 2^{100}$ . Таким чином, загальною вимогою до довжини ключа є умова

$$l_{D1} \geq l_K l_{D2}.$$

Загальноприйнятими показниками оцінки складності алгоритмів в теорії складності є ємність та часова складність. За визначенням, показником часової складності є час як функція розміру задачі, що розв'язується. Аналогічно, показником ємнісної складності є ємність пам'яті як функція розміру задачі. Введемо відповідні показники складності реалізації криптографічних засобів захисту інформації [10, 11]:

Загальною вимогою до алгоритмів прямого і зворотного перетворення є зменшення перерахованих показників, отже, цільова функція має вигляд:

$$\{\min\theta_{ШВ}, \min\theta_{ШЕ}, \min\theta_{РШВ}, \min\theta_{РШЕ}\}.$$

Таблиця 1 – Розрахункові значення часу, необхідного криптоаналітику для зламу ключових даних

$\psi \setminus l_K$	80 біт	80 біт	80 біт	80 біт	80 біт
$10^5$ GFlops, (2004–2005р.)	380 років	$4 \cdot 10^8$ років	$4,4 \cdot 10^{20}$ років	$4,6 \cdot 10^{26}$ років	$5 \cdot 10^{38}$ років
$10^6$ GFlops, (2009–2010р.)	38 років	$4 \cdot 10^7$ років	$4,4 \cdot 10^{19}$ років	$4,6 \cdot 10^{25}$ років	$5 \cdot 10^{37}$ років
$10^7$ GFlops, (2014–2015р.)	3,8 років	$4 \cdot 10^6$ років	$4,4 \cdot 10^{18}$ років	$4,6 \cdot 10^{24}$ років	$5 \cdot 10^{36}$ років

Під достовірністю розуміють властивість системи, що характеризує її спроможність забезпечувати точне відтворення переданих повідомлень в пунктах прийому [1]. Достовірність залежить від параметрів самої IP-мережі, ступеня її технічної досконалості і умов роботи (тип та стан каналів зв'язку, метеорологічні показники, вид та інтенсивність завад, організаційних заходів дотримання правил радіообміну і експлуатації апаратури). Кількісно достовірність передавання може визначатися [1–3]:

– ймовірністю помилкового прийому одиничного елемента (втрата достовірності)

$$P_0 = \lim_{n_{заг} \rightarrow \infty} \frac{n_{пом}}{n_{заг}}$$

– ймовірністю помилкового прийому пакету даних

$$P_{пом п} = \lim_{N_{озаг} \rightarrow \infty} \frac{N_{пом}}{N_{заг}}$$

– ймовірністю правильного прийому одиничного елемента  $P_{опр}$  та ймовірністю правильного прийому пакету  $P_{пр п}$ , причому

$$P_0 пр + P_0 = 1; P_{пр п} + P_{пом п} = 1.$$

Ймовірності помилкового і правильного прийому одиничного елемента ( $P_0$  й  $P_{опр}$ ) фактично є характеристиками дискретного каналу зв'язку, ймовірності  $P_{помп}$  і  $P_{прп}$  є характеристиками комп'ютерної мережі в цілому, так як вони визначаються не тільки характером та інтенсивністю завад в каналі зв'язку, видом і швидкістю модуляції, а й способом захисту від помилок в системі [1–3].

Час доставки інформації [1–3] – інтервал часу від початку надходження повідомлення даних на вхід передавальної частини комп'ютерної мережі до початку його видачі одержувачу даних прийнятною частиною. При передаванні конфіденційної інформації, крім того, в час доставки входить час шифрування відправником пакетів даних і час розшифрування пакетів одержувачем, відповідним криптоалгоритмом.

Аналіз часу шифрування і розшифрування можливих конкурсів криптоалгоритмів AES і NESSIE [8, 9] показує, що для несиметричних алгоритмів складність реалізації криптографічних перетворень на 3–5 порядків вище, ніж у аналогічних систем блоково-симетричних шифрів. Таким чином, в IP-мережі з автоперезапитом (вирішальним зворотним зв'язком) час доставки пакету дорівнює [2–4]:

$$t_d = t_d' + \Delta t_d + t_{ш} + t_{расш} \text{ – для симетричних криптоалгоритмів,}$$

$$t_d = t_d' + \Delta t_d + (t_{ш} + t_{расш})^S \text{ – для асиметричних криптоалгоритмів.}$$

Час  $t_d$  доставки повідомлення в задану адресу залежить від багатьох чинників: структури каналів, надійності та завантаження мережі, методу комутації, наявності та характеру завад, що призводять до помилок і повторним передач. Він є випадковою величиною, яка характеризується щільністю розподілу  $f(t_d)$ .

У каналах зв'язку з високою інтенсивністю помилок  $P_0$  підвищення достовірності призводить до збільшення часу доставки  $t_d$  через зменшення числа повторних посилок пакету, і навпаки, зниження часу доставки  $t_d$  за рахунок зменшення кількості повторних посилок пакету веде до зниження достовірності [1]. Однак більшість реальних каналів передачі даних є нестационарними, ймовірність одиночної помилки в них змінюється в часі в широкій межі від  $10^{-9}$  до  $10^{-2}$  (див. табл. 8) [1].

Загальною вимогою до достовірності інформації є мінімізація ймовірності помилкового прийому символів повідомлення  $P_{пом}$  або, що еквівалентно, максимізація ймовірності правильного прийому  $P_{прп}$ . У той же час на сьогоднішній день вимоги до достовірності інформації істотно зросли і, відповідно до [12, 13], припустима ймовірність помилкового прийому символів повідомлення становить:

$$P_d < 10^{-7} - 10^{-9},$$

в залежності від категорії цінності інформації, її пріоритетності та обладнання. Для того, щоб розрахувати комплексний показник ефективності комп'ютерних мереж передавання даних на основі різних технологій, необхідно використовувати багатofакторний аналіз, оскільки в цих випадках враховуються абсолютно різні чинники: вартість розгортання мережі, швидкість передавання даних, ймовірність і час доставки пакету і т. д. Кожен з наведених показників може бути розрахований окремо тим чи іншим методом, однак для розрахунку інтегрального показника єдиної кількісної методики не існує. Зазвичай в таких випадках використовують моделі багатofакторного аналізу, найпростіша з яких була задіяна і в нашому випадку.

Для оцінки комплексного показника ефективності були розроблені опорні таблиці, що дозволяють виділити діапазони зміни необхідних параметрів і визначити їх в умовних балах. Цей простий метод дозволяє, як ми побачимо надалі, отримати досить адекватні результати оцінки, і крім того, об'єднати їх з результатами точних розрахунків по окремих конкретних параметрах. В опорних таблицях 2–7 показані параметри систем передавання даних, які враховуються в інтегральному показнику ефективності.

Таблиця 2 – Вартість розгортання мережі

Бали	Опис параметру
1	Дуже висока вартість
2	Висока вартість
3	Середня вартість
4	Низька вартість
5	Дуже низька вартість

Таблиця 3 – Швидкість передавання даних

Бали	Опис параметру
1	Мала (10 Мб/с)
2	Середня (100 Мб/с)
3	Висока (1 Гб/с)
4	Дуже висока (10 Гб/с)
5	Надзвичайно висока (40 Гб/с)

Як бачимо, таким чином вдається описати абсолютно різні параметри, які в інший спосіб аналітично об'єднати практично неможливо.

Для порівняння існуючих технологій передавання даних було відібрано наступні: пакетна комутація за стандартом X.25; Frame Relay; Ethernet, Fast Ethernet; Gigabit, 10 Gb, 40 Gb Ethernet. Порівняльні характеристики зазначених технологій показані в таблицях 8–10.

Використовуючи дані з таблиць 2–10, можна скласти таблицю узагальненої ефективності мереж передачі даних (див. табл. 11), де відібрані показники вже подано в умовних балах.

Таблиця 4 – Ймовірність доставки пакету

Бали	Опис параметру
1	Мала (> 0)
2	Середня (0,95)
3	Висока (0,97546)
4	Дуже висока (0,999999)

Таблиця 5 – Час доставки пакету

Бали	Опис параметру
1	Дуже великий (1875 с)
2	Великий
3	Середній
4	Малий (0,006 с)
5	Дуже малий (0,0003 с)

Таблиця 8 – Порівняльна характеристика протоколу Ethernet

Технологія ГОМ	Вартість	Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Довжина пакету, біт	Ймовірність правильної доставки пакету, $P_{пр.п}$	Час доставки пакету, $t_d$ , с
Ethernet	середня	10	1518	0,95	0,006
Fast Ethernet	середня	100	1518	0,95	0,006
Gigabit Ethernet	висока	1000	1518	0,99999	0,006
10 GbE	висока	10 000	1518	0,99999	0,006
40GbE	висока	40 000	1518	0,99999	0,006

Таблиця 9 – Ймовірно-часові характеристики технологій ГОМ

Технологія ГОМ	Вартість	Швидкість передачі даних, Мбіт/с	Довжина пакету, біт	Ймовірність правильної доставки пакету, $P_{пр.п}$	Час доставки пакету, $t_d$ , с
X.25 (V.34)	середня	10	1056	0,97546	1875
Frame Relay	середня	100	12048	> 0	0,0003
Fast Ethernet	середня	100	1518	0,95	0,006

Таблиця 10 – Порівняння Ethernet, пакетної комутації та Frame Relay

	Fast Ethernet	Пакетна комутація (X.25)	Frame Relay
Мультиплексування з часовим розділенням	Немає	Немає	Немає
Статистичне мультиплексування	Так	Так	Так
Поділ портів	Так	Так	Так
Висока продуктивність	Так	Немає	Так
Затримка	Низька	Висока	Низька

Використовуючи дані з таблиць 2–10, можна скласти таблицю узагальненої ефективності мереж передачі даних (див. табл. 11), де відібрані показники вже подано в умовних балах.

Результати, показані в табл. 11, показані на рис. 1, 2.

Для оцінки загальної ефективності функціонування комп'ютерної мережі замість стандартного показника ефективності ми пропонуємо використовувати комплексний показник ефективності з урахуванням економічних витрат, який містить показник багатофакторної ефективності  $W_{eff}$

Структура побудови показника така, що в ньому об'єднані дві основні характеристики системи:

– необхідна ймовірність досягнення мети з необхідним показником забезпечення конфіденційності (інфор-

Таблиця 6 – Затримка пакету

Бали	Опис параметру
1	Велика
2	Середня
3	Мала

Таблиця 7 – Продуктивність мережі

Бали	Опис параметру
1	Мала
2	Середня
3	Висока

Таблиця 11 – Узагальнена ефективність мереж передачі даних

Технологія	Вартість	Швидкість	Ймовірність доставки пакету	Час доставки	Затримка пакету	Продуктивність	Узагальнений індекс ефективності	Відносна ефективність, %
X.25	3	1	3	1	1	1	9	0,25
Frame Relay	3	2	1	5	3	3	270	7,37
Ethernet	3	1	2	4	3	3	216	5,89
Fast Ethernet	3	2	2	4	3	3	432	11,79
Gigabit Ethernet	2	3	4	4	3	3	864	23,59
10 Gb Ethernet	2	4	4	4	3	3	1152	31,45
40 Gb Ethernet	1	5	4	4	3	3	720	19,66
Всього:							3663	100

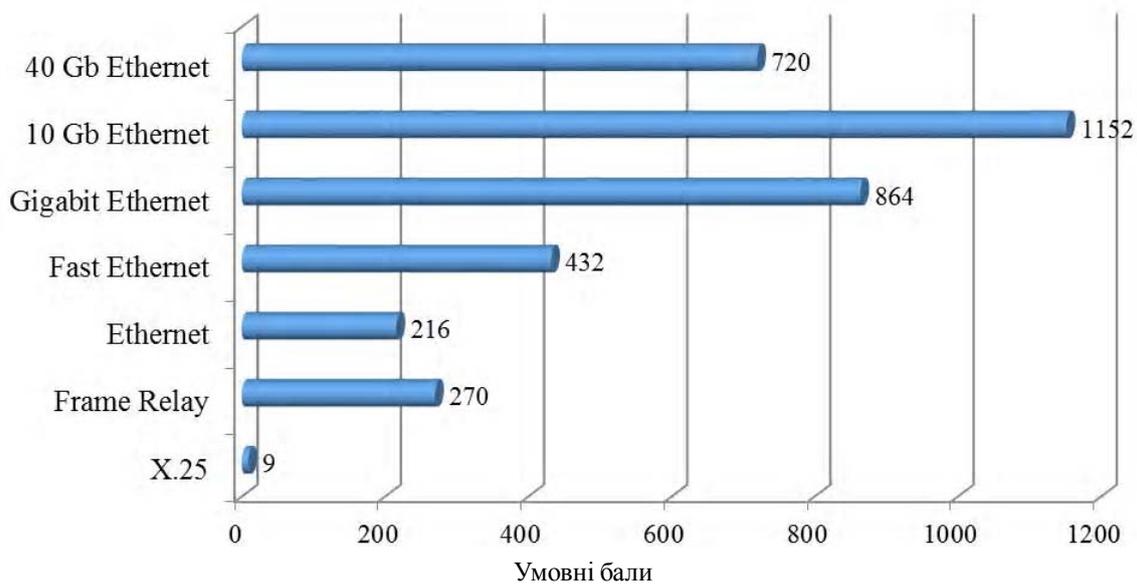


Рисунок 1 – Комплексний показник ефективності різних технологій комп'ютерних мереж

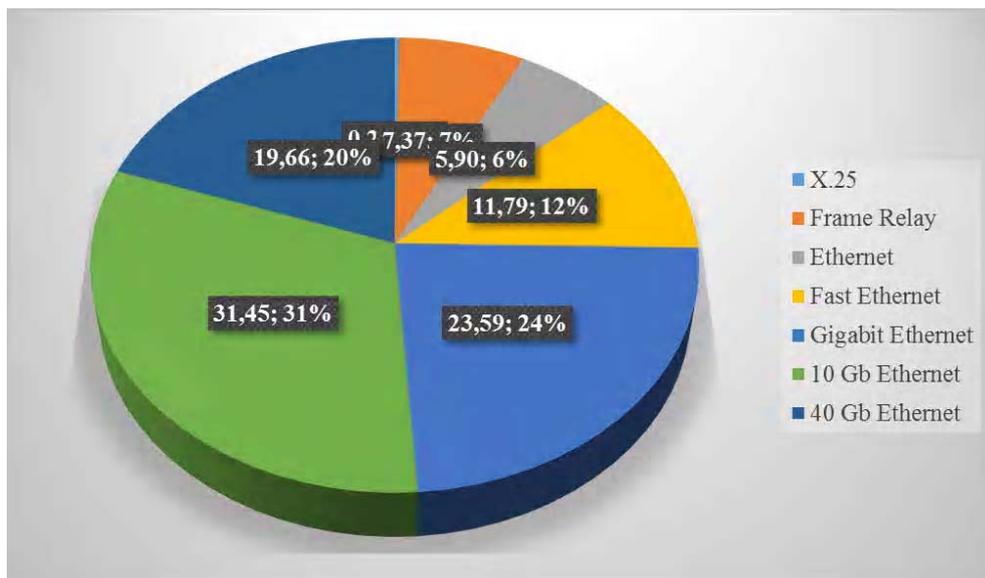


Рисунок 2 – Комплексний показник ефективності різних технологій комп'ютерних мереж

маційної прихованості) в визначених умовах зовнішнього середовища і при певному рівні впливу внутрішніх випадкових факторів;

– витрати, які необхідно здійснити в зазначених умовах для досягнення мети з необхідною ймовірністю і економічні витрати на реалізацію побудови корпоративних мереж з урахуванням необхідного показника якості обслуговування.

Показник функціональної ефективності системи має вигляд

$$W = \frac{P}{Q}.$$

Як ймовірність досягнення мети операції доцільно використовувати ймовірність безпомилкової доставки пакету  $P_{\text{прп}}$ .

$$P_{\text{прп}} = (1 - P_0)^n.$$

Витрати, необхідні для забезпечення безпомилкової доставки пакету, визначаються надмірністю. Тому в якості показника вхідної надмірності може виступати коефіцієнт надмірності  $\gamma$ , яка при фіксованій пропускній спроможності вимірюється кількістю біт інформації, яка міститься в одному пакеті

$$W = \frac{P_{\text{прп}}}{\gamma} \quad (1)$$

$$\gamma = \frac{1}{R} = \frac{t_{\text{д}}}{h} \quad (2)$$

Крім того, для обліку забезпечення необхідної конфіденційності (інформаційної прихованості) переданих даних, до складу показника ефективності необхідно ввести величину, що характеризує часову складність (стійкість) використаного в системі шифру – кількість операцій  $B$ , необхідних для розкриття шифру зловмисником. Оскільки дана величина має досить високий порядок (близько  $10^{19}$ – $10^{77}$ ), зручніше використовувати її десятковий логарифм. Тоді узагальнений показник ефективності прийме вид

$$W = \frac{h}{t} \cdot \lg B \cdot (1 - P_0)^n.$$

Цей показник містить часткові показники достовірності, конфіденційності та часу доставки даних в комп'ютерній мережі та, по суті, відображає швидкість достовірної та конфіденційної передачі даних комп'ютерною мережею, що дозволяє оцінювати її ефективність в широкому діапазоні інтенсивності помилок в каналі передавання даних при різних швидкостях передавання  $R$ .

Ймовірність безпомилкової доставки пакету  $P_{\text{прп}}$  за визначенням лежить в діапазоні  $(0, 1)$ . Ефективна швидкість  $R$  і часова складність алгоритму, що реалізує метод криптоаналізу  $\lg B$  у загальному випадку лежать в діапазоні  $(0, +\infty)$ . Для переходу з діапазону  $(0, +\infty)$  в діапазон  $(0, 1)$  зручно скористатися формулою

$$x' = \frac{x-1}{x},$$

що має наступні властивості:

$$\lim_{x \rightarrow +0} \frac{x-1}{x} = -\infty, \quad \lim_{x \rightarrow 1} \frac{x-1}{x} = 0, \quad \lim_{x \rightarrow \infty} \frac{x-1}{x} = 1.$$

Замінивши значення  $\frac{h}{t}$  и  $\lg B$  еквівалентними їм, отримуємо

$$\frac{\frac{h}{t}-1}{\frac{h}{t}} = \frac{h-t}{h}, \quad W = \frac{h-t}{h} \cdot \frac{\lg B - 1}{\lg B} \cdot (1 - P_0)^n.$$

Якщо замість показника часової складності криптоалгоритму  $\lg B$  використовувати безпечний час роботи криптоалгоритму

$$T_{B_i} = \frac{B_i}{\Psi}.$$

тоді:

$$W = \frac{h-t}{h} \cdot \frac{t-1}{t} \cdot (1 - P_0)^n = \frac{h-t}{h} \cdot \frac{\Psi-1}{\Psi} \cdot (1 - P_0)^n = \\ = \frac{h-t}{h} \cdot \frac{B-\Psi}{B} \cdot (1 - P_0)^n.$$

Оскільки час доставки пакету  $t$ , що входить в (2.23), є випадковою величиною, то можливо оцінити тільки його математичне сподівання  $m_t$ . У цьому випадку вибір оптимальної стратегії функціонування комп'ютерної мережі  $u^*$  з множини допустимих стратегій  $U$  доцільно здійснювати за критерієм найбільшого середнього результату, тобто

$$W(u^*) = \max_{u_i \in U} W(u_i), \quad (3)$$

$$W(u_i) = \frac{n \binom{u_i}{n-t} B \binom{u_i}{B-\Psi}}{\binom{u_i}{n} \binom{u_i}{B}} P_{\text{прп}}(u_i) W_{\text{eff}}.$$

При цьому окремі показники повинні задовольняти системі обмежень при мінімізації часу доставки кадру інформації.

$$\{T_B \geq T_{\text{д}}, P_{\text{ош}} \leq P_{\text{д}}, t_{\text{д}} \leq t_{\text{д}}, W_{\text{eff}} \geq W_{\text{д}}\} \quad (4)$$

Вибрані комплексний показник і критерій ефективності комп'ютерної мережі дозволяють отримати числові значення, що характеризують швидкість достовірної та конфіденційної передачі даних в ГОМ з урахуванням економічних витрат на їх реалізацію і провести порівняння існуючих протоколів IP-мереж за ефективністю обміну даними між двома вузлами комп'ютерної мережі.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для підвищення значення показника функціональної ефективності комп'ютерної мережі використовуються

різні способи управління обміном даними: без зворотного зв'язку з виявленням  $r$ -кратної помилки; без зворотного зв'язку з виправленням  $t$ -кратної помилки; з вирішальним зворотним зв'язком і безперервною передачею кадрів (ВЗЗбп) «Повернення-на- $N$ »; з вирішальним зворотним зв'язком і позитивною квитанцією (ВЗЗпк).

Дослідимо комп'ютерні мережі, що використовують дані способи управління обміном даними.

У комп'ютерній мережі, що використовують циклічні коди в режимі виявлення помилок (стратегія  $u_1$ ) значення показника ефективності визначається як [5–8]

$$W(u_1) = \frac{n^{(u_1)} - t^{(u_1)}}{n^{(u_1)}} \frac{B^{(u_1)} - \Psi^{(u_1)}}{B^{(u_1)}} P_{\text{прп}}^{(u_1)} W_{\text{eff}}, \quad (5)$$

$$t^{(u_1)} = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{пш}},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_1)} = (1 - P_0)^n.$$

Для комп'ютерної мережі без зворотного зв'язку при виправленні  $t$ -кратної помилки циклічним кодом (стратегія  $u_2$ ) значення показника ефективності визначається як:

$$W(u_2) = \frac{n^{(u_2)} - t^{(u_2)}}{n^{(u_2)}} \frac{B^{(u_2)} - \Psi^{(u_2)}}{B^{(u_2)}} P_{\text{прп}}^{(u_2)} W_{\text{eff}}, \quad (6)$$

$$t^{(u_2)} = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{пш}},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_2)} = \sum_{i=0}^t C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}.$$

Для комп'ютерної мережі з вирішальним зворотним зв'язком і безперервним передаванням кадрів «Повернення-на- $N$ » значення показника ефективності визначається як:

$$W(u_3) = \frac{n^{(u_3)} - t^{(u_3)}}{n^{(u_3)}} \frac{B^{(u_3)} - \Psi^{(u_3)}}{B^{(u_3)}} P_{\text{прп}}^{(u_3)} W_{\text{eff}}, \quad (7)$$

$$M[t^{(u_3)}] = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{пш}} +$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^r C_n^i \cdot P_0^i \cdot (1 - P_0)^{n-i} + (1 - \frac{1}{2^r}) \cdot \sum_{i=r+1}^n C_n^i \cdot P_0^i \cdot (1 - P_0)^{n-i}}{(1 - P_0)^n} \times$$

$$\times \left( \frac{n+s}{C} + 2 \frac{L}{V_p} \right),$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_3)} = \frac{(1 - P_0)^n}{1 - \sum_{i=1}^r C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i} - (1 - \frac{1}{2^r}) \cdot \sum_{i=r+1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}}.$$

Для комп'ютерної мережі з вирішальним зворотним зв'язком і позитивною квитанцією значення показника ефективності визначається як:

$$W(u_4) = \frac{n^{(u_4)} - t^{(u_4)}}{n^{(u_4)}} \frac{B^{(u_4)} - \Psi^{(u_4)}}{B^{(u_4)}} P_{\text{прп}}^{(u_4)} W_{\text{eff}}, \quad (8)$$

$$M[t^{(u_4)}] = \frac{n+s}{C} + 2 \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{пш}} +$$

$$+ \frac{\sum_{i=1}^r C_n^i \cdot P_0^i \cdot (1 - P_0)^{n-i} + (1 - \frac{1}{2^r}) \cdot \sum_{i=r+1}^n C_n^i \cdot P_0^i \cdot (1 - P_0)^{n-i}}{(1 - P_0)^n} \cdot \frac{n}{C},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_4)} = (1 - P_0)^n \times$$

$$\frac{1 - \left( \sum_{i=1}^r C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i} + (1 - \frac{1}{2^r}) \cdot \sum_{i=r+1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i} \right)}{1 - \sum_{i=1}^r C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i} - (1 - \frac{1}{2^r}) \cdot \sum_{i=r+1}^n C_n^i P_0^i (1 - P_0)^{n-i}}.$$

В результаті розрахунків за допомогою виразів 5–8 отримані числові значення показника ефективності комп'ютерної мережі  $W$  при зміні ймовірності бітових помилок  $P_0$ .

Для оцінки показника функціональної ефективності комп'ютерної мережі при різних методах управління обміном даними в КС, в каналах без пам'яті використовуємо такі вирази:

– в комп'ютерній мережі, що використовує циклічні коди в режимі виявлення помилок, значення показника ефективності визначається як [9–12]

$$W(u_1) = \frac{n^{(u_1)} - t^{(u_1)}}{n^{(u_1)}} \frac{B^{(u_1)} - \Psi^{(u_1)}}{B^{(u_1)}} P_{\text{прп}}^{(u_1)} W_{\text{eff}}, \quad (9)$$

– для комп'ютерної мережі без зворотного зв'язку при виправленні  $t$ -кратної помилки циклічним кодом, значення показника ефективності визначається як [9–12]

$$W(u_2) = \frac{n^{(u_2)} - t^{(u_2)}}{n^{(u_2)}} \frac{B^{(u_2)} - \Psi^{(u_2)}}{B^{(u_2)}} P_{\text{прп}}^{(u_2)} W_{\text{eff}}, \quad (10)$$

– для комп'ютерної мережі з вирішальним зворотним зв'язком і безперервним передаванням кадрів «Повернення-на- $N$ » значення показника ефективності визначається як [9–12]

$$W(u_3) = \frac{n^{(u_3)} - t^{(u_3)}}{n^{(u_3)}} \frac{B^{(u_3)} - \Psi^{(u_3)}}{B^{(u_3)}} P_{\text{прп}}^{(u_3)} W_{\text{eff}}, \quad (11)$$

– для комп’ютерної мережі з вирішальним зворотним зв’язком і позитивною квітанняцією кадрів значення показника ефективності визначається як [9–12]

$$W(u_4) = \frac{n^{(u_4)} - t^{(u_4)}}{n^{(u_4)}} \frac{B^{(u_4)} - \Psi^{(u_4)}}{B^{(u_4)}} P_{\text{прп}}^{(u_4)} W_{\text{eff}}^{(u_4)}. \quad (12)$$

## 5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 3 наведені результати дослідження відповідних стратегій в каналах передачі без пам’яті за допомогою виразів 9–12.

Аналіз результатів, наведених на рис. 3 показує на необхідність використання протоколів керування обміном даними з автоперезапитом (вирішальним зворотним зв’язком і позитивною квітанняцією, з ВЗЗ і безперервним передаванням кадрів «Повернення-на-N»), як у ширококугових цифрових каналах (виділених цифрових лініях, оптоволоконних кабелях), так і в повітряних лініях з  $P_0 = 10^{-3} - 10^{-2}$ .

Детальне дослідження статистичних властивостей послідовностей помилок в реальних каналах зв’язку [1]

показало, що помилки залежні та мають тенденцією до скупчення (пакування), тобто між ними існує певна залежність – кореляція. Велику частину часу інформація проходить каналами зв’язку без спотворень, а в окремі моменти часу виникають згущення помилок, так звані пакети (пачки, групи) помилок, всередині яких ймовірність помилки виявляється значно вищою за середню ймовірність помилок для значного часу передачі. В таких умовах способи захисту, оптимальні для гіпотези незалежних помилок, виявляються неефективними при використанні їх в реальних каналах зв’язку. Для обліку статистичних властивостей послідовностей помилок в реальних каналах зв’язку розглянемо модель каналу з пам’яттю.

У даній моделі у вихідні дані замість ймовірності помилки біта  $P_0$  необхідно задати наступні чотири канальні параметри:

- ймовірність виникнення пакету помилок  $P_{\text{пом}}$ ;
- ймовірність помилки усередині пакету дорівнює  $P_{\text{в}}$ ;
- математичне сподівання  $m_{\text{in}}$  довжини пакету помилок;
- середньоквадратичне відхилення  $\sigma_{\text{in}}$  довжини пакету помилок.

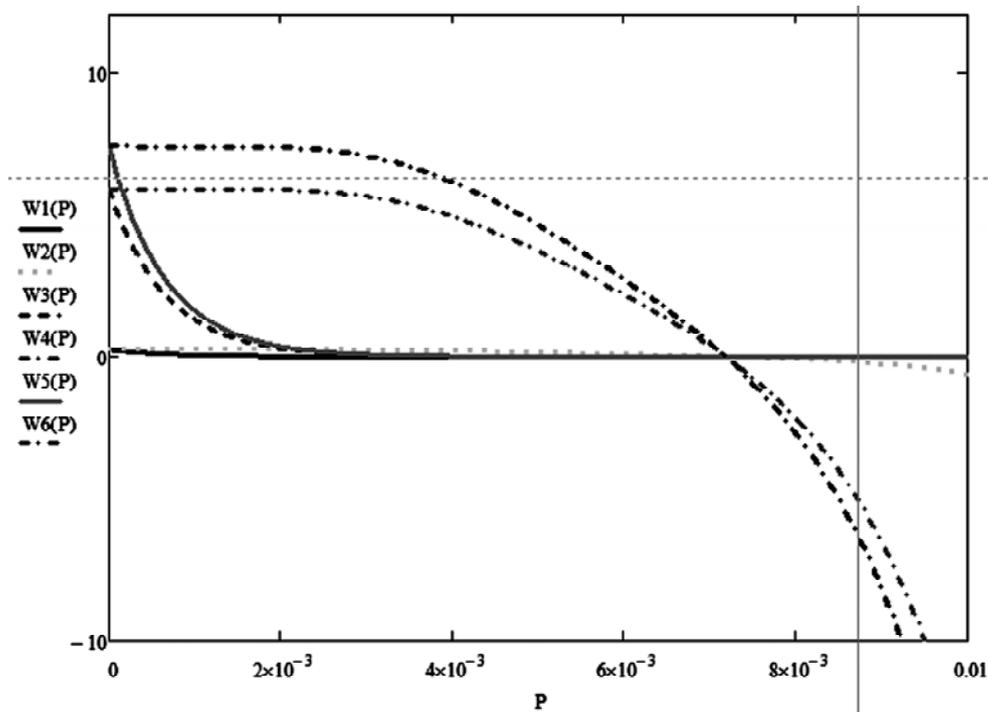


Рисунок 3 – Показник функціональної ефективності в каналах без пам’яті  
 Позначення:

- 1 – Повернення-на-N (протокол із симетричною криптосистемою) для X25;
- 2 – Састрі (з вирішальним зворотним зв’язком) (протокол із симетричною криптосистемою) для X25;
- 3 – Повернення-на-N для Ethernet;
- 4 – Састрі для Ethernet;
- 5 – Повернення-на-N для Frame Relay;
- 6 – Састрі для Frame Relay.

Примітка:

$$C = 56000 \text{ біт/с}; C1 = 10^6 \text{ біт/с}; C2 = 10^9 \text{ біт/с}; L = 1000 \text{ км}; V_p = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; r = 16; t = 8; n = 1024 \text{ й } n_{\text{разр. метод}} = 512 \text{ біт}; k = 16; P_{\text{зад}} = 0,95; t_{\text{ш-сим}} = t_{\text{рш-сим}} = 0,01 \text{ с};$$

$$t_{\text{ш-асим}} = t_{\text{рш-асим}} = 10^2 \text{ с}; t_{\text{ш-разр. метод}} = t_{\text{рш-разр. метод}} = 10^{-2} \text{ с}; B = 10^{24} \text{ и } B_{\text{разр. метод}} = 10^{30}; \Psi = 10^{15}; \text{EconEth} = 5,7; \text{EconFR} = 7,37; \text{EconX} = 0,25$$

При розрахунках приймалось:  $P_{\text{ном}} = 10^{-5}$ ,  $10^{-2}$ ;  $P_{\varepsilon} = 0,8$ ;  $m_{ln} = 10$ ;  $\sigma_{ln} = 2$ .

Для каналів з пам'яттю в комп'ютерній мережі, що використовують циклічні коди в режимі виявлення помилок, значення показника ефективності визначається як

$$W(u_1) = \frac{n}{n} \frac{-t}{(u_1)} \frac{B}{B} \frac{-\Psi}{(u_1)} P_{\text{прп}} (u_1) W_{\text{eff}}, \quad (13)$$

$$t^{(u_1)} = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{рш}},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_1)} = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}.$$

Для комп'ютерної мережі без зворотного зв'язку при виправленні  $t$ -кратної помилки циклічним кодом значення показника ефективності визначається як

$$W(u_2) = \frac{n}{n} \frac{-t}{(u_2)} \frac{B}{B} \frac{-\Psi}{(u_2)} P_{\text{прп}} (u_2) W_{\text{eff}}, \quad (14)$$

$$m_t^{(u_2)} = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{рш}},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_2)} = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}.$$

Для комп'ютерної мережі з вирішальним зворотним зв'язком і безперервною передачею кадрів «Повернення-на-N» значення показника ефективності визначається як

$$W(u_3) = \frac{n}{n} \frac{-t}{(u_3)} \frac{B}{B} \frac{-\Psi}{(u_3)} P_{\text{прп}} (u_3) W_{\text{eff}}, \quad (15)$$

$$m_t^{(u_3)} = \frac{n}{C} + \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{рш}} +$$

$$+ \frac{\sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2^r} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{r+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}}{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}} \times \left( \frac{n+s}{C} + 2 \frac{L}{V_p} \right),$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_3)} = \frac{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}}{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2^r} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{r+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}}.$$

Для комп'ютерної мережі з вирішальним зворотним зв'язком і позитивною квитанцією кадрів значення показника ефективності визначається як

$$W(u_4) = \frac{n}{n} \frac{-t}{(u_4)} \frac{B}{B} \frac{-\Psi}{(u_4)} P_{\text{прп}} (u_4) W_{\text{eff}}, \quad (16)$$

$$t^{(u_4)} = \frac{n+s}{C} + 2 \frac{L}{V_p} + t_{\text{ш}} + t_{\text{рш}} + \frac{n}{C} \times$$

$$\frac{\sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2^r} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{r+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}}{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}},$$

$$P_{\text{прп}}^{(u_4)} = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\},$$

$$\frac{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2^r} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{r+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}^N}{1 - \sum_{i=0}^{\infty} \left\{ \left[ 1 - (1 - P_n)^{n+i} \right] \left[ \Phi \left( \frac{i+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) - \Phi \left( \frac{i-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\} \left\{ 1 - \frac{1}{2^r} \left[ \frac{1}{2} - \Phi \left( \frac{r+1-m_{ln}}{\sigma_{ln}} \right) \right] \right\}}$$

В результаті розрахунків за допомогою виразів 13–16 отримано числові значення показника ефективності комп'ютерної мережі  $W$  при зміні ймовірності виникнення пакету помилок  $P_n$ .

На рис. 4 наведені результати дослідження відповідних стратегій в дискретних каналах передачі з пам'яттю за допомогою виразів 13–16.

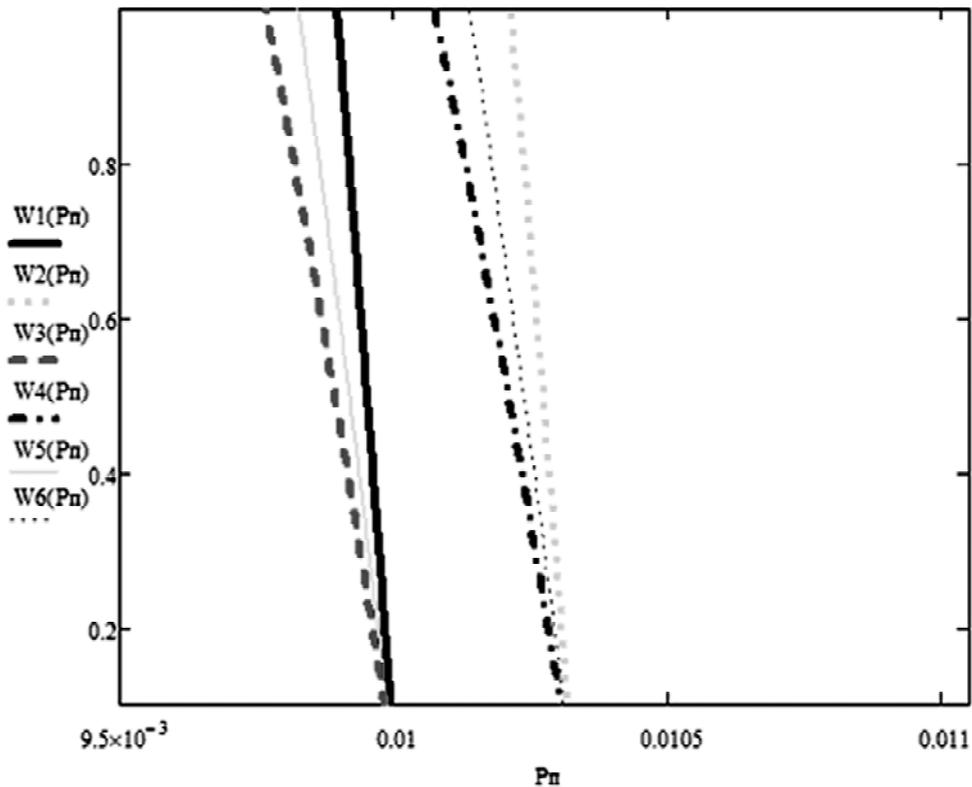


Рисунок 4 – Показник функціональної ефективності в каналах с пам'яттю  
 Позначення:

- 1 – Повернення-на-N (протокол із симетричною криптосистемою) для X25;
- 2 – Састрі (з вирішальним зворотним зв'язком) (протокол із симетричною криптосистемою) для X25;
- 3 – Повернення-на-N для Ethernet;
- 4 – Састрі для Ethernet;
- 5 – Повернення-на-N для Frame Relay;
- 6 – Састрі для Frame Relay.

Примітка:

$$C = 56000 \text{ біт/с}; C1 = 10^6 \text{ біт/с}; C2 = 10^9 \text{ біт/с}; L = 1000 \text{ км}; V_p = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}; r = 16; t = 8; n = 1024 \text{ і } n_{\text{разр. метод}} = 512 \text{ біт}; k = 16; P_{\text{зад}} = 0,95; t_{\text{ш\_сим}} = t_{\text{рш\_сим}} = 10^{-2} \text{ с};$$

$$t_{\text{ш\_асим}} = t_{\text{рш\_асим}} = 10^2 \text{ с}; t_{\text{ш\_разр. метод}} = t_{\text{рш\_разр. метод}} = 10^{-2} \text{ с}; B = 10^{24} \text{ и } B_{\text{разр. метод}} = 10^{30}; \psi = 10^{15}; \text{EconEth} = 5,7; \text{EconFR} = 7,37; \text{EconX} = 0,25.$$

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Запропонована нами методика врахування економічної ефективності дозволяє отримати досить адекватний результат (див. табл. 11 та рис. 1–2). З них видно, що сьогодні найбільш ефективним за сукупністю наведених показників є 10Gb Ethernet. Звичайний, популярний, добре налагоджений для сьогоднішніх комунікацій Fast Ethernet зі швидкістю передачі даних 100 Мб вже не в повній мірі справляється зі зростаючим трафіком. Зі збільшенням останнього все більшої популярності набуватиме Gigabit Ethernet для повсякденних потреб. Це тим більш стає зрозумілим, якщо врахувати, що основний контент, що передається сьогодні по каналах зв'язку, – це мультимедіа. Останнім часом вимоги споживачів до якості зображення і звуку стрімко зростають, розглядаються нові стандарти HD-відео та інтернет-телебачення, які вимагають все більших бітрейтів. Тому зростання швидкостей передавання даних і якості каналів зв'язку є об'єктивною необхідністю.

Однак поки 40Gb Ethernet залишається досить дорогим для кінцевого споживача, що не дозволяє класифікувати його як оптимальну мережеву інфраструктуру.

Разом з тим, 10Mb Ethernet, Frame Relay, не кажучи вже про пакетної комутації X.25, розглядаються навіть таким простим аналізом, як застарілі технології, що не відповідають поточним реаліям.

Показник багатофакторної ефективності  $W_{\text{eff}}$  в подальшому використано для розгляду моделей каналів передавання даних.

Аналіз отриманих результатів (див. рис. 3–4) свідчить, що при розгляді моделі каналу з пам'яттю показники ефективності обміну даними в КМ різко падають, за рахунок пакетування помилок в реальних каналах зв'язку. Протоколи з автоперезапитом задовольняють вимогам узагальненого показника ефективності тільки при використанні розробленої криптосистеми в протоколах з вирішальним зворотним зв'язком і безперервним передаванням кадрів «Повернення-на-N» або з вирішальним

зворотним зв'язком і позитивною квитанцією, яка дозволяє інтегровано забезпечити потрібні параметри надійності й безпеки системи. Разом з тим, аналіз рис. 3–4 демонструє, що застосування криптосистем знижує вимоги з оперативності – час формування пакету даних зростає на 20%.

### ВИСНОВКИ

З наведеного вище можна зробити такі висновки:

1. В роботі розглянуто методику оцінки ефективності передавання даних в глобальних телекомунікаційних мережах, яка ґрунтується на простому багатofакторному аналізі.

2. Новизна такого підходу полягає у можливості поєднання технічних та економічних параметрів ефективності обміну даними, що дозволяє ввести комплексний показник ефективності.

3. За допомогою запропонованої методики проаналізовано ефективність передавання даних у мережах з різними технологіями, зокрема X.25 (v.34), Frame Relay, Fast Ethernet (0.1Gb, 1Gb, 10Gb, 40 Gb) за єдиними критеріями.

4. Показано, що сьогодні найбільш ефективною технологією за сукупністю параметрів є 10Gb Ethernet.

5. Практичне використання запропонованого показника дозволить точніше оцінювати ефективність протоколів обміну даними, які використовуються в глобальних IP-мережах.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розроблення інтегрованого показника якості на основі методики, яка наведена в роботі, з урахуванням економічної складової витрат на протидію або зменшення впливу загроз на основні активи комп'ютерних мереж та практична оцінка якості обслуговування на основі корпоративної мережі підприємства.

### ПОДЯКИ

Дослідження проведені в рамках Держбюджетної прикладної науково-дослідної роботи №40/2015-2016 «Планування, моніторинг, самооцінка діяльності і розвитку вищого навчального закладу». Державний реєстраційний номер 0115U002377, кафедри інформаційних систем ХНЕУ ім. С. Кузнеця, «Розробка програмно-апаратної системи для дослідження параметрів нано- та мікрооб'єктів у колоїдних розчинах та твердих тілах» (номер державної реєстрації 0115U003240) за підтримки Міністерства освіти і науки України.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. / Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
- Сумцов Д. В. Общий показатель эффективности передачи данных в компьютерной сети / Д. В. Сумцов, Б. П. Томашевский, А. М. Носик // Системы обработки информации. – 2009. – №7(79). – С. 85–90.
- Эффективность обмена данными в компьютерной сети при различных способах управления обменом / [С. П. Евсеев, Д. В. Сумцов, О. Г. Король, Б. П. Томашевский] // Збірник наукових праць. Донецький інститут залізничного транспорту. – 2009. – Випуск 17. – С. 33–45.
- Анализ эффективности передачи данных в компьютерных системах с использованием интегрированных механизмов

обеспечения надежности и безопасности / [С. П. Евсеев, Д. В. Сумцов, О. Г. Король, Б. П. Томашевский] // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 2/2(44). – С. 45–49.

- Ленков С. В. Методы и средства защиты информации: [в 2 т.] / С. В. Ленков, Д. А. Перегудов, В. А. Хорошко ; (под ред. В. А. Хорошко). – К. : Арий, 2008. – Т.1. Несанкционированное получение информации. – 464 с.
- Ленков С. В. Методы и средства защиты информации: [в 2 т.] / С. В. Ленков, Д. А. Перегудов, В. А. Хорошко ; (под ред. В. А. Хорошко). – К. : Арий, 2008. – Т. 2. Информационная безопасность. – 344 с.
- Молдовян Н.А. Криптография: от примитивов к синтезу алгоритмов / Н. А. Молдовян, А. А. Молдовян, М. А. Еремеев. – СПб. : БХВ – Петербург, 2004. – 448 с.
- Остапов С. Э. Технологии защиты информации / С. Э. Остапов, С. П. Евсеев, О. Г. Король. – Черновцы : Издательский дом «РОДОВИД», 2014. – 428 с.
- Столлинс В. Криптография и защита сетей: принципы и практика / В. Столлинс ; [Пер. с англ.]. – 2-е изд. – М. : ИД «Вильямс», 2001. – 672 с.
- Концепция создания системы контроля качества предоставления услуг связи в Российской Федерации [Электронный ресурс] : – Режим доступа : <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4668>.
- ISO 9000:2005. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь [Электронный ресурс] : – Режим доступа : <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:9000:ed-3:vl:ru>.
- Стандарт ГОСТ РВ 51987 «Информационная технология, комплекс стандартов на АС. Требования и показатели качества функционирования информационных систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://gearletitbit.weebly.com/blog/gost-rv-51987-2002>.
- Бойко А. А. Система показателей качества баз данных автоматизированных систем / А. А. Бойко, С. А. Гриценко, В. Ю. Храмов // Вестник ВГУ, серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2010. – № 1. – С. 39–45.
- Оценка сложности алгоритмов [Электронный ресурс] : – Режим доступа : <http://habrahabr.ru/post/104219/>
- Вялый М. Н. «Сложность вычислительных задач» : [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.nature.ru/db/msg.html?mid>
- МСЭ-Т G.1011 Справочное руководство по существующим стандартам методик определения оценки пользователем качества услуги (QoE). [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11931&lang=ru>
- Каяшев А. И. Анализ показателей надежности локальных компьютерных сетей / А. И. Каяшев, П. А. Рахман, М. И. Шарипов // Вестник УГАТУ, Уфа. –2013, Т. 17, № 5 (58). – С. 140–149.
- Степаненко Е. В. Использование метрологических принципов для оценки эффективности работы инфокоммуникационных систем и сетей // Психолого-педагогический журнал Гаудеамус. – 2010. – № 2 (16). – С. 1–4.
- Пятибратов А. П. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : учебное пособие / А. П. Пятибратов, Л. П. Гудыно, А. А. Кириченко ; под ред. А. П. Пятибратова. – М. : КНОРУС, 2013. – 376 с.
- Бройдо В. Л. Вычислительные системы, сети и телекоммуникации : учебник для вузов 4-е изд. / В. Л. Бройдо, О. П. Ильина. – СПб. : Питер, 2011. – 560 с.
- Модели и методы управления сетевыми ресурсами в информационно-телекоммуникационных системах : монография / [С. Г. Семенов, А. А. Смирнов, Е. В. Мелешко]. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2011. – 212 с.

Стаття надійшла до редакції 22.09.2016.

Після доробки 09.12.2016.

Евсеев С. П.<sup>1</sup>, Рзаев Х. Н.<sup>2</sup>, Остапов С. Е.<sup>3</sup>, Николаенко В. И.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, старш. научн. сотр., доцент кафедры информационных систем, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры «КТ и программирование», Азербайджанский государственный Университет Нефти и Промышленности, Баку, Азербайджан

<sup>3</sup>Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем, Черновицкий национальный университет имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

<sup>4</sup>Студентка, Харьковский национальный экономический университет им. С. Кузнеця, Харьков, Украина

## ОЦЕНКА ОБМЕНА ДАННЫМИ В ГЛОБАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБСЛУЖИВАНИЯ СЕТИ

**Актуальность.** Увеличение объемов данных, циркулирующих в компьютерных системах и сетях требует новых подходов к протоколам и механизмам обеспечения качества обслуживания пользователей и безопасности информации. Оценку эффективности обмена данными в компьютерной сети выполняют на основании частных критериев и показателей качества обслуживания в протоколах обмена данными в глобальных вычислительных сетях (ГВС), что не позволяет в полной мере оценить эффективность качества обслуживания с учетом экономических затрат на обеспечение требуемого значения показателя качества обслуживания. Актуальной задачей в этом смысле является обоснование комплексного показателя эффективности обмена данными в ГВС с учетом экономических затрат.

**Цель.** Рассмотрение критериев комплексного показателя качества обслуживания, эффективности криптографических средств защиты информации, обоснование эффективности и обмена данными в ГВС при различных способах управления обменом на основе комплексного показателя эффективности с учетом экономических затрат на обеспечение требуемого значения показателя качества обслуживания.

**Метод.** Комплексный показатель эффективности с учетом экономических затрат по обеспечению необходимого значения показателя качества обслуживания в ГВС.

**Результаты.** Предложена методика оценки эффективности обмена данными в глобальных вычислительных сетях, основанная на простом многофакторном анализе. Предложен и обоснован комплексный показатель эффективности обмена данными, в котором учтены, как технические характеристики (скорость передачи данных, вероятность и время доставки пакета, и т.д.), так и экономические параметры, например, стоимость развертывания и обслуживания сети и тому подобное.

**Выводы (научная новизна и практическая значимость).** Рассмотрена методика оценки эффективности передачи данных в глобальных вычислительных сетях, основанная на простом многофакторном анализе. С помощью предложенной методики проанализирована эффективность передачи данных в сетях с различными технологиями, в частности X.25 (v.34), Frame Relay, Fast Ethernet (0.1Gb, 1Gb, 10Gb, 40 Gb) по единым критериям. Показано, что сегодня наиболее эффективной технологией по совокупности параметров является 10Gb Ethernet. Новизна такого подхода заключается в возможности сочетания технических и экономических параметров эффективности обмена данными, позволяет ввести комплексный показатель эффективности. Практическое использование предложенного комплексного показателя позволит точнее оценивать эффективность протоколов обмена данными, которые используются в глобальных IP-сетях, экономические затраты по развертыванию и обслуживанию сети, затраты на обеспечение необходимого показателя качества обслуживания.

**Ключевые слова:** конфиденциальность, достоверность, показатель качества обслуживания.

Yevseev S. P.<sup>1</sup>, Rzayev H. N.<sup>2</sup>, Ostapov S. E.<sup>3</sup>, Nikolaenko V. I.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate Professor of Information Systems Departments Kharkiv National Economic University. S. Kuznets, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor of «CT and programming», Departments Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan

<sup>3</sup>Head of the Software Department, Yu. Fed'kovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine

<sup>4</sup>Student of S. Kuznets Kharkiv National Economic University. S. Kuznets, Kharkiv, Ukraine

## DATA EXCHANGE EVALUATION IN GLOBAL NETWORKS BASED ON INTEGRATED QUALITY INDICATOR OF SERVICE NETWORK

**Context.** Increasing amount of data circulating in computer systems and networks requires new approaches to the protocols and mechanisms to ensure the user experience and security of information.

Evaluation of the communication effectiveness in a computer network is performed on the basis of particular criteria and quality of service indicators in the data exchange protocols in a wide area network (WAN), which does not allow to fully appreciate the quality of service efficiency, taking into account the economic costs of providing the required values of service indicators quality. An important task in this sense is the study of the complex index of efficiency of data exchange in the global computer networks, taking into account the economic costs.

**Objective.** Consideration of the criteria of the complex index service quality, efficiency of cryptographic information protection, and effectiveness of communication in global computer networks in various ways on the basis of the exchange control integrated efficiency indicator, taking into account the economic costs of providing the required quality of service parameter value.

**Method.** The complex index of efficiency, taking into account the economic costs to ensure the required quality of service parameter values in a global computer networks.

**Results.** It was offered the methodics of evaluating data effectiveness in global computer networks, based on a simple multifactor analysis. Proposed and justified a comprehensive indicator of the effectiveness of data exchange, which takes into account, as the specifications (baud rate, probability and packet delivery time, etc.), and economic parameters, such as cost of deployment and network maintenance, and so on.

**Conclusions.** The method of evaluating the effectiveness of the data on a global computer networks, based on a simple multivariate analysis is offered.

With the proposed method analyzed the data transmission efficiency in networks with different technologies, such as X.25 (v.34), Frame Relay, Fast Ethernet (0.1Gb, 1Gb, 10Gb, 40 Gb) on the same criteria. It is shown that today the most effective technology on the set of parameters a 10Gb Ethernet. The novelty of this approach lies in the possibility of technical and economic parameters combination of the communication effectiveness, it allows to introduce an integrated performance indicator. The practical use of the proposed complex index will more accurately assess the effectiveness of communication protocols, which are used in global IP-based networks, the economic costs of deployment and maintenance of the network, the cost of providing the required quality of service indicator.

**Keywords:** privacy, reliability, quality service indicator.

## REFERENCES

1. Skljар B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. Izd. 2-e, ispr./ Per. s angl. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2003, 1104 p.
2. Sumcov D. V., Tomashevskij B. P., Nosik A. M. Obshhij pokazatel' jeffektivnosti peredachi dannyh v komp'juternoj seti, *Sistemi obrobki informacii*, 2009, No. 7(79), pp. 85–90.
3. Evseev S. P., Sumcov D. V., Korol' O. G., Tomashevskij B. P. Jeffektivnost' obmena dannyimi v komp'juternoj seti pri razlichnyh sposobah upravlenija obmenom, *Zbirnik naukovih prac'*. Donec'kij institut zaliznichnogo transportu, 2009, Vipusk 17, pp. 33–45.
4. Evseev S. P., Sumcov D.V., Korol' O. G., Tomashevskij B. P. Analiz jeffektivnosti peredachi dannyh v komp'juternyh sistemah s ispol'zovaniem integrirovannyh mehanizmov obespechenija nadezhnosti i bezopasnosti, *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2010, № 2/2(44), pp. 45–49.
5. Lenkov S. V., Peregudov D. A., Horoshko V. A.; (pod red. Horoshko V. A.) *Metody i sredstva zashhity informacii*: [v 2 t.]. Kiev, Arij, 2008, Vol. 1, Nesankcionirovanoe poluchenie informacii, 464 p.
6. Lenkov S. V., Peregudov D. A., Horoshko V. A. (pod red. V. A. Horoshko). *Metody i sredstva zashhity informacii*: [v 2 t.]. Kiev, Arij, 2008, Vol. 2, Informacionnaja bezopasnost', 344 p.
7. Moldovjan N. A., Moldovjan A. A., Eremeev M. A. *Kriptografija: ot primitivov k sintezu algoritmov*. Sankt-Peterburg, BHV-Peterburg, 2004, 448 p.
8. Ostapov S. Je., Evseev S. P., Korol' O. G. *Tehnologii zashhity informacii*. Chernovcy, Izdatel'skij dom «RODOVID», 2014, 428 p.
9. Stollings V. Per. s angl. 2-e izd. *Kriptografija i zashhita setej: principy i praktika*. Moscow, ID «Vil'jams», 2001, 672 p.
10. *Koncepcija sozdaniya sistemy kontrolja kachestva predostavlenija uslug svjazi v Rossijskoj Federacii* [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://minsvyaz.ru/ru/documents/4668/>
11. ISO 9000:2005. *Sistemy menedzhmenta kachestva. Osnovnye polozhenija i slovar'* [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-3:v1:ru>
12. Standart GOST RV 51987 «Informacionnaja tehnologija, kompleks standartov na AS. Trebovanija i pokazateli kachestva funkcionirovanija informacionnyh sistem» [Jelektronnyj resurs] : – Rezhim dostupa : <http://gearletitbit.weebly.com/blog/gost-rv-51987-2002>.
13. Bojko A. A., Gricenko S. A., Hramov V. Ju. Sistema pokazatelej kachestva baz dannyh avtomatizirovannyh sistem, *Vestnik VGU, serija: Sistemnyj analiz i informacionnye tehnologii*, 2010, No. 1, pp. 39–45.
14. Ocenka slozhnosti algoritmov [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa : <http://habrahabr.ru/post/104219/>
15. Vjaljaj M. N. «Slozhnost' vychislitel'nyh zadach»: [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.nature.ru/db/msg.html?mid>
16. MSJe-T G.1011 *Spravochnoe rukovodstvo po sushhestvujushhim standartam metodik opredelenija ocenki pol'zovatelem kachestva uslugi (QoE)*. [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.itu.int/ITU-T/recommendations/rec.aspx?rec=11931&lang=ru>
17. Kajashev A. I., Rahman P. A., Sharipov M. I. Analiz pokazatelej nadezhnosti lokal'nyh komp'juternyh setej, *Vestnik UGATU*, Ufa, 2013, Vol. 17, No. 5 (58), pp. 140–149.
18. Stepanenko E. V. Ispol'zovanie metrologicheskikh principov dlja ocenki jeffektivnosti raboty infokommunikacionnyh sistem i setej, *Psihologo-pedagogicheskij zhurnal Gaudeamus*, 2010, No. 2 (16), pp. 1–4.
19. Pjatribratov A. P., Pjatribratov A. P., Gudyno L. P., Kirichenko A. A.; pod red. Pjatribratova A. P. *Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikacii : uchebnoe posobie*. Moscow, KNORUS, 2013, 376 p.
20. Brojdo V. L., Il'ina O. P. *Vychislitel'nye sistemy, seti i telekommunikacii: Uchebnik dlja vuzov.4-e izd.* Sankt-Peterburg, Piter, 2011, 560 p.
21. Semenov S. G., Smirnov A. A., Meleshko E. V. *Modeli i metody upravlenija setevymi resursami v informacionno-telekommunikacionnyh sistemah: monografija*. Har'kov, NTU «HPI», 2011, 212 p.

УДК 003.26

Лисицкая И. В.<sup>1</sup>, Лисицкий К. Е.<sup>2</sup>, Родинко М. Ю.<sup>3</sup>, Головки И. А.<sup>3</sup>, Жариков И. И.<sup>3</sup>, Корниенко М. А.<sup>3</sup>,  
Кулеба М. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры БИСТ Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина,  
Харьков, Украина

<sup>2</sup>Студент Харьковского национального университета имени В. Н. Каразина

<sup>3</sup>Студенты Харьковского национального университета радиозлектроники, Харьков, Украина

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРИХОДА БЛОЧНЫХ СИММЕТРИЧНЫХ ШИФРОВ К СОСТОЯНИЮ СЛУЧАЙНОЙ ПОДСТАНОВКИ

**Актуальность.** Объектом исследований данной работы являются процессы прихода блочных симметричных шифров к состоянию случайной подстановки.

**Цель работы.** Уточнение с помощью вычислительных экспериментов значений динамических показателей прихода ряда современных шифров к состоянию случайной подстановки, которые могут стать важными при сравнительной оценке их эффективности.

**Метод.** Методика выполнения экспериментов состоит при определении дифференциальных показателей в активизации шифров (программных моделей) наборами входных разностей и последующего определения минимального количества S-блоков активизируемых на первых циклах зашифрования, позволяющих получить значение дифференциальной вероятности соответствующее показателю стойкости рассматриваемого шифра. При определении линейных показателей перебираются ненулевые маски входов в S-блоки и ненулевые маски их выходов.

При этом на входе шифра активизируется один байт входного блока данных, причем выбирается байт, который активизирует минимальное число S-блоков первого цикла. Здесь под активным байтом (S-блоком) понимается байт (S-блок), с помощью которого для пары входов в шифр (в S-блок) формируется ненулевая входная (выходная) разность. Затем в режиме зашифрования полным перебором всех 256 битных однобайтовых разностей входа шифра определяется минимальное число активизируемых S-блоков на каждом из циклов, которые пересчитываются в числа циклов зашифрования, необходимых для прихода шифра к случайной подстановке. Близкая по смыслу процедура может быть выполнена и при анализе линейных показателей с использованием входных и выходных масок.

**Результаты.** Полученные результаты свидетельствуют о том, что конструкции первых цикловых преобразований блочных симметричных шифров играют важную роль в обеспечении динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки, и существенно влияют на значения числа циклов, необходимых для обеспечения запаса их стойкости. Все рассмотренные (известные) конструкции современных 128-ми битных блочных симметричных шифров, за исключением шифров IDEA NXT, Калина, Мухомор и белорусского шифра, обеспечивают динамические показатели прихода к состоянию случайной подстановки превышающие три-четыре цикла.

Шифр Rijndael оказывается далеко не в лидерах по рассматриваемому показателю (для прихода к состоянию случайной подстановки ему необходимо 4-ре цикла).

**Выводы.** В работе решена задача уточнения и подтверждения с помощью вычислительных экспериментов эффективности новой методики оценки динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки.

Научная новизна результатов статьи состоит в том, что впервые получены обоснованные объективные данные для значений числа циклов прихода к состоянию случайной подстановки ряда современных шифров.

Практическая значимость предлагаемой методики и представленных в работе результатов состоит в их конструктивизме. Они позволяют выполнить обоснование числа циклов шифрующих преобразований, которые обеспечивают достижение предельного уровня стойкости шифров.

**Ключевые слова:** блочный симметричный шифр, динамические показатели, состояние случайной подстановки, стойкость к атакам дифференциального и линейного криптоанализа, активные S-блоки.

### НОМЕНКЛАТУРА

XOR – побитовая сумма по модулю 2;

AMDP – среднее значение максимума дифференциальной вероятности;

DX – дифференциальная характеристика;

S-блок – табличная подстановка;

$DP_{\max}^{\pi}$  – максимальное значение дифференциального перехода таблицы подстановки  $\pi$ ;

$\pi$  – нелинейное преобразование (S-блок);

$k_{\min}$  – минимальное число активизируемых S-блоков, необходимых для прихода шифра к состоянию случайной подстановки;

МДР – порождающая матрица кода с минимальным (допустимым) кодовым расстоянием;

M-64 – функция усложнения шифра Мухомор-128;  
SL-преобразование – 4-х байтовое Rijndael-подобное линейное преобразование цикловой функции;

$l_k$  – размер ключа;

F-функция – элемент циклового преобразования шифра Camellia;

ШУП-1 – шифр с управляемыми подстановками первой версии.

### ВВЕДЕНИЕ

Эта работа выполнена в развитие новой методологии оценки стойкости блочных симметричных шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа, предложенной Лисицкой И. В. [1, 2 и др.]. Основным содержанием этой методологии является положение, в соответствии с которым практически все блочные

симметричные шифры через небольшое число циклов зашифрования становятся случайными подстановками (максимумы дифференциальных и линейных вероятностей шифров принимают установившиеся значения, характерные для случайных подстановок).

Объектом исследований данной работы являются процессы прихода блочных симметричных шифров к состоянию случайной подстановки.

В рамках этой работы во всех случаях независимо от способа введения в шифры ключевой информации мы будем интересоваться прохождением через шифры XOR разностей, поскольку все шифры асимптотически по отношению к XOR разностям ведут себя одинаково (ведут себя как случайные подстановки). Мы имеем здесь возможность привести все шифры к единой шкале оценок стойкости к атакам дифференциального криптоанализа.

Предметом исследований являются дифференциальные показатели прихода блочных симметричных шифров к состоянию случайной подстановки.

Развиваемая методика ориентирована на использование полномасштабных алгоритмов шифрования. Подход позволяет выполнить более точное сравнение шифров по стойкости, так как при общих одинаковых максимальных значениях дифференциальных (и линейных) вероятностей полноцикловых версий шифров их можно сравнивать по числу циклов необходимых для прихода шифров к состояниям случайной подстановки. Это реальный путь выполнения сравнения шифров по эффективности. Тот шифр считается более эффективным, который приходит к состоянию случайной подстановки за меньшее число циклов.

Целью данной работы является уточнение с помощью вычислительных экспериментов значений динамических показателей прихода ряда современных шифров к состоянию случайной подстановки, которые могут стать важными при сравнительной оценке их по эффективности.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работах [3, 4, 5] уже изложены теоретические и практические соображения по формированию оценок динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки. Здесь и далее под динамическими показателями прихода шифра к состоянию случайной подстановки понимается минимальное число циклов зашифрования, после которых шифр становится случайной подстановкой (приходит к стационарным значениям максимумов дифференциальных и линейных вероятностей, характерных для случайных подстановок). В этой работе ставится задача определения теперь уже экспериментальным путем минимального количества S-блоков активизируемых на первых циклах шифрования, обеспечивающих достижение теоретических (расчетных) показателей стойкости (значений максимумов дифференциальных и линейных вероятностей), на основе которых можно оценить минимально допустимые числа циклов зашифрования, после которых шифры становятся случайными подстановками.

### 2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В соответствии с развиваемой в работах [1, 2] новой методологией оценки стойкости блочных симметричных

шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа эти показатели определяются асимптотическими значениями максимумов дифференциальных и линейных вероятностей шифров, при этом полагается, что все шифры после небольшого числа первых циклов зашифрования становятся случайными подстановками. В противоположность существующей точке зрения [6–14 и мн. др.], связывающей показатели стойкости шифров с дифференциальными и линейными показателями входящих в цикловые функции шифров S-блоков, в новой методологии [1, 2] утверждается, что криптографические показатели S-блоков не влияют на стойкость шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа. Они влияют лишь на динамику прихода шифров к состоянию случайной подстановки, т.е. на число циклов шифрования, после которого максимальные значения дифференциальной и линейной вероятностей шифров принимают стационарные значения, свойственные случайной подстановке, и это число циклов для современных шифров может отличаться от шифров со случайно взятыми S-блоками лишь одним циклом. В то же время существуют и шифры, где S-блоки вообще не влияют на динамику прихода шифров к состоянию случайной подстановки. В этой связи возникает интерес к изучению динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки, так как на их основе появляется дополнительная возможность для сравнения шифров по эффективности шифрующих преобразований.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В этой работе внимание сосредотачивается на самом процессе (динамике) перехода шифров к состоянию случайных подстановок. В этом направлении уже был выполнен ряд работ. Так, в уже отмеченных выше работах [3, 4, 5] изложена методика определения динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки, в частности, на основе этой методики определяются оценки ожидаемых показателей прихода к состоянию случайной подстановки ряда современных шифров исходя из интуитивных соображений. Эта методика строится на положении, в соответствии с которым результирующие значения дифференциальных и линейных вероятностей шифров формируются на основе произведения соответствующих переходных вероятностей активных S-блоков, входящих в их характеристики. Справедливость этого подхода в теоретическом отношении связана с предположением о независимости цикловых подключей шифров. На самом деле механизм случайного перемешивания выходов S-блоков в реальных конструкциях цикловых преобразований работает и без ключевых добавок. Как показали многочисленные эксперименты показатели случайности шифров как с реальными подключами, так и с подключами с нулевыми значениями (их отсутствии) совпадают [см., например, 15].

Активными S-блоками для дифференциальных показателей здесь и далее названы S-блоки с ненулевыми входными и выходными разностями. Активными S-блоками для линейных показателей названы S-блоки с ненулевыми выходами для ненулевых масок на их входах и выходах.

Развитый в работах [3, 4, 5] подход примечателен тем, что в нем используются достаточно точные значения показателей стойкости шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа, которые в соответствии с новой методологией могут быть определены из формул для законов распределения переходов таблиц дифференциальных разностей и законов распределения смещений таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок соответствующей степеней, установленных в работах [16–18].

В этой работе, как отмечено выше, ставится задача экспериментального исследования влияния механизмов активизации S-блоков цикловых функций шифров на процессы их прихода к состоянию случайной подстановки. В числе рассмотренных ряд современных шифров Rijndael, IDEA NXT, Мухомор, Белорусский шифр, Калина-2, Camellia и др.

Для выполнения экспериментов используются программные модели шифров, так как необходимо иметь возможность подключаться к выходам S-блоков цикловых функций и измерять их байтовые значения.

Методика выполнения экспериментов состоит при определении дифференциальных показателей в активизации шифров (программных моделей) наборами входных разностей и последующего определения минимального количества S-блоков активизируемых на первых циклах зашифрования, позволяющего получить значение дифференциальной вероятности соответствующее показателю стойкости шифра. При определении линейных показателей перебираются ненулевые маски входов в S-блоки и ненулевые маски их выходов.

При этом на входе шифра активизируется один байт входного блока данных, причем выбирается байт, который активизирует минимальное число S-блоков первого цикла. Здесь, как уже было отмечено выше, под активным байтом (S-блоком) понимается байт (S-блок), с помощью которого для пары входов в шифр (в S-блок) формируется ненулевая входная (выходная) разность. Затем в режиме зашифрования полным перебором всех 256 битных однобайтовых разностей входа в шифр определяется минимальное число активизируемых S-блоков на каждом цикле, которые пересчитываются в число циклов зашифрования, необходимых для прихода шифра к случайной подстановке. Близкая по смыслу процедура может быть выполнена и при анализе линейных показателей с использованием входных и выходных масок.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

**Шифр Rijndael** [19]. Для шифров, таких как Rijndael и ряда других сравнительно легко определить минимальное число активных S-блоков для прихода шифра к состоянию случайной подстановки и без вычислительных экспериментов. Мы, тем не менее, приводим здесь и динамические показатели шифра Rijndael, полученные экспериментальным путем. Эти результаты иллюстрирует табл. 1. В этой таблице приведены числа активизируемых S-блоков на соответствующих циклах зашифрования при активизации одного байта входа в шифр.

Эти же результаты следуют и из соображений, представленных в работах [3, 4, 5]. По приведенным данным шифр Rijndael приходит к состоянию случайной подста-

новки по дифференциальным показателям за три цикла (а по линейным за четыре).

**Шифры семейства IDEA NXT** [20]. Шифр IDEA NXT, на наш взгляд можно рассматривать в виде развитии стратегии широкого следа по пути увеличения числа активизируемых S-блоков цикловой функции. В шифрах IDEA NXT используется удвоенное (два слоя) число S-блоков функций усложнения, в результате чего минимальное число активизируемых S-блоков первого цикла получается равным 5-ти для 32-х битной функции усложнения и 9-ти для 64-х битной функции усложнения. По-видимому, основная роль схемы Lai-Massey – это получить за счет внешнего контура преобразования (схемы Lai-Massey) эффект удвоение числа активизируемых S-блоков циклового преобразования. Но тогда для 64-х битного шифра ожидаемое число активных S-блоков на первом цикле будет равным 10, а для 128-ми битного шифра равным 18-ти. На втором цикле для 128-ми битного шифра добавляется с учетом удвоения еще 32 активных S-блока. В результате шифр IDEA NXT-128 становится случайной подстановкой на втором цикле.

Здесь, однако, могут быть переходы с ненулевыми вероятностями в виде, например, такой последовательности активных S-блоков по их числам  $9 = 2+7$ ,  $9 = 7+2$ , и на двух циклах (для 128-ми битного входа в шифр) здесь следует ожидать (с учетом удвоения) минимальное число 36-ть активных S-блоков. Но и в этом случае шифр становится случайной подстановкой после двух циклов. Вероятность получить такую характеристику равна  $2^{-56}$ .

Это позволяет шифр IDEA NXT отнести к числу решений более эффективных, чем шифр Rijndael. Для подтверждения этого факта мы ниже приводим результаты экспериментов, выполненных практически в одних и тех же условиях, по определению поцикловых значений полных дифференциалов для 128-битных версий шифров FOX и Rijndael, заимствованные из работы [1]. Они представлены в табл. 2 и табл. 3.

Таблица 1 – Распределение числа активных S-блоков на первых циклах шифрования при активизации одного байта входа шифра Rijndael (65280 значений ненулевых разностей)

Число активных S-блоков	Число ненулевых однобайтовых разностей			
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл	4-й цикл
0	0	0	0	0
1	65280	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	65280	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0
13	0	0	0	1
14	0	0	0	119
15	0	0	0	3883
16	0	0	65280	61275

Таблица 2 – Поцикловые значения максимумов полных дифференциалов для 128-битной версии шифра FOX (для подсчета разностей во внимание принимаются отдельные 16 бит блоков данных)

Количество циклов	Биты 64..79 шифртекстов		Биты 80..95 шифртекстов		Биты 96..111 шифртекстов		Биты 112..127 шифртекстов	
	Максимум ДХ	Число максимумов	Максимум ДХ	Число максимумов	Максимум ДХ	Число максимумов	Максимум ДХ	Число максимумов
1	32	1	38	1	32	1	38	1
2	18	10	20	1	20	1	18	11
3	18	14	22	1	20	1	18	10
4	18	10	22	1	18	20	22	1
5	18	10	18	19	20	1	18	16
6	18	15	18	14	18	13	18	15
7	20	1	20	1	20	1	20	2
8	20	1	18	18	20	1	18	17
9	18	13	20	1	18	20	20	2
10	18	12	18	17	20	3	20	1
11	20	1	20	1	20	1	20	1

Таблица 3 – Поцикловые значения максимумов полных дифференциалов при активизации шифра Rijndael 16-битными блоками разностей

Число циклов $r$	Значение максимума полного дифференциала	Среднеквадратическое отклонение
1	1024	0
2	3652,26	$\pm 630,312$
3	19,0666	$\pm 1,436$
4	19,0666	$\pm 0,99777$
5	18,8666	$\pm 1,23108$
6	19,1332	$\pm 0,99106$
7	19,2666	$\pm 1,0934$
8	19,1332	$\pm 1,431394$
9	19,0666	$\pm 1,23648$
10	19,3333	$\pm 1,2995$
11	19,4	$\pm 1,474222$
12	18,8666	$\pm 0,991072$
13	18,8666	$\pm 0,991072$
14	18,9332	$\pm 1,123486$

В первом случае приводятся результаты оценки максимальных значений полных дифференциалов для 128-битной версии шифра FOX (с усечением шифруемых блоков (разностей) до 16-битного размера). В экспериментах рассматривались различные варианты входных 16-битных разностей. Во второй серии экспериментов использовался шифр Rijndael. В процессе экспериментов осуществлялось зашифрование 16-битных блоков данных на 30 случайно выбранных ключах. Затем полученные результаты усреднялись по этому множеству ключей (вычислялись, как определено в работе [1], AMDP – средние значения максимумов дифференциальных вероятностей).

Из представленных результатов видно, что большой шифр Rijndael уже с третьего цикла шифрования приходит к установившемуся значению максимума полного дифференциала, повторяющему соответствующее значение равное 18–20-ти, свойственное случайной подста-

новке степени 16-ть. Также видно, что это асимптотическое значение практически не зависит от используемых ключей зашифрования (среднеквадратическое отклонение не превышает 1,5). В то же время шифр FOX во всех случаях становится случайной подстановкой уже на втором цикле (FOX выигрывает у Rijndael-я по дифференциальным показателям один цикл). Это же следует и из результатов экспериментов по определению законов распределения числа активных S-блоков на первых циклах зашифрования 128-ми битного шифра IDEA NXT, представленных в табл. 4. Разработчики шифра этого не чувствуют и выбирают запас стойкости превышающий число циклов прихода шифра к состоянию случайной подстановки в шестеро (12-ть циклов).

Если же считать, что за счет внешнего контура преобразования (схемы Lai-Massey) происходит удвоение числа активных S-блоков цикловой функции, то 128-ми битная версия шифра приходит к состоянию случайной подстановки за два цикла. Отмеченное позволяет шифр IDEA NXT отнести к числу решений более эффективных, чем шифр Rijndael (для S-блоков этого шифра  $DP_{\max}^{\pi} = 2^{-4} \rightarrow k_{\min}^{\pi} = 30, LP_{\max}^{\pi} = 2^{-4} k_{\min}^{\pi} = 40$  [3, 4]).

Таблица 4 – Числа активных S-блоков на первых циклах шифрования при активизации разностями одного байта входа шифра IDEA NXT (функции f64)

Число активных S-блоков	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
0	0	0	0
1		0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	100	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0,000784	0,000392
13	0	0,002353	0,003529
14	0	0,270196	0,169412
15	0	7,479216	5,896078
16	0	92,24745	93,93058

**Шифр Мухомор** [21]. Этот шифр тоже использует внешний контур зашифрования в виде схемы Lai-Massey. Вместе с тем, как отмечают некоторые исследователи, несмотря на внешние высокие показатели безопасности шифров этой серии, схеме Lai-Massey присуща слабость, которая заключается в том, что она допускают переходы разностей на входах циклов в те же разности на их выходах, что приводит к возможности отключения (прохода без потери вероятности) половины циклов шифрования.

Мы здесь приведем для иллюстрации соображения, высказанные д.т.н. Олейниковым Р. В. Он приводит пример варианта характеристики для функции усложнения М-64, у которой совпадают входная и выходная разности, проиллюстрированный на рис. 1 и рис. 2. Конкретные значения, отмечает он, естественно, зависят от S-блоков и МДР-матрицы. В его примере выбран вариант более простой, чтобы без пересчета на компьютере был понятен принцип.

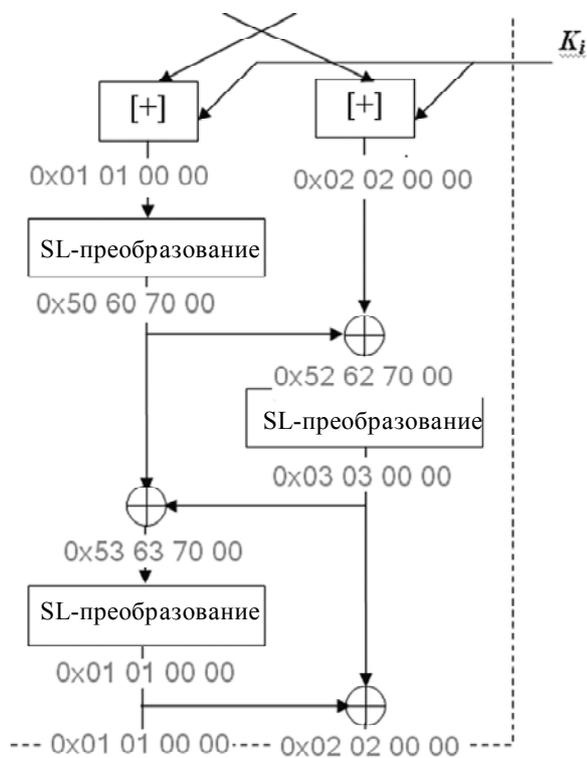


Рисунок 1 – Пример для функции усложнения М-64

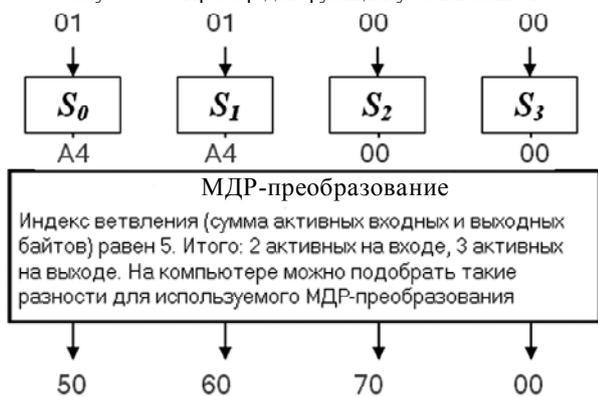


Рисунок 2 – Проход МДР преобразования

Значения, для которых характеристика будет выполняться для S-блоков и МДР-матрицы из спецификации, можно подбирать на компьютере. Ключевой сумматор здесь считается XOR-ом. Как строить характеристики для модульного сумматора – отдельный вопрос, но тоже решаемый.

На входе М-64 – разность вида 01 01 00 00 в 50 60 70 00 в шестнадцатеричном виде. На выходе – то же самое значение. Почему на SL-преобразовании возможно получение перехода 01 01 00 00 в 50 60 70 00 (и других аналогичных)? Потому что для коэффициента ветвления 5-ть МДР матрица для двух активных байтов входа должна формировать три активных байта выхода.

Аналогично получаются переход разностей 52 62 70 00 в 03 03 00 00.

Итог: построение характеристики для М-64, у которой входная разность совпадает с выходной, с точки зрения выбора подходящих переходов не представляет сложности. Однако, как показал наш анализ, такие характеристики строятся из случайных переходов, среди которых попадаются невозможные, или весьма маловероятные. В многочисленных экспериментах по определению законов распределения переходов XOR таблиц 16-ти битных шифрующих преобразований и 32-ух битных в режиме активизации их 16-ти битными входами таких нетривиальных характеристик мы не обнаружили. Во всех случаях фиксировался максимум дифференциальной вероятности характерный для случайной подстановки 16-той степени. В результате отмеченный недостаток, на наш взгляд не дискредитирует шифр Мухомор.

Приведем показатели активизации S-блоков шифра Мухомор. Их иллюстрирует табл. 5. Очевидно, что минимальное число активных S-блоков получается при активизации правого SL преобразования в линейке SL преобразований первого слоя. Но запуск 32-ух битного входа этого SL преобразования осуществляется побитовой суммой по модулю два (разность по модулю два) первого и второго подблоков данных на входе цикла (см. описание шифра Мухомор [9]). Это значит, что один активный байт входа в правое SL преобразование первого слоя может быть сформирован на основе либо разности одного из подблоков (первого или второго), либо на основе разности, составленной из первого и второго подблоков входа. В соответствии с описанием шифра каж-

Таблица 5 – Распределение минимального числа активных S-блоков (в %) на первых циклах шифрования шифра Мухомор (для функции усложнения М-64)

Число активных S-блоков	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
0	0	0	0
1		0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	100	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	100	100

дое из 32-ух битных входных значений функции М-64 складывается по модулю  $2^{32}$  с соответствующей 32-ух битной половинкой циклового подключа. Но существует возможность выбрать активизируемые байты входа так, чтобы операции переноса разрядов при сложении половинок входного блока данных с половинками циклового подключа не приводила бы к увеличению числа активизируемых S-блоков (например, самый правый или самый левый байты входного блока данных). В результате будет активизироваться минимум один байт входа второго SL преобразования. Этот байт входа будет активизировать один S-блок этого SL преобразования и затем еще 4-ре S-блока второго слоя SL преобразований (очередного SL преобразования). Итого на первом цикле с большой вероятностью будет активизироваться минимум 5-ть S-блоков, а на втором все 12-ть S-блоков. За два цикла становятся активными 17-ть S-блоков функции усложнения М-64, а с учетом удвоения числа активных S-блоков схемой Lai-Massey шифр Мухомор приходит к состоянию случайной подстановки с запасом за два цикла.

Мы здесь приведем для иллюстрации результаты определения поцикловых значений максимумов переходов таблиц полных дифференциалов для полной версии шифра Мухомор в режиме его инициализации 16-битными разностями, выполненными в соответствии с методикой работы [1].

Результаты экспериментов иллюстрирует табл. 6, заимствованная из этой же работы. Здесь приводятся диф-

ференциальные показатели сразу для трех шифров, представленных на украинский конкурс. Видно, что шифр Мухомор при активизации его 16-битными разностями приходит к показателям 16-битной случайной подстановки уже на первом цикле.

**Блочный шифр из белорусского стандарта.** Мы здесь сначала приведем краткое описание этого шифра, так как он относится к не так давно принятым стандартам и имеет оригинальную конструкцию [22].

Шифр построен на восьмикратном использовании одной и той же цикловой функции, приведенной на рис. 3. В каждом цикле шифра, как следует из рис. 3, используется 28-мь S-блоков.

Таблица 6 – Поцикловые значения максимумов переходов таблиц полных дифференциалов для полных версий украинских шифров при 16-битных разностях входа

Число циклов	Калина	ADE	Мухомор
1	19,47	65536	19,13
2	19,0	20	18,8
3	19,13	20	19,4
4	19,2	18	19,13
5	19,27	18	19,07
6	18,87	20	19,6
7	19,47	20	19,27
8	19,2	18	19,13
9	19,0	18	19,13
10	19,33	18	19,276

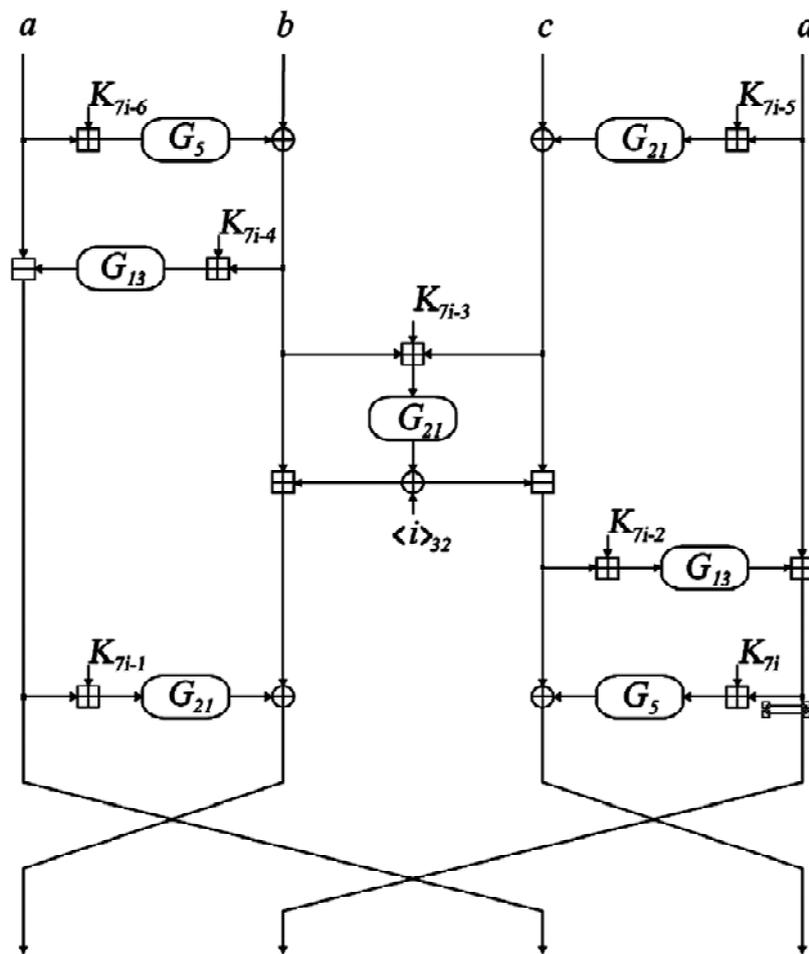


Рисунок 3 – Вычисления на  $i$ -м цикле зашифрования белорусского стандарта

Приведем расшифровку обозначений, использованных на этом рисунке [10]:

$\boxplus$  – сумматор по модулю  $2^{32}$ ;

$\oplus$  – сумматор по модулю 2 (XOR);

$\boxminus$  – блок вычисления разности входных 32-битных слов по модулю  $2^{32}$ ;

$(u \boxminus v)$  для  $u, v \in \{0, 1\}^{8n}$  слово  $w \in \{0, 1\}^{8n}$  такое, что  $u = v \boxplus w$ ;

$\langle i \rangle_{32}$  обозначает представление числа циклов  $i$  в двоичном виде (в виде 32-ух битного слова);

$a, b, c, d$  – переменные со значениями из диапазона  $\{0, 1\}^{32}$ .

**Преобразование  $G_r$  ( $r = 5, 13, 21$ ).** Преобразование  $G_r: \{0, 1\}^{32} \rightarrow \{0, 1\}^{32}$  ставит в соответствие 32-х битному слову на своем входе  $u = u_1 || u_2 || u_3 || u_4$ ,  $u_i \in \{0, 1\}^8$  слово  $G_r(u) = \text{RotN}^r(H(u_1) || H(u_2) || H(u_3) || H(u_4))$  на выходе, что в соответствии с обозначениями работы [22] отвечает представлению входного 32-х битного слова в виде 4-ех последовательных байтов, выполнению над каждым байтом операции нелинейного преобразования (подстановки)  $H$  и дальнейшего циклического сдвига объединения (конкатенации) – байтов с выходов подстановок на  $r = 5, 13$  или 21 бит налево.

Входными данными алгоритмов зашифрования и расшифрования являются 128-битные блоки данных  $X \in \{0, 1\}^{128}$  и 128-битный, 192-битный или 256-битный ключи.

Табл. 7 иллюстрирует распределение числа активных S-блоков по циклам для шифра из белорусского стандарта (активизировался самый правый байт входа). В экспериментах в самом худшем маловероятном случае на первом цикле активизируется 7-мь S-блоков, а на втором 25-ть S-блоков из 28-ми возможных. Это значит, что на двух циклах при 31-ом активном S-блоке входа бело-

русский шифр становится случайной подстановкой при любых (случайных) S-блоках [3]. Во всех экспериментах использовались случайно взятые цикловые подключи.

**Шифра Калина-2.** В табл. 8 представлена картина активизации S-блоков трех первых циклов шифра Калина-2 [23]. Рассматривались ненулевые разности для самого левого и самого правого байта входного блока данных. И в этом случае использовались случайно сгенерированные цикловые подключи. Результаты для самого левого и самого правого байта входного блока данных получились идентичными. Представленные результаты

Таблица 8 – Распределение числа активных S-блоков на первых циклах (в %) при активизации одного байта входа шифра Калина-2

Число активных S-блоков	Число ненулевых однобайтовых разностей в процентах			
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл, Key 1	3-й цикл, Key 2
0	0	0	0	0
1	100	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	100	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0
11	0	0	0	0
12	0	0	0	0,000392
13	0	0	0,002745	0,005490
14	0	0	0,183137	0,169020
15	0	0	5,818431	5,936078
16	0	0	93,995686	93,88902

Таблица 7 – Числа активных S-блоков на соответствующих циклах при активизации одного байта входа белорусского шифра

Число активных S-блоков	Число ненулевых однобайтовых разностей в %, приходящихся на 65025 пар текстов					
	Ключ: 467e18547e73341f2a2e553b7516187233c667063d402b8fad936c53c551b9e			Ключ: 270b40f162313b061e777f457caf216227221a4b53c24df8d3220e620d3225d		
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл	1-й цикл	2-й цикл	
6	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
7	0,002745	0,000000	0,000000	0,001569	0,000000	
8	0,017647	0,000000	0,000000	80,030980	0,000000	
9	0,190588	0,000000	0,000000	0,221569	0,000000	
10	1,014510	0,000000	0,000000	1,223922	0,000000	
11	0,485098	0,000000	0,000000	0,592941	0,000000	
12	1,776078	0,000000	0,000000	2,171765	0,000000	
13	9,105098	0,000000	0,000000	10,983529	0,000000	
14	8,710196	0,000000	0,000000	10,402745	0,000000	
15	3,964706	0,000000	0,000000	4,513333	0,000000	
16	53,669804	0,000000	0,000000	63,663529	0,000000	
17	4,491765	0,000000	0,000000	3,099216	0,000000	
18	1,077647	0,000000	0,000000	0,182745	0,000000	
19	15,494118	0,000000	0,000000	2,912157	0,000000	
20	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
21	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
22	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
23	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	
24	0,000000	0,000000	0,000392	0,000000	0,000392	
25	0,000000	0,018431	0,021961	0,000000	0,020784	
26	0,000000	0,472549	0,503922	0,000000	0,522745	
27	0,000000	9,610980	9,993333	0,000000	10,259216	
28	0,000000	90,289412	89,871765	0,000000	89,587843	

свидетельствуют, что шифр Калина-2 становится случай-ной подстановкой после трех циклов (по дифференци-альным и по линейным показателям), т.е. по динамичес-ким показателям шифр Калина-2 имеет несколько более высокие показатели, чем шифр Rijndael (за три цикла активизируется минимум 24-ре S-блока).

Отметим далее, что, как уже отмечалось выше, в ходе разработки новой методики оценки стойкости блочных симметричных шифров, был введен дополнительный показатель эффективности шифрующих преобразований в виде числа циклов, требующихся для прихода шифра к состоянию случайной подстановки [3]. Тот шифр счита-ется более совершенным, для которого число циклов прихода к состоянию случайной подстановки оказыва-ется меньшим.

**Camellia** [24]. Приведем здесь также показатели акти-визации S-блоков первых циклов шифра Camellia, приня-того в качестве стандарта в Японии. На рис. 4 приведена конструкция F-функци, которая определяет преобра-зования на первых циклах шифра Camellia.

Camellia – это следующее поколение 128-битного блоч-ного криптографического алгоритма, разработанного в Японии специалистами телеграфной и телефонной Кор-порации Nippon и электрической Корпорации Mitsubishi, который поддерживает три размера ключей:  $l_k = 128, 192$  и 256 бит. Блочный симметричный алгоритм Camellia был разработан не только как высоко защищенный криптогра-фический шифр, но также как алгоритм, легко переноси-мый на разные аппаратные платформы. Ниже в табл. 9 приводится распределение числа активных S-блоков на

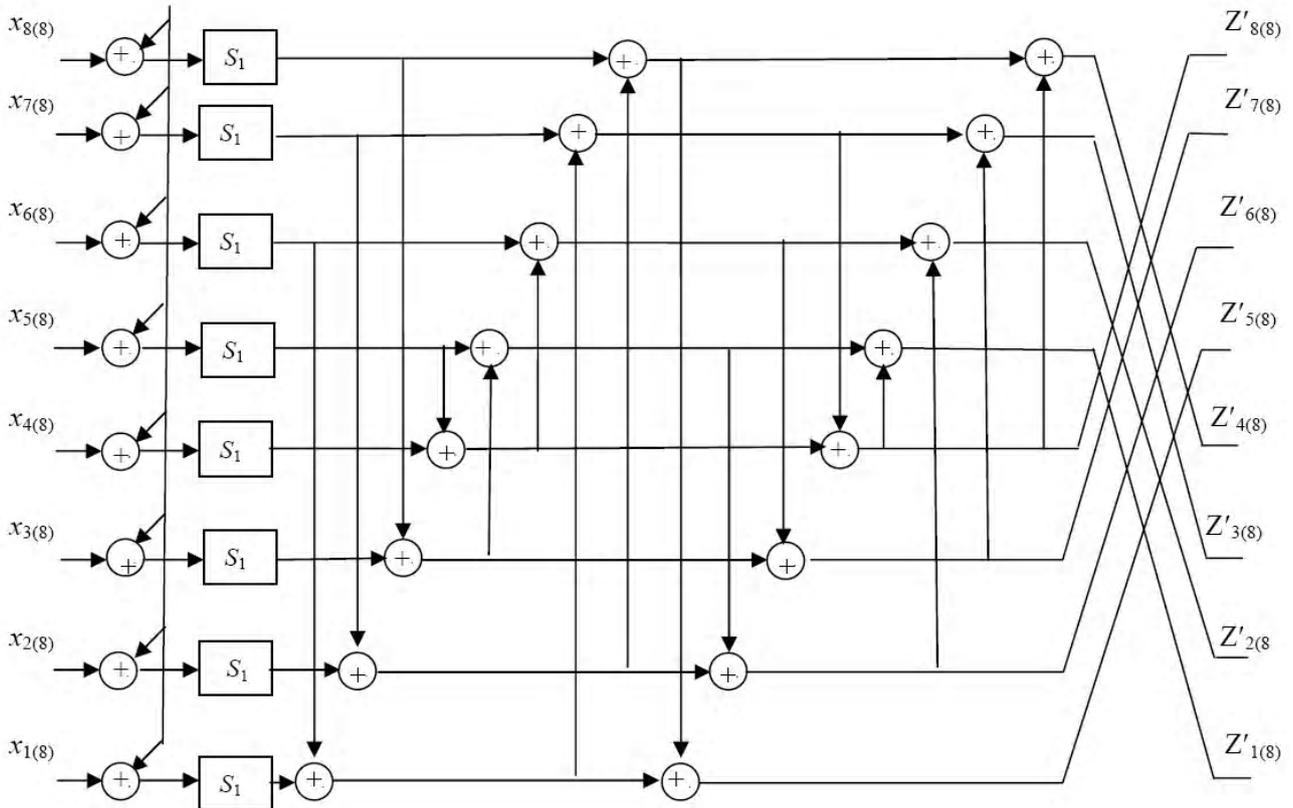


Рисунок 4 – F- функция\шифра Camellia

Таблица 9 – Числа активных S-блоков на соответствующих циклах при активизации одного байта входа шифра Camellia

Число активных S-блоков	Число ненулевых однобайтовых разностей в %, приходящихся на 65025 пар текстов					
	Ключ: 469c57096730bd15fd71a975c503dee469c57096730bd15fd71a975c503dee			Ключ: 46e148be3fdf41c22df55cb45ba14dcd46e148be3fdf41c22df55cb45ba14dcd		
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
1	100	0	0	100	0	0
2	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
5	0	100	0,004706	0	100	0,003137
6	0	0	0,024706	0	0	0,029804
7	0	0	3,071765	0	0	3,081176
8	0	0	96,898824	0	0	96,885882

первых циклах шифрования при активизации одного байта входа шифра Camellia. Представленные результаты позволяют заключить, что шифр Camellia становится случайной подстановкой на четвертом цикле ( $DP_{\max}^{\pi} = 2^{-6}$ ). Таким образом, по показателям случайности этот шифр уступает шифру Rijndael один цикл.

**Serpent** [25]. В этом 128-ми битном шифре цикловая функция строится с помощью полубайтовых S-блоков (золотых S-блоков [26]). Для таких S-блоков  $DP_{\max}^{\pi} = 2^{-2}$ , и, следовательно,  $k_{\min} = 60$ .

В табл. 10 приводится распределение активных S-блоков на первых трех циклах зашифрования для этого шифра. Из приведенных результатов следует, что шифр Serpent становится случайной подстановкой после 4-х и более циклов.

В итоге к наиболее прогрессивным из рассмотренных выше конструкций следует отнести шифры Мухомор и Калину-2, а также шифр из белорусского стандарта. Эти шифры реализуют показатели прихода к состоянию случайной подстановки близкие к предельным.

**ШУП-1.** В заключение мы хотим представить данные по активизации S-блоков первого цикла шифра, предложенного в патенте [27], посвященном разработке новой концепции проектирования блочных симметричных шифров. Конструкцию функции первого цикла этого шифра со 128-м битным входом иллюстрирует рис. 5.

Здесь в качестве SL преобразований применяется известная структура из 4-ех байтовых S-блоков с последующим умножением на МДР матрицу размера 4×4 (как

Таблица 10 – Доля активных S-блоков в % на соответствующих циклах при активизации одного байта входа шифра Serpent

Число активных S-блоков	Число ненулевых повторений активизации в %, приходящихся на 65025 пар текстов		
	1-й цикл	2-й цикл	3-й цикл
1	5,490196	0	0
2	16,47058	0	0
3	27,45098	0	0
4	27,45098	0	0
5	16,47058	0	0
6	5,490196	0,1952941	0
7	0,784313	0,683921	0
8		0,1952941	0
9	0	0,6894117	0
10	0	1,0545098	0
11	0	1,0996078	0
12	0	1,1458823	0
13	0	1,2576470	0
14	0	2,9360784	0
15	0	3,5913725	0
16	0	6,3505882	0
17	0	7,0235294	0
18	0	9,0090196	0,00313725
19	0	10,6764705	0,00941176
20	0	11,1760784	0,05411764
21	0	12,0721568	0,18078431
22	0	12,2772549	0,76941176
23	0	9,17450980	2,39960784
24	0	5,70313725	7,14745098
25	0	2,79411765	16,35411764
26	0	0,79450980	27,37098039
27	0	0,09960784	29,83411764
28	0	0	15,87686274

в шифре Rijndael). На входе в первое SL преобразование выполняется сложение 32-ух битных сегментов входного блока данных по модулю 2.

В табл. 11 представлены результаты, иллюстрирующие активизацию S-блоков первого цикла. Видно, что с очень большой вероятностью в этой конструкции активизируются практически все 16-ть S-блоков первого цикла. Вероятность дифференциальной характеристики, составленной из 16-ти S-блоков, для  $DP_{\max}^{\pi} = 2^{-6}$  (как у S-блоков шифра Rijndael) равна  $2^{-96}$ .

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что конструкции первых цикловых преобразований блочных симметричных шифров играют важную роль в обеспечении динамических показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки, и существенно влияют на значения числа циклов, необходимых для обеспечения запаса их стойкости. Все рассмотренные (известные) конструкции современных 128-ми битных блочных симметричных шифров, за исключением шифров IDEA NXT, Калина, Мухомор и белорусского шифра, обеспечивают динамические показатели прихода к состоянию случайной подстановки превышающие три-четыре цикла.

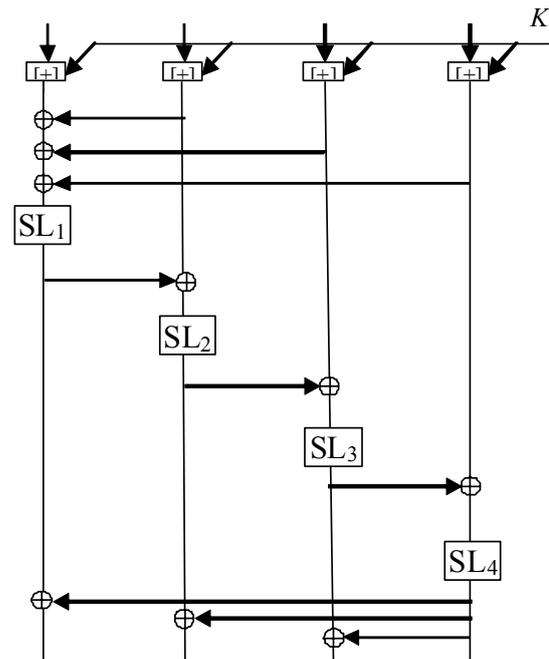


Рисунок 5 – Схема циклового преобразования шифра ШУП-1

Таблица 11 – Число активных S-блоков первого цикла

Число активных S-блоков	Доля числа активных S-блоков в %
1÷10	0
11	0,000048
12	0,000811
13	0,031328
14	0,692749
15	10,978746
16	87,905693

Шифр Rijndael оказывается далеко не в лидерах по рассматриваемому показателю (для прихода к состоянию случайной подстановки ему необходимо 4-ре цикла).

К наиболее прогрессивным решениям по построению блочных симметричных шифров можно отнести шифры ШУП-1, Калина-2, белорусский шифр и шифр Мухомор. В этих шифрах за счет активизации одним байтом входа сразу нескольких S-блоков цикловой функции обеспечивается увеличенное по сравнению с другими шифрами минимальное число S-блоков, активизируемых на первых циклах. Криптографические свойства таких шифров практически не зависят от дифференциальных и линейных свойств используемых S-блоков. А это значит, что в этих шифрах могут применяться без всяких ограничений произвольные S-блоки, порожденные генератором случайных подстановок. Для таких шифров задача поиска S-блоков с улучшенными криптографическими показателями, которой уделяется и сегодня огромное внимание в публикациях по криптографической тематике, теряет всякий смысл.

Лидером по динамическим показателям прихода шифра к состоянию случайной подстановки, безусловно, является шифр ШУП-1. Это единственный шифр, у которого на первом цикле с большой вероятностью при активизации одного байта входа активизируются все S-блоки цикловой функции. В этом шифре благодаря отмеченным высоким динамическим показателям применяется восемь циклов зашифрования (существенно меньше, чем у шифров Rijndael и Калина). Более того в этом шифре допускается конвейерная обработка данных, позволяющая дополнительно повысить скорость шифрования почти в три раза. Наконец в этом шифре применена существенно более быстродействующая по сравнению с шифром Калина схема разворачивания ключей.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные в работах [3, 4, 5] вычислительный, и дополненный в этой работе экспериментальный методы определения динамических показателей прихода блочных симметричных шифров к состоянию случайной подстановки позволяют для полномасштабных версий проверяемых шифров оценить минимальное число циклов зашифрования, после которых шифры приходят к состоянию случайной подстановки. В итоге открываются дополнительные возможности для сравнения по эффективности шифров между собой.

В то же время знание показателей прихода шифров к состоянию случайной подстановки позволяет обосновано подойти к определению числа циклов зашифрования, обеспечивающих необходимый запас стойкости шифров. Как показала практика, этот запас выбирается в три-четыре раза превышающим число циклов зашифрования, необходимое для прихода шифра к состоянию случайной подстановки. Например, для 512 битного шифра Калина-2 выбранное число циклов зашифрования 18 является явно завышенным. Как показывают наши оценки, 512 битный шифр Калина-2 приходит к состоянию случайной подстановки за четыре цикла. А это означает, что для него без снижения стойкости можно ограничиться 12-ю циклами зашифрования, что позволяет повысить быстродействие шифра более чем в 1,5 раза.

Перспективы дальнейших исследований видятся в разработке дополнительных усовершенствований уже существующих конструкций шифров в направлении улучшения их динамических показателей прихода к случайной подстановке, что позволит применять в усовершенствованных шифрах S-блоки случайного типа. Первое предложение в этом направлении уже запатентовано [28].

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача уточнения и подтверждения с помощью вычислительных экспериментов эффективности новой методики оценки динамических показателей прихода итеративных блочных симметричных шифров к состоянию случайной подстановки.

Научная новизна результатов статьи состоит в том, что впервые получены обоснованные объективные данные для значений числа циклов прихода к состоянию случайной подстановки ряда современных шифров.

Практическая значимость предлагаемой методики и представленных в работе результатов видится в их конструктивном. Они позволяют выполнить обоснование числа циклов шифрующей преобразований, которые обеспечивают достижение предельного уровня стойкости шифров.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина «Аналіз стану, обґрунтування вимог та напрямків розвитку, стандартизація розробка та впровадження криптографічних систем для надання електронних довірчих послуг» (номер гос. реєстрації 0116U000810). Приказ МОН України № 158 от 26.02.2016 г.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лисицкая И. В. Методология оценки стойкости блочных симметричных криптопреобразований на основе уменьшенных моделей: дис. ... докт. техн. наук: 05.13.05 / Лисицкая Ирина Викторовна. – Харьков, 2012. – 293 с.
2. Долгов В. Методология оценки стойкости блочных симметричных шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа: монография / В. И. Долгов, И. В. Лисицкая. – Харьков: Издательство «Форт», 2013. – 420 с.
3. Горбенко И. Д. О динамике прихода шифров к случайной подстановке при использовании S-блоков с показателями нелинейности близкими к предельным / И. Д. Горбенко, К. Е. Лисицкий // Радиотехника: Всеукр. межвед. Науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. № 176. – С. 27–39.
4. Gorbenko I. D. On Ciphers Coming to a Stationary State of Random Substitution / I. D. Gorbenko, K. E. Lisitskiy, D. S. Denisov // Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering, – No. 2. – P. 206–215. DOI. 10.13189/ujeee.2014.020409.
5. Лисицкий К. Е. Динамические показатели прихода блочных шифров к состоянию случайной подстановки / К. Е. Лисицкий // Издательский дом LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 60 с. ISBN-13. 978-3-659-28919-4.
6. Keliher L. Improving the upper bound on the maximum average linear hull probability for Rijndael / L. Keliher, H. Meijer and S. Tavares // Advances in Cryptology, Selected Areas in Cryptography '01, LNCS 2259, S. Vaudenay, A. M. Youssef, Eds., Springer-Verlag. – 2001. – P. 112–128.
7. On the security of Rijndael-like structures against differential and linear cryptanalysis / [S. Park, S. H. Sung, S. Chee et al.] // Advances

- in Cryptology, Proceedings of Asiacrypt '02, LNCS 2501, Y. Zheng, Ed., Springer-Verlag. – 2002. – P. 176–191.
8. Improving the upper bound on the maximum differential and the maximum linear hull probability for SPN structures and AES / [S. Park, S. H. Sung, S. Lee et al.] // Fast Software Encryption '03, LNCS 2887, T. Johansson, Ed., Springer-Verlag. – 2003. – P. 247–260.
  9. Vaudenay S. Resistance against general iterated attacks / S. Vaudenay // Advances in Cryptology, Proceedings of Eurocrypt '99, LNCS 1592, J. Stern, Ed., Springer-Verlag. – 1999. – P. 255–271.
  10. Matsui M. On a Structure of Block Ciphers with Provable Security against Differential and Linear Cryptanalysis / M. Matsui // IEICE Trans/ Fundamentals. – January 1999. – Vol. E82-A, No. 1. – P. 117–122.
  11. Provable Security against Differential and Linear cryptanalysis for SPN Structure / [S. Hong, S. Lee, J. Lim et al.] // B. Schneier (Ed.): FSE 2000, LNCS. – 1978. – P. 273–283, 2001.
  12. Baignoires T. Proving the Security of AES Substitution-Permutation Network / T. Baignoires, S. Vaudenay // <http://lasecwww.epfl.ch>. – 2004. – P. 16.
  13. Оценки практической стойкости блочного шифра «Калина» относительно методов разностного, линейного криптоанализа и относительно алгебраических атак, основанных на гомоморфизмах. / [Алексийчук А. Н., Ковальчук Л. В., Скрыпник Е. В. и др.] // Прикладная радиоэлектроника. – 2008. – Т. 7, № 3. – С. 203–209.
  14. On the Security of Nested SPN Cipher against the Differential and Linear Cryptanalysis / [F. Sano, K. Ohkuma, H. Shimizu et al.] // IEICE Trans. Fundamentals. – January 2003. – Vol. E86-a, No.1. – P. 37–46.
  15. Лисицкая И. В. О криптографической значимости схем разворачивания ключей в обеспечении стойкости блочных симметричных шифров к атакам дифференциального и линейного криптоанализа / И. В. Лисицкая, А. А. Настенко, К. Е. Лисицкий // Радиоэлектроника и информатика. – 2012 – № 3 (58). – С. 56–65.
  16. Дифференциальные свойства подстановок / [Р. В. Олейников, О. И. Олешко, К. Е. Лисицкий и др.] // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – Т. 9, № 3. – С. 326–333.
  17. Долгов В. И. Свойства таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок / В. И. Долгов, И. В. Лисицкая, О. И. Олешко // Прикладная радиоэлектроника. – 2010. – № 3. – С. 334–340
  18. Лисицкая И. В. Свойства законов распределения XOR таблиц и таблиц линейных аппроксимаций случайных подстановок / И. В. Лисицкая // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. – 2011. – № 960, Вип.16. – С. 196–206.
  19. Daemen J. AES Proposal: Rijndael / J. Daemen and V. Rijmen. 1st AES Conference, California, USA. – 1998. – [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.nist.gov/aes>.
  20. Junod P. FOX: a new family of block ciphers / P. Junod and S. Vaudenay // In H. Handschuh and A. Hasan, editors, Selected Areas in Cryptography: 11th International Workshop, SAC 2004, Waterloo, Canada, August 9–10, 2004. Revised Selected Papers, volume 3357 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag. – 2004. – P. 114–129.
  21. Перспективний блочний симетричний шифр «Мухомор» – основні положення і специфікація / [Горбенко І. Д., Бондаренко М. Ф., Долгов В. І. і др.] // Прикладна радіоелектроніка. – 2007. – Том. 6, № 2. – С. 147–157.
  22. Государственный стандарт республики Беларусь. СТБ 34.101.31-2011. Информационные технологии. Защита информации Криптографические алгоритмы шифрования и контроля целостности. Введен в действие постановлением Госстандарта Республики Беларусь от 31 января 2011 г. № 5. Изд-во Госстандарт, Минск. – 2011. – 35 с.
  23. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм симетричного блокового перетворення: ДСТУ 7624:2014. – К. : Держспоживстандарт України, 2015. – 238 с. – (Національний стандарт України).
  24. Specification of Camellia – a 128 bit Block Cipher, version 2.0 / [K. Aoki, T. Ichikawa, M. Kanda et al.] // Copyrighting NTT and Mitsubishi Tlektronic Corporation. – 2001. – September 26. – P. 35.
  25. Biham E. Serpent: A New Block Cipher Proposal / E. Biham, R. Anderson, and L. R. Knudsen // In S. Vaudenay, editor, 5th Fast Software Encryption Workshop, LNCS 1372. – Springer-Verlag. – 1998. – P. 222–238.
  26. Markku J. Cryptographic Analysis of All 16-Bit S-Boxes / Markku-Juhani, O. Saarinen // – 2008. – Vol. 7118 of the series Lecture Notes in Computer Science. – P. 118–133.
  27. Пат. 111547 Україна, МПК (2016.01) G09C 1/00 H04L 9/06 (2006.01). Спосіб криптографічного перетворення двійкових даних (варіанти) / Горбенко І. Д., Долгов В. І., Лисицька І. В. та інші (Україна); заявник АО ІТ м. Харків. № а201500942; заявл. 06.02.2015; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9. – 20 с.
  28. Пат. 111448 Україна, МПК H04L 29/14 (2006.01) H04L 9/14 (2006.01) H04L 9/06 (2006.01). Спосіб криптографічного перетворення двійкових даних / Горбенко І. Д., Долгов В. І., Лисицька І. В. та інші (Україна); заявник АО ІТ м. Харків. № а201503976; заявл. 25.04.2015; опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8 – 20 с.

Статья поступила в редакцию 29.08.2016.  
После доработки 03.10.2016.

Лисицька І. В.<sup>1</sup>, Лисицький К.Є.<sup>2</sup>, Головка І. А.<sup>3</sup>, Жаріков І. І.<sup>3</sup>, Корнієнко М. А.<sup>3</sup>, Кулеба М. В.<sup>3</sup>, Родінко М. Ю.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, професор кафедри Безпеки Інформаційних Систем і Технологій Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

<sup>2</sup>Студент Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, Харків, Україна

<sup>3</sup>Студенти Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ЩОДО ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИХОДУ БЛОКОВИХ СИМЕТРИЧНИХ ШИФРІВ ДО СТАНУ ВИПАДКОВОЇ ПІДСТАНОВКИ

**Актуальність.** Об'єктом досліджень даної роботи є процеси приходу блокових симетричних шифрів до стану випадкової підстановки.

**Мета роботи.** Уточнення за допомогою обчислювальних експериментів значень динамічних показників приходу ряду сучасних шифрів до стану випадкової підстановки, які можуть стати важливими при порівняльній оцінці їх ефективності.

**Метод.** Методика виконання експериментів при визначенні диференціальних показників полягає в активізації шифрів (програмних моделей) наборами вхідних різниць і подальшого визначення мінімальної кількості S-блоків, що активізується на перших циклах шифрування, що дозволяє отримати значення диференціальної ймовірності відповідне показнику стійкості розглянутого шифру. При визначенні лінійних показників перебираються ненульові маски входів в S-блоки і ненульові маски їх виходів. При цьому на вході шифру активізується один байт вхідного блоку даних, причому вибирається байт, який активізує мінімальне число S-блоків першого циклу. Тут під активним байтом (S-блоком) розуміється байт (S-блок), за допомогою якого для пари входів в шифр (в S-блок) формується ненульова вхідна (вихідна) різниця. Потім в режимі шифрування повним перебором всіх 256 бітових однобайтових різниць входу

шифру визначається мінімальне число S-блоків, що активізується на кожному з циклів, які перераховуються в числа циклів шифрування, необхідних для приходу шифру до випадкової підстановки. Близька за змістом процедура може бути виконана і при аналізі лінійних показників з використанням вхідних і вихідних масок.

**Результати.** Отримані результати свідчать про те, що конструкції перших циклових перетворень блокових симетричних шифрів грають важливу роль в забезпеченні динамічних показників приходу шифрів до стану випадкової підстановки, і істотно впливають на значення числа циклів, необхідних для забезпечення запасу їх стійкості. Всі розглянуті (відомі) конструкції сучасних 128-бітних блокових симетричних шифрів, за винятком шифрів IDEA NXT, Калина, Мухомор і білоруського шифру, забезпечують динамічні показники приходу до стану випадкової підстановки, що перевищують три-чотири цикли. Шифр Rijndael виявляється далеко не в лідерах з даного показника (для приходу до стану випадкової підстановки йому необхідно 4-ри цикли).

**Висновки.** В роботі вирішена задача уточнення і підтвердження за допомогою обчислювальних експериментів ефективності нової методики оцінки динамічних показників приходу шифрів до стану випадкової підстановки.

Наукова новизна результатів статті полягає в тому, що вперше отримані обґрунтовані об'єктивні дані для значень числа циклів приходу до стану випадкової підстановки ряду сучасних шифрів.

Практична значимість запропонованої методики і представлених в роботі результатів полягає в їх конструктивізм. Вони дозволяють виконати обґрунтування числа циклів шифруючих перетворень, які забезпечують досягнення граничного рівня стійкості шифрів.

**Ключові слова:** блоковий симетричний шифр, динамічні показники, стан випадкової підстановки, стійкість до атак диференціального і лінійного криптоаналізу, активні S-блоки.

Lisitskaya I. V.<sup>1</sup>, Lisitsky K. E.<sup>2</sup>, Golovko I. A.<sup>3</sup>, Zharikov I. I.<sup>3</sup>, Kornienko M. A.<sup>3</sup>, Kuleba M. V.<sup>3</sup>, Rodinko M. Y.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sc., Professor, Professor of department of Security of Information Systems and Technologies of the V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkov, Ukraine

<sup>2</sup>Student of the V. N. Karazin Kharkov National University, Kharkiv, Ukraine

<sup>3</sup>Students of the Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

#### EXPERIMENTAL DATA FOR THE IDENTIFICATION OF DYNAMIC INDICATORS OF COMING TO BLOCK OF SYMMETRIC CIPHERS RANDOM PERMUTATION

**Context.** The object of study of this work is the arrival processes of block symmetric ciphers to the state of a random permutation.

**Objective.** Clarification by means of computational experiments values of dynamic parameters arrival of some modern ciphers to the state of a random permutation, which can be important when evaluating their effectiveness.

**Method.** Methods of experiments consists in determining the differential parameters in activation ciphers (programming models) sets the input difference and the subsequent determination of the minimum number of S-boxes-activated in the first cycle of encryption, allowing to obtain the value of the differential probability of relevant indicators of resistance considered cipher. In determining the linear indicators are moving non-zero mask inputs in S-boxes, and non-zero mask their outputs.

When this input is activated on one cipher byte input frame, with a byte is selected, which activates minimum number the first cycle of S-blocks. Here, the active byte (S-unit) means bytes (S-unit), by which for the pair in the input code (in the S-box) is formed non-zero input (output) the difference. Then, in the mode of encoding a complete listing of all 256 bit single-byte cipher input differences determined by the minimum number of activatable S-boxes in each of the cycles that are translated into the number of enciphering cycles required for the arrival of a random permutation cipher. A similar within the meaning of the procedure can be performed in the analysis of linear parameters using the input and output masks.

**Results.** The results indicate that the construction of the first cyclic transformation block symmetric ciphers play an important role in ensuring the dynamic performance of the parish codes to random permutation, and significantly affect the value of the number of cycles required for the stock of their resistance. All of the (known) design of modern 128-bit block symmetric ciphers, except ciphers IDEA NXT, Kalina, Amanita and Belarusian cipher, provide dynamic performance to the arrival of a random permutation exceeding three or four cycles. Rijndael cipher is far from the leaders of the subject indicator (for the arrival of a random permutation it needs 4 cycles).

**Conclusions.** In this paper we solve the problem clarification and confirmation via computational experiments the effectiveness of a new methodology for assessing the dynamic performance of the parish codes to random permutation.

Scientific novelty of the results of the paper is that the first objective data obtained reasonable for the arrival of number of cycles to the values of a random permutation of some modern ciphers.

The practical significance of the proposed methodology and presented the results is their constructivism. They allow you to perform a study of ciphering transformation cycles that achieve the maximum level of resistance ciphers.

**Keywords:** block symmetric cipher, dynamic indicators, state random permutation, resistance to differential and linear attacks cryptanalysis, the active S-boxes.

#### REFERENCES

1. Lisitskaya I. V. Metodologiya ocenki stojkosti blochnyh simmetrichnyh kriptopreobrazovaniy na osnove umenshenyh modelej diss. Doctor. Tehn. Sciences: 05.13.05. Kharkov, 2012, 293 p.
2. Dolgov V. I., Lisitskaya I. V. Metodologiya ocenki stojkosti blochnyh simmetrichnyh shifrov k atakam differencial'nogo i linejnogo kriptoolnalyza: monografiya. Har'kov. Izdatel'stvo «Fort», 2013, 420 p.
3. Gorbenko I. D., Lisitskiy K. E. O dinamike prihoda shifrov k sluchajnoj podstanovke pri ispol'zovanii S-blokov s pokazatelyami nelinejnosti blizkimi k predel'nym, *Radiotekhnika: Vseukr. Mezhd. Naych.-tehn. zb.*, 2014, Vyp. № 176, pp. 27–39.
4. Gorbenko I. D., Lisitskiy K. E., Denisov D. S. On Ciphers Coming to a Stationary State of Random Substitution, *Universal Journal of Electrical and Electronic Engineering*, No. 2, pp. 206–215. DOI: 10.13189/ujeee. 2014.020409.
5. Lisitskiy K. E. Dinamicheskie pokazateli prihoda blochnyh shifrov k sostoyaniyu sluchajnoj podstanovki, *Izdatel'skij dom LAP LAMBERT Academic Publishing*, 2014, 60 p. ISBN-13: 978-3-659-28919-4.
6. Keliher L., Meijer H., and Tavares S. Improving the upper bound on the maximum average linear hull probability for Rijndael, *Advances in Cryptology, Selected Areas in Cryptography '01, LNCS 2259, S. Vaudenay, A. M. Youssef*, Eds. Springer-Verlag, 2001, pp. 112–128.
7. Park S., Sung S. H., Chee S. et al. On the security of Rijndael-like structures against differential and linear cryptanalysis, *Advances in Cryptology, Proceedings of Asiacrypt '02, LNCS 2501, Y. Zheng*, Ed., Springer-Verlag, 2002, pp. 176–191.

8. Park S., Sung S.H., Lee S. et al. Improving the upper bound on the maximum differential and the maximum linear hull probability for SPN structures and AES, *Fast Software Encryption '03, LNCS 2887*, T. Johansson, Ed. Springer-Verlag, 2003, pp. 247–260.
9. Vaudenay S. Resistance Against General Iterated Attacks, *Advances in Cryptology, Proceedings of Eurocrypt '99, LNCS 1592*, J. Stern, Ed., Springer-Verlag, 1999, pp. 255–271.
10. Matsui M. On a Structure of Block Ciphers with Provable Security against Differential and Linear Cryptanalysis. *IEICE Trans/Fundamentals*, Vol. E82-A, No. 1 January 1999, pp. 117–122.
11. Hong S., Lee S., Lim J. et al. Provable Security against Differential and Linear cryptanalysis for SPN Structure, *B. Schneier (Ed.): FSE 2000, LNCS*, 1978, 2001, pp. 273–283.
12. Thomas B., Vaudenay S. Proving the Security of AES Substitution-Permutation Network. <http://lasecwww.epfl.ch>, 2004, p. 16.
13. Aleksijchuk A. N., Kovalchuk L. V., Skrupnik E. V. i dr. Ocenki prakticheskoy stojkosti blochnogo shifra «Kalina» odnositelno metodov raznostnogo, linejnogo kriptoolizma odnositelno algebraicheskikh atak, osnovannyh na gomomorfizmah, *Prikladnaya Radioelektronika*, 2008, Vol. 7, No. 3, pp. 203–209.
14. Sano F., Ohkuma K., Shimizu H. et al. On the Security of Nested SPN Cipher against the Differential and Linear Cryptanalysis, *IEICE Trans. Fundamentals*, Vol. E86-a, No. 1, January 2003, pp. 37–46.
15. Lisitskaya I. V. Nastenka A. A., Lisitskij K. E. O kriptograficheskoy znachimosti shem razvorachivaniya klyuchey v obespechenii stojkosti blochnyh simmetrichnyh shifrov k atakam differencial'nogo i linejnogo kriptoolizma, *Radioelektronika i informatika*, 2012, No. 3(58), pp. 56–65.
16. Olejnikov R. V., Oleshko O. I., Lisitskij K. E. i dr. Differencial'nye svojstva podstanovok, *Prikladnaya Radioelektronika*, 2010, Vol. 9, No. 3, pp. 326–333.
17. Dolgov V. I., Lisitskaya I. V., Oleshko O. I. Svojstva tablic linejnyh aproksimacij sluchajnyh podstanovok, *Prikladnaya Radioelektronika*, 2010, No. 3, pp. 334–340.
18. Lisitskaya I.V. Svojstva zakonov raspredeleniya XOR tablic i tablic linejnyh aproksimacij sluchajnyh podstanovok, *Visnyk Harkovskogo nacional'nogo universiteta im. V.N. Karazina*, 2011, No. 960, Vup.16, pp. 196–206.
19. Daemen J., Rijmen V. AES Proposal: Rijndael, *1st AES Conference*. California, USA, 1998. [Electronic resource] Access mode: [http://www.nist.gov/aes.IDEA\\_NXT](http://www.nist.gov/aes.IDEA_NXT)
20. Junod P., Vaudenay S. FOX: a new family of block ciphers, *In H. Handschuh and A. Hasan, editors, Selected Areas in Cryptography: 11th International Workshop, SAC 2004*. Waterloo, Canada, August 9–10, 2004, Revised Selected Papers, volume 3357 of Lecture Notes in Computer Science, Springer-Verlag, 2004, pp. 114–129.
21. Gorbenko I. D., Bondarenko M. F., Dolgov V. I. i dr. Perspektivnyj blochnyj simmetrichnyj shifr «Muhomor» – osnovnye polozeniya i specifikaciya, *Prikladnaya Radioelektronika*, 2007. Vol. 6, No. 2, pp. 147–157.
22. Gosudarstvennyj standart respubliky Belarus'. STB 34.101.31-2011. Informacionnye tehnologii. Zashita informacii. Kriptograficheskie algoritmy shifrovaniya i kontrolya celostnosti. Vveden v dejstvie postanovleniem Gosstandarta Respubliki Belarus' ot 31 yanvarya 2011 g. № 5. Izd-vo Gosstandart. Minsk, 2011, 35 p.
23. Informacijni tehnologii. Kriptografichnyj zahyst informacii. Algoritm symmetrichnogo blokovogo peretvorennja: DSTU 7624:2014. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrainu, 2015, 238 p. (Nacional'nyj standart Ukrainy).
24. Aoki K., Ichikawa T., Kanda M. et al. Specification of Camellia – a 128 bit Block Cipher, version 2.0, *Copyright NTT and Mitsubishi Tlektronic Corporation*, 2001, September 26, pp. 35.
25. Biham E., Anderson R., and Knudsen L. R. Serpent: A New Block Cipher Proposal. In S. Vaudenay, editor, 5th Fast Software Encryption Workshop, LNCS 1372, Springer-Verlag, 1998, pp. 222–238.
26. Markku-Juhani O. Saarinen Cryptographic Analysis of All 16-Bit S-Boxes. 2008. Volume 7118 of the series Lecture Notes in Computer Science, pp. 118–133.
27. Gorbenko I. D., Dolgov V. I., Lisitskaya et al. (Ukraine) Pat 111547 Ukraina, МПК (2016.01) G09C 1/00 H04L 9/06 (2006.01). Sposib kryptografichnogo peretvorennja dvijkovyh danyh (varianty) / ; zayavnyk AO IIT m. Charkiv. № a201500942; zayavleno 06.02.2015; opublikovano 10.05.2016, Bull. № 9, 20 p.
28. Gorbenko I. D., Dolgov V. I., Lisitskaya et al. (Ukraine) Pat. 111448 Ukraina, МПК H04L 29/14 (2006.01) H04L 9/14 (2006.01) H04L 9/06 (2006.01). Sposib kryptografichnogo peretvorennja dvijkovyh danyh ; zayavnyk AO IIT m. Charkiv. № a201503976; zayavleno 25.04.2015; opublikovano 25.04.2016, Bull. № 8, 20 p.

## THE MODEL FOR ESTIMATION OF COMPUTER SYSTEM USED RESOURCES WHILE EXTRACTING PRODUCTION RULES BASED ON PARALLEL COMPUTATIONS

**Context.** The task of production rules extraction while processing big arrays of data has been discussed. The problem of estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations has been solved. The research object is the process of production rules extraction. The research subject lies in methods of parallel computer systems' resource planning.

**Objective.** The purpose of the work is a construction of the model for estimation parallel computer systems resources used to solve applied problems based on the parallel method of production rules extraction.

**Method.** The article deals with the model building of used resources estimation of parallel computer system while extracting production rules. The model for estimation of computer system used resources while executing the parallel method of method of production rules extraction is proposed. Synthesized model takes into account the type of computer system, the amount of processors involved to solving the task and the bandwidth of data transfer network. In addition, the model considers parameters of used mathematical equipment (the portions of parallel system nodes involved for production rules extraction based on decision trees, associative rules and negative selection). Also the parameters of solved application task are taken into account. They are the number of observations and the number of characteristics in a given set of data describing the results of observations of the object or process being studied. The synthesized neural model is a polyalgorithmic. It allows estimating two characteristics of parallel computer system while executing the parallel method of production rules extraction. The first one is time used. And the second one is the volume of memory used.

**Results.** The software which implements the proposed model and allows predicting the time and the volume of memory used of parallel computer system while solving practice tasks has been developed.

**Conclusions.** The conducted experiments have confirmed the proposed software operability and allow recommending it for use in practice for solving the problems of big data processing. The prospects for further research may include the creation of parallel methods for feature selection, as well as an experimental study of proposed model on more complex practical problems of different nature and dimensionality.

**Keywords:** data sampling, parallel computing, resource estimation, production rules, neural network.

### NOMENCLATURE

CPU – Central Processing Unit;

GPU – Graphical Processing Unit;

*type* – type of system (cluster CPU or GPU);

*M* – number of features in the sample of observations *S*;

$N_{pr}$  – number of processes, on which task is performed;

*Mem* – amount of used RAM, MB;

*Vol* – amount of used recourses of the computer system;

*Q* – number of observations in the given sample of observations *S*;

*S* – sample of observations (training sample);

*T* – operating time of parallel system, min;

*V* – bandwidth of data transmission media, GB/sec;

*w* – matrix of weight coefficients;

$w_0$  – offset value of the function  $\Phi(w;x)$ ;

$|x|$  – amount of function  $\Phi(w;x)$  arguments;

$N_{DTpr}$  – number of parallel system nodes involved for production rules extraction based on decision trees;

$\alpha_{DT}$  – portion of parallel system nodes involved for production rules extraction based on decision trees;

$N_{ARpr}$  – number of parallel system nodes involved for knowledge extraction based on associative rules;

$\alpha_{AR}$  – portion of parallel system nodes involved for knowledge extraction based on associative rules;

$N_{NSpr}$  – number of parallel system nodes involved for production rules extraction based on negative selection;

$\alpha_{NS}$  – portion of parallel system nodes involved for production rules extraction based on negative selection;

$\psi(\mu,\rho)$  – function activation of  $\rho$ -th neuron of the  $\mu$ -th layer;

$\varphi(\mu,\rho)$  – discriminator of  $\rho$ -th neuron of the  $\mu$ -th layer.

### INTRODUCTION

The synthesis of decision-making models in the development of automated non-destructive quality control systems of industrial products and non-invasive diagnostic systems in medicine is associated with the need to process data samples containing information of the values of input and output characteristics of set of instances [1–6]. However, data samples describing measurement results of the characteristics of real technical objects and processes may contain dubbing of information, in particular, redundant for decision making signs and instances [7–11]. In addition, there may be gaps in data (the absence of values of some of the measured characteristics for some instances), as well as situations in which the frequency of classes in the original sample is violated relative to the total population [12].

Therefore, prior to the synthesis of study models of objects or processes, it is expedient to reduce original data sets, extracting (and in some instances, synthesizing new ones) the most useful and valuable information in the form of a set of production rules that are convenient for human perception and interpretation. Extraction of such rules allows revealing hidden dependencies in the data, reducing the dimensionality of data, thereby increasing the level of

generalization, and also reducing the structural and parametric complexity of models synthesized on their basis.

In the works [13–16] proposed methods of extracting production rules based on decision trees [13], sets of associations [14] and negative selection [15]. The disadvantage of such methods is their serial implementation, which makes it difficult to use them when solving practical problems of large dimension. To eliminate this drawback, a parallel method for production rules extraction based on intelligent calculations has been developed, using the methods proposed in [13–16] as a basis. It provides the parallelization of the most resource-intensive operations of these methods.

For practical use of the parallel method of production rules extraction, it is necessary to use high-performance computer systems, such as clusters and graphics processors. At the same time, in order to effectively use them, it is necessary at first to estimate the used resources and predict the outcome indicators [17–19]. This allows rational use of expensive computer systems to obtain the expected result.

The purpose of the work is a construction of the model for estimation parallel computer systems resources used to solve applied problems based on the parallel method of production rules extraction.

## 1 PROBLEM STATEMENT

While estimating the amount of parallel system resources used, the important characteristics that determine effectiveness of the system application (the speed of obtaining result  $t$  and amount of used RAM  $Mem$ ) are the following parameter groups: the technical characteristics of a parallel system, the parameters of used (mathematical) software and the characteristics of the applied problem [13–16].

The main characteristics of the system that affect the time and amount of used RAM of solving the practical problem are:

- $x_1$  is a type of system *type* (cluster of CPU or GPU);
- $x_2$  is a number of processes on which problem is executed  $N_{pr}$ ;
- $x_3$  is a network bandwidth  $V$ , Gb/s.

The main parameters of used mathematical software (in this case, parallel method of production rules extraction [13–16]):

- $x_4$  is number of parallel system nodes  $\alpha_{DT}$ , involved for production rules extraction based on decision trees [13];
- $x_5$  is portion of parallel system nodes  $\alpha_{AR}$ , involved for knowledge extraction based on associative rules [14];
- $x_6$  is portion of parallel system nodes  $\alpha_{NS}$ , involved for production rules extraction based on negative selection [15, 16].

As parameters of an applied problem significantly affect the amount of used RAM and the speed of work of a parallel system for parallel method of production rules extraction, we can use:

- $x_7$  is a number of cases  $Q$  in a given training sample observations  $S$ ;
- $x_8$  is a number of features  $M$  in a variety of observations  $S$ .

Thus, to estimate the amount of used resources of parallel computer system  $Vol$  (operating time ( $t$ ) and amount of used RAM  $Mem$ ) while executing the method of production rules extraction, need to build a model of the form (1):

$$Vol = \{t, Mem\} = Vol(type, N_{pr}, V, \alpha_{DT}, \alpha_{AR}, \alpha_{NS}, Q, M), (1)$$

allowing to execute the prediction of time spent and amount of RAM used to perform the parallel method of production rules extraction depending on the characteristics of the system, the parameters of software and features of solved applied problem.

## 2 LITERATURE REVIEW

In the works [13–16] methods of extracting knowledge in the form of production rules based on decision trees, sets of associations and negative selection.

Stochastic method of extracting rules based on decision trees [13] uses the information about informativeness of features, difficulty of synthesized tree, as well as the accuracy of his recognition. This allows at the initial stage to form a set of tree structures which characterized by a simple hierarchy and a low recognition error, in the search process to create new sets of solutions, taking into account information about the significance of features and the interpretability of generated trees, which in turn provides the ability to build a decision tree with a small amount elements (nodes and links between them) and acceptable accuracy of recognition, as well as the extraction on its basis the most valuable instances.

The method of numerical associative rules extraction [14] involves preliminary splitting of values of the features into intervals (terms), taking into account the width of range of values and frequency of features falling into each of terms, uses the stochastic approach for searching various combinations of antecedents and consequents of associative rules, uses apriori information about the significance of the terms and features, that allows to process numerical information while extracting association rules, do not realize a substantial number of passages on the given base of transactions, identify rules with a high level of reliability and other criteria evaluation of their quality.

The proposed method of the synthesis of production rules on the basis of negative selection [15] for the case of the uneven distribution of instances of sample classes uses known information about instances of sample classes in the generation of a set of detectors, takes into account information about the individual significance of features, as a form of detector uses a hypercube maximum possible volume, allowing to exclude irrelevant and redundant features from the sample, thereby reducing the search space and run time of the method, as well as to form a set of detectors with high approximating and generalizing abilities.

However, the proposed in [13–16] methods based on processing data in serial mode, that limits their practical use because of presence of practical dimension threshold limit of data processed. In order to enable the processing of high dimensional data, a parallel method of production rules extraction has been developed. It is based on [13–16] serial methods. So, it is proposed to perform in a parallel mode the most resource-intensive operations of methods associated with calculating the values of the objective function, creating new sets of solutions, etc.

For practical application of the proposed method of production rules extraction based on intelligent calculations, it is necessary to develop the mathematical and computer software for estimation the amount of used resources of a parallel computer system.

**3 MATERIALS AND METHODS**

The proposed method [13–16] has been applied in a cluster of CPU and in the GPU at data processing from a public repository [20], as well as for solving practical problems [21–23]. Characteristics of processed data sets are shown in Table 1.

As a result of data processing [20–23] a training sample (2) has been formed. It has contained 1032 results of method execution, each of which has characterized by eight characteristics:

$$D = \langle X, Vol \rangle, \quad (2)$$

where  $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$ ,  $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}\}$ ,  $N = 1032$ ,  $Vol = \{t, Mem\} = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}, \{mem_1, mem_2, \dots, mem_N\}$ .

Consequently, the training sample has been formed as the table of numbers consisting of 1032 rows and 10 columns

containing values of 8 inputs and 2 outputs attributes (system’s time spent and an amount of RAM used) for each case of use of this method in a parallel system. Fragment of the training sample is given in Table 2.

To eliminate the influence of different value orders of features (attributes) to the synthesized model the normalization of attributes has been performed, i.e. bringing their range of feature values to the single interval [0;1].

As a basis for model (1) construction the feed forward neural network has been used, allowing approximate complex nonlinear dependencies with high accuracy. Model (1) was synthesized in the form of a three-layer perceptron [24, 25]. The first layer has contained four neurons, the second layer – four neurons, the third layer – two neurons (according to the number of model outputs). All neurons have had sigmoid activation function  $\psi(\varphi)$ . As a discriminant function of neurons a weighted sum has been used [25].

Table 1 – Numerical characteristics of tasks for parallel method of production rules extraction

Task					
№	Name	M	Q	Features	Output parameter
1	Recognition of motor vehicles [21]	16384	10000	integer	binary
2	Diagnosing the quality of life of patients with chronic obstructive bronchitis on the combination of used medicines [22]	95	1023	binary	binary
3	Diagnosing gas turbine aircraft engine blades by the spectra of free damped oscillations [22]	10240	318	real	binary
4	Recognition of the plant types by the spectral points [22]	55	248	real	binary
5	Construction of confectionery quality model [23]	43	956	substantial (data with gaps)	real
6	Communities and Crime [20]	128	1994	real	real
7	Parkinsons Telemonitoring [20]	26	5875	real	integer
8	Energy efficiency [20]	8	768	real	real
9	Concrete Compressive Strength [20]	9	1030	real	real
10	Forest Fires [20]	13	517	real	real

Table 2 – Fragment of the training sample

type	Feature values							Vol	
	$N_{pr}$	V	$\alpha_{DT}$	$\alpha_{AR}$	$\alpha_{NS}$	Q	M	T	Mem
0	1	20	0.2	0.3	0.5	318	10240	216.01	25.34
0	10	20	0.2	0.3	0.5	318	10240	40.98	290.67
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	3	1	0.25	0.40	0.35	318	10240	107.84	83.48
0	7	1	0.25	0.40	0.35	318	10240	52.38	198.25
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	12	20	0.1	0.30	0.6	318	10240	34.15	354.77
0	21	20	0.1	0.30	0.6	318	10240	25.47	521.72
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1	140	32	0.2	0.3	0.5	318	10240	69.99	27.33
1	240	32	0.2	0.3	0.5	318	10240	40.83	24.85
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
1	60	32	0.27	0.3	0.43	956	43	2.56	0.35
1	180	32	0.27	0.3	0.43	956	43	0.85	0.33
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	26	20	0.2	0.3	0.5	1023	95	0.78	22.75
0	32	20	0.2	0.3	0.5	1023	95	0.70	28.47
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Thus, a structure of three-layer synthesized neural model  $T_{NN}$  can be represented as follows (3):

$$\left\{ \begin{array}{l} Vol = \{\Psi(3,1)(\Phi(3,1)(w(3,1); \Psi(2))), \Psi(3,2)(\Phi(3,2)(w(3,2); \Psi(2)))\}; \\ Vol = \{T, Mem\}; \\ \Psi(2) = \{\Psi(2,1), \Psi(2,2), \Psi(2,3), \Psi(2,4)\}; \\ \Psi(2,k) = \Psi(2,k)(\Phi(2,k)(w(2,k); \Psi(1))), k = 1, 2, 3, 4; \\ \Psi(1) = \{\Psi(1,1); \Psi(1,2); \Psi(1,3); \Psi(1,4)\}; \\ \Psi(1,l) = \Psi(1,l)(\Phi(1,l)(w(1,l); X)), l = 1, 2, 3, 4. \end{array} \right. \quad (3)$$

For neural model synthesis and determining of its parameters (weights and biases of each neuron) normalized features have been fed into it inputs. The outputs are the values of parallel computer system's time spent and RAM used.

The minimum of mean square error  $MSE$  has been used as the objective function of neural model training. The acceptable level of mean square error  $10^{-4}$  has been considered.

After substituting of the obtained weighs and biases of neural network to the (3) and using the activation function and the discriminant function, the mathematical description of the synthesized neural network model (4) has been obtained. It describes the relationship between the characteristics of a parallel system, in which the method of production rules extraction is performed, the parameters of the investigated method, and the time spent and the amount of RAM used. Graphic interpretation of synthetic model is shown in Fig. 1. The value of mean square error of the synthesized model is  $1.92 \cdot 10^{-4}$ , which is acceptable for this sort of problems.

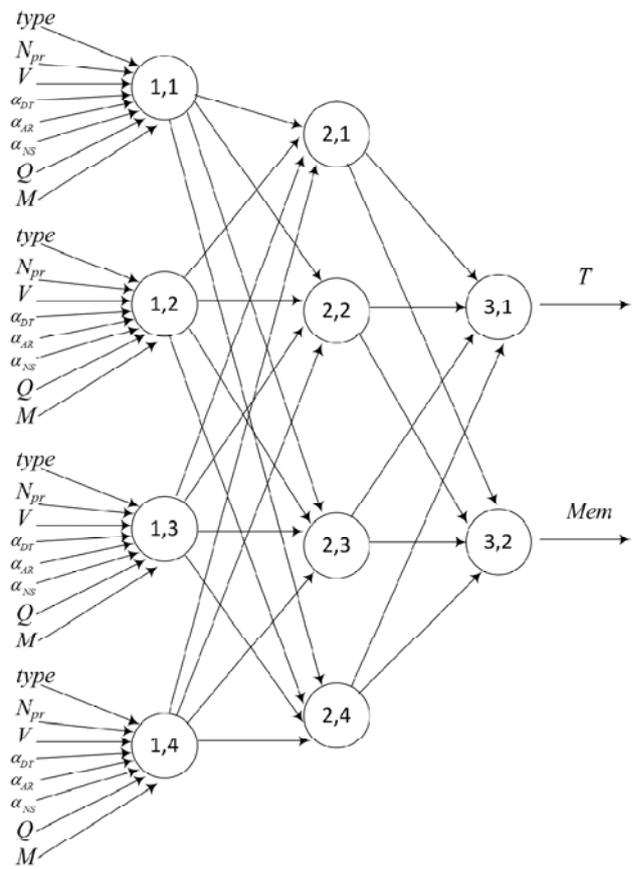


Figure 1 – Synthesized neural network model

$$\left\{ \begin{array}{l} T = \Psi(3,1) = \left( 1 + e^{-\left( 3.8484 - 0.0145\Psi(2,1) - 0.0481\Psi(2,2) + 3.9240\Psi(2,3) + 0.1388\Psi(2,4) \right)} \right)^{-1}; \\ Mem = \Psi(3,2) = \left( 1 + e^{-\left( -0.8644 + 1.2433\Psi(2,1) - 1.2925\Psi(2,2) - 0.6666\Psi(2,3) + 0.3006\Psi(2,4) \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,1) = \left( 1 + e^{-\left( -1.6567 + 3.0591\Psi(1,1) - 0.2137\Psi(1,2) + 0.2245\Psi(1,3) - 0.1405\Psi(1,4) \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,2) = \left( 1 + e^{-\left( -4.8177 + 4.9222\Psi(1,1) - 1.3346\Psi(1,2) + 1.6105\Psi(1,3) - 1.5260\Psi(1,4) \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,3) = \left( 1 + e^{-\left( -0.6787 - 6.9746\Psi(1,1) - 0.6947\Psi(1,2) + 0.7786\Psi(1,3) + 5.1166\Psi(1,4) \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(2,4) = \left( 1 + e^{-\left( -2.5299 + 1.0410\Psi(1,1) + 0.6746\Psi(1,2) + 0.2966\Psi(1,3) - 1.4787\Psi(1,4) \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,1) = \left( 1 + e^{-\left( 2.6135 + 0.3796type + 6.4181N_{pr} + 0.0043V + 0.5048\alpha_{DT} + 0.1782\alpha_{AR} + 0.5110\alpha_{NS} - 0.2267Q - 3.2789M \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,2) = \left( 1 + e^{-\left( -0.4403 + -2.1023type - 0.2210N_{pr} + 0.0748V - 0.4068\alpha_{DT} - 2.0229\alpha_{AR} + 2.8968\alpha_{NS} + 0.2301Q - 0.2039M \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,3) = \left( 1 + e^{-\left( -0.3057 + 1.6824type - 0.4436N_{pr} + 0.7853V - 1.0850\alpha_{DT} - 0.3828\alpha_{AR} + 2.6398\alpha_{NS} - 0.0768Q - 0.7402M \right)} \right)^{-1}; \\ \Psi(1,4) = \left( 1 + e^{-\left( -1.5641 + 2.3682type - 0.9614N_{pr} + 0.0142V - 0.8409\alpha_{DT} - 0.444\alpha_{AR} - 1.0934\alpha_{NS} + 0.2893Q + 2.4426M \right)} \right)^{-1}. \end{array} \right. \quad (4)$$

Thus, the constructed neural network model is a hierarchical polyalgorithmic structure containing neural-like computational elements and allows estimating resources used by a parallel computer system for production rules extraction while modeling complex objects and processes.

**4 EXPERIMENTS**

To provide the experimental researches of the proposed neural network model the following computer systems have been involved:

- the cluster of Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering NAS of Ukraine (IPME, c. Kyiv) : processors Intel Xeon 5405, RAM – 4×2 GB DDR-2 for each node, communication environment InfiniBand 20Gb/s, middleware Torque and OMPI;
- GPU NVIDIA GTX 960 1024 CUDA nodes.

During experiments the number of processes involved  $x_2$  varied from 1 to 32 for clusters and from 60 to 260 for GPUs. Network bandwidth  $x_3$  – from 1 to 20 Gb/s, portions  $\alpha_{DT}, \alpha_{AR}, \alpha_{NS}$  – from 0 to 1 (at that  $\alpha_{DT} + \alpha_{AR} + \alpha_{NS} = 1$ ), number of observations  $Q$  and number of features  $M$  – according to Table 1. To perform the experiments the software, based on C language with the MPI library [26] and CUDA [27], have been developed.

**5 RESULTS**

The results of the experiments in cluster with  $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$  are shown in fig. 2 and 3. Solid line demonstrates the actual time spent

and memory consumption during the execution of parallel method of production rules extraction [13–16]. Additionally dotted line displays predicted time spent and memory consumption while using the proposed model.

The results of the experiments in cluster with  $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$  are shown in fig.4 and fig. 5.

The results of the experiments in graphical processor with  $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.15$ ;  $\alpha_{AR} = 0.28$ ;  $\alpha_{NS} = 0.57$  are demonstrated in fig. 6 and 7.

The results of the experiments in GPU with  $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$  are displayed in fig.8 and fig. 9.

**6 DISCUSSION**

The test sample has consisted of 149 experiment results and included ones of practical tasks solutions in a parallel system, which have not been included into training set.

Figures 2–8 show task solution time and amount of used memory which have been calculated with the proposed model, are a little bit smaller compared to the actual time spent and the amount of memory used. This is due to a significant variety of memory and time spent while synchronizations and transfers of data between the cluster processors or GPU threads. At the same time, the more processes or threads has been involved, the more impact of synchronizations and transfers and the greater the deviation between actual and predicted time and memory.

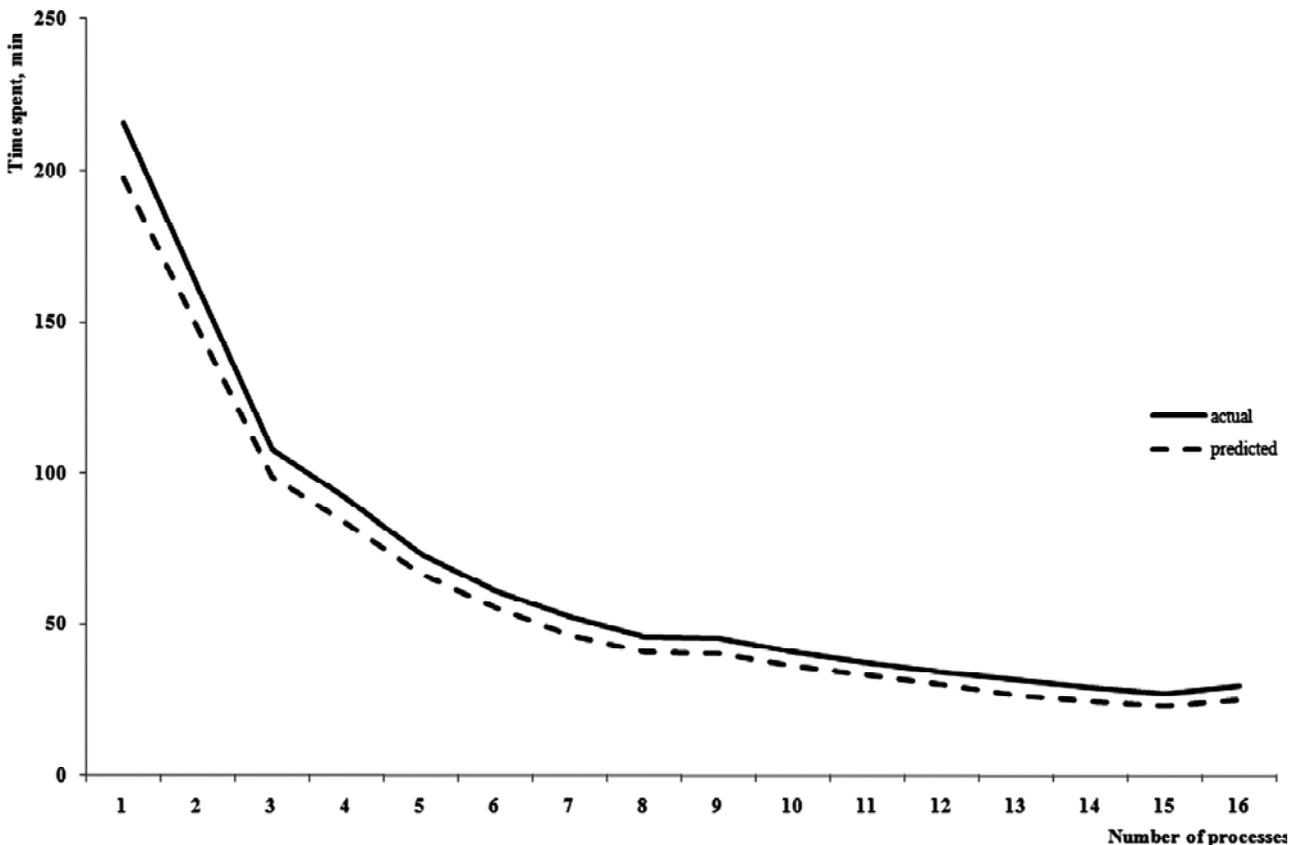


Figure 2 – Actual and predicted time spent in cluster ( $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$ )

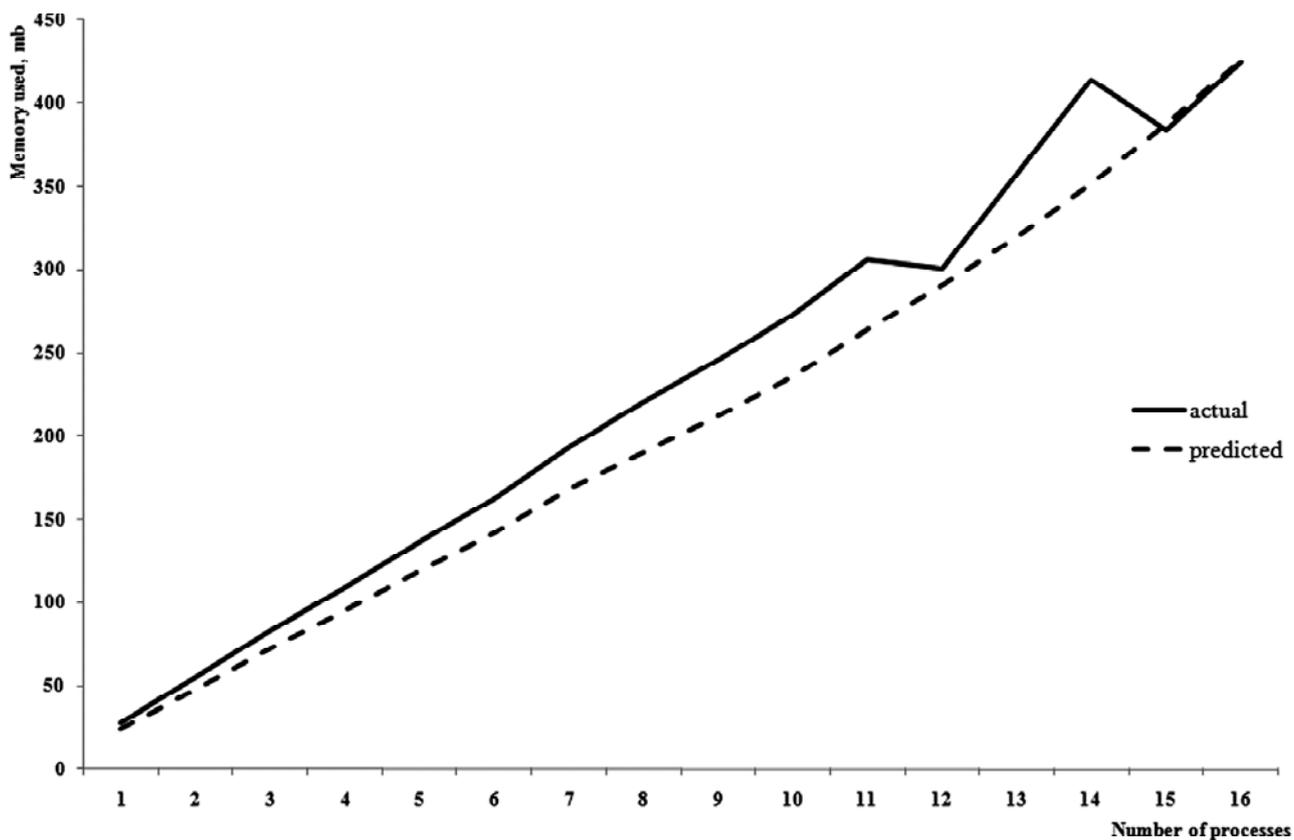


Figure 3 – Actual and predicted amount of memory consumption in cluster  
( $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$ )

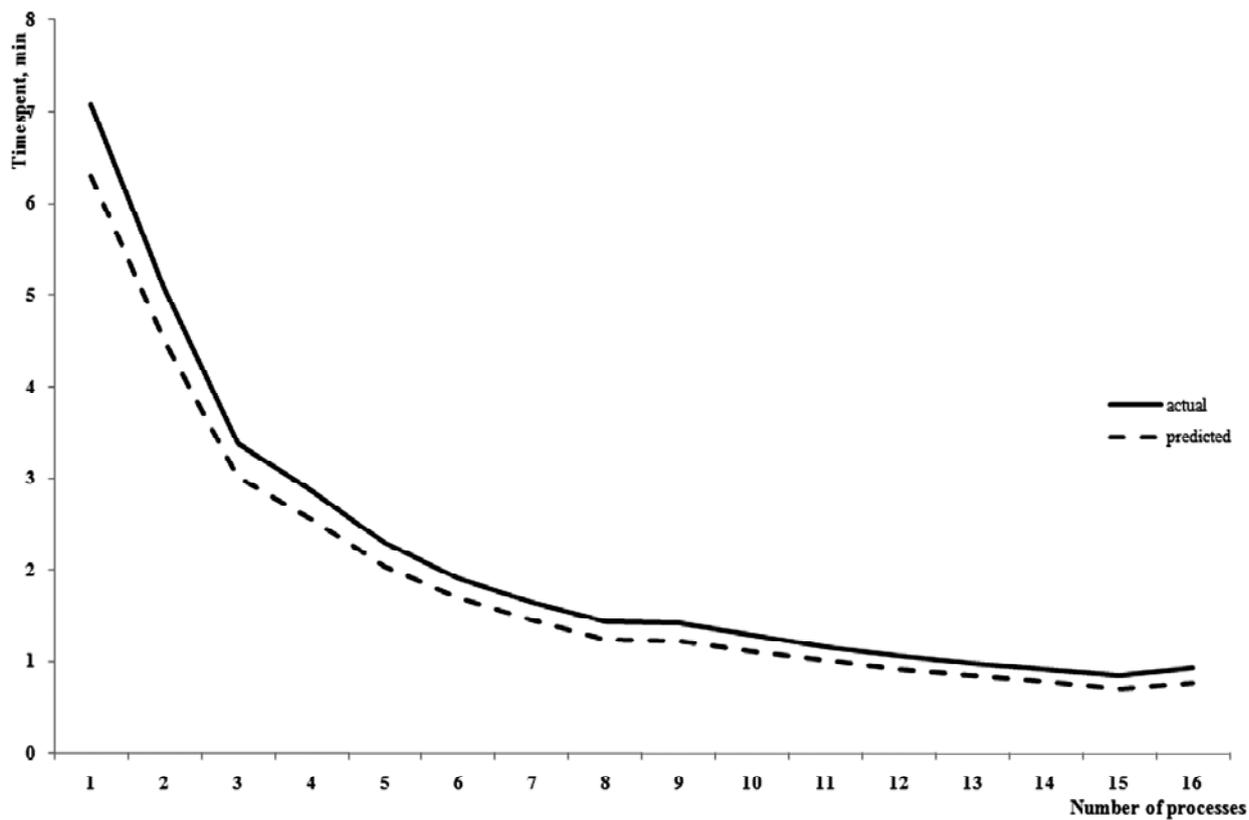


Figure 4 – Actual and predicted time spent in cluster  
( $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$ )

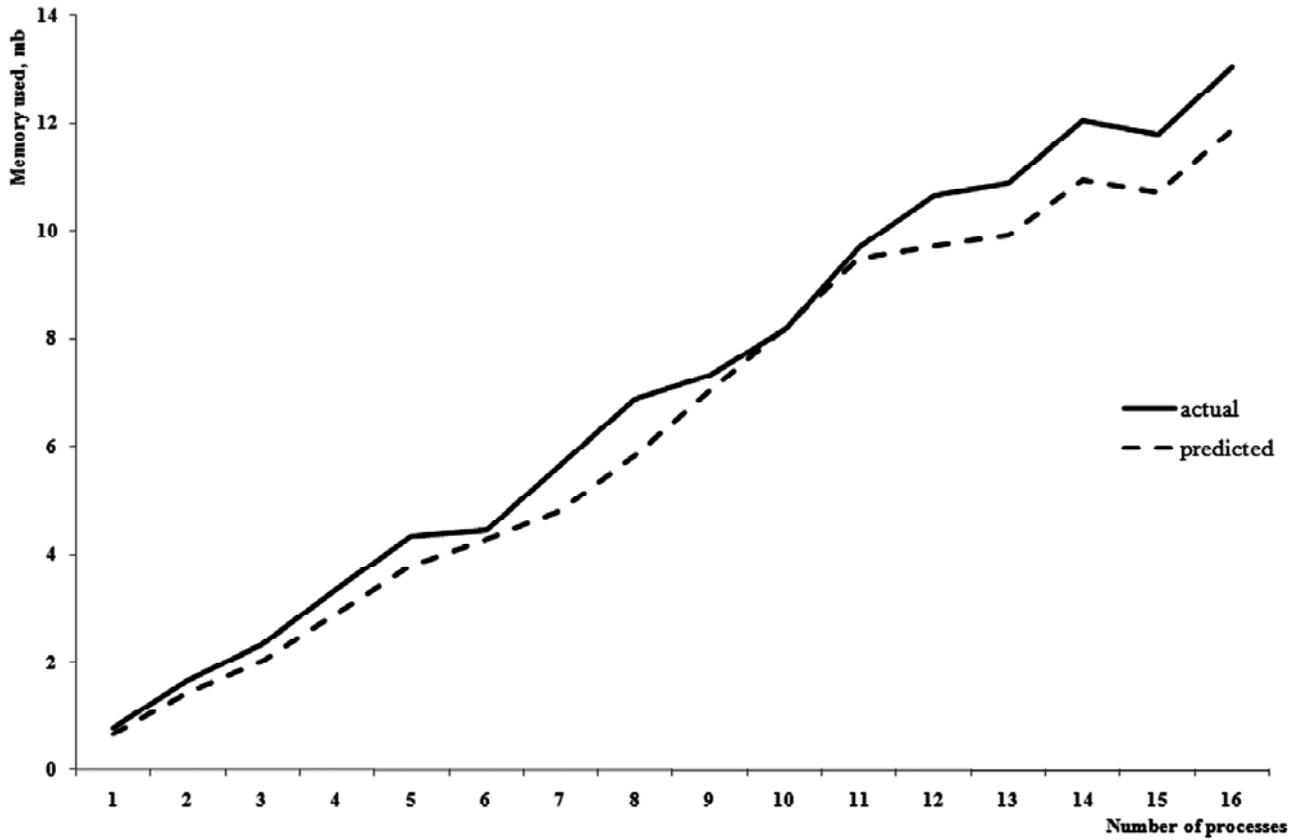


Figure 5 – Actual and predicted amount of memory consumption in cluster  
 ( $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$ )

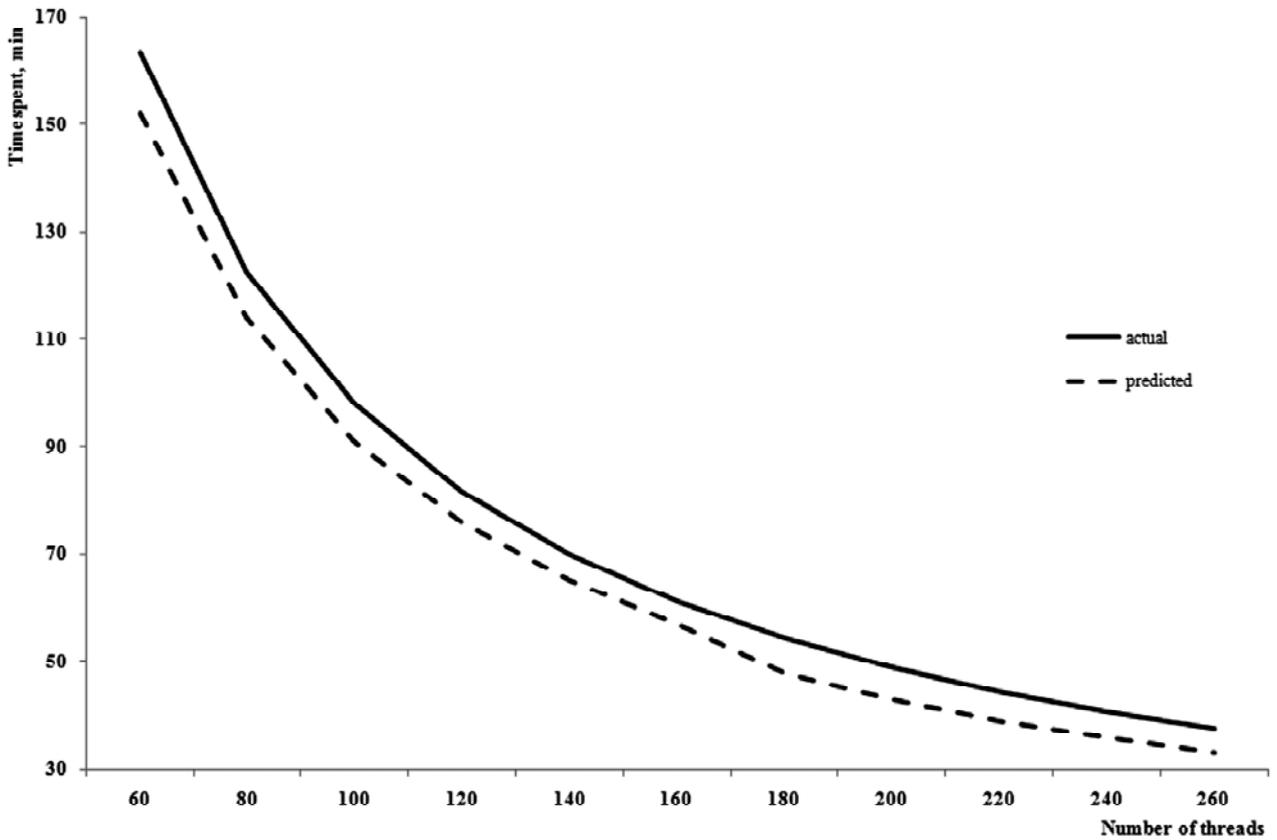


Figure 6 – Actual and predicted time spent in GPU  
 ( $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.15$ ;  $\alpha_{AR} = 0.28$ ;  $\alpha_{NS} = 0.57$ )

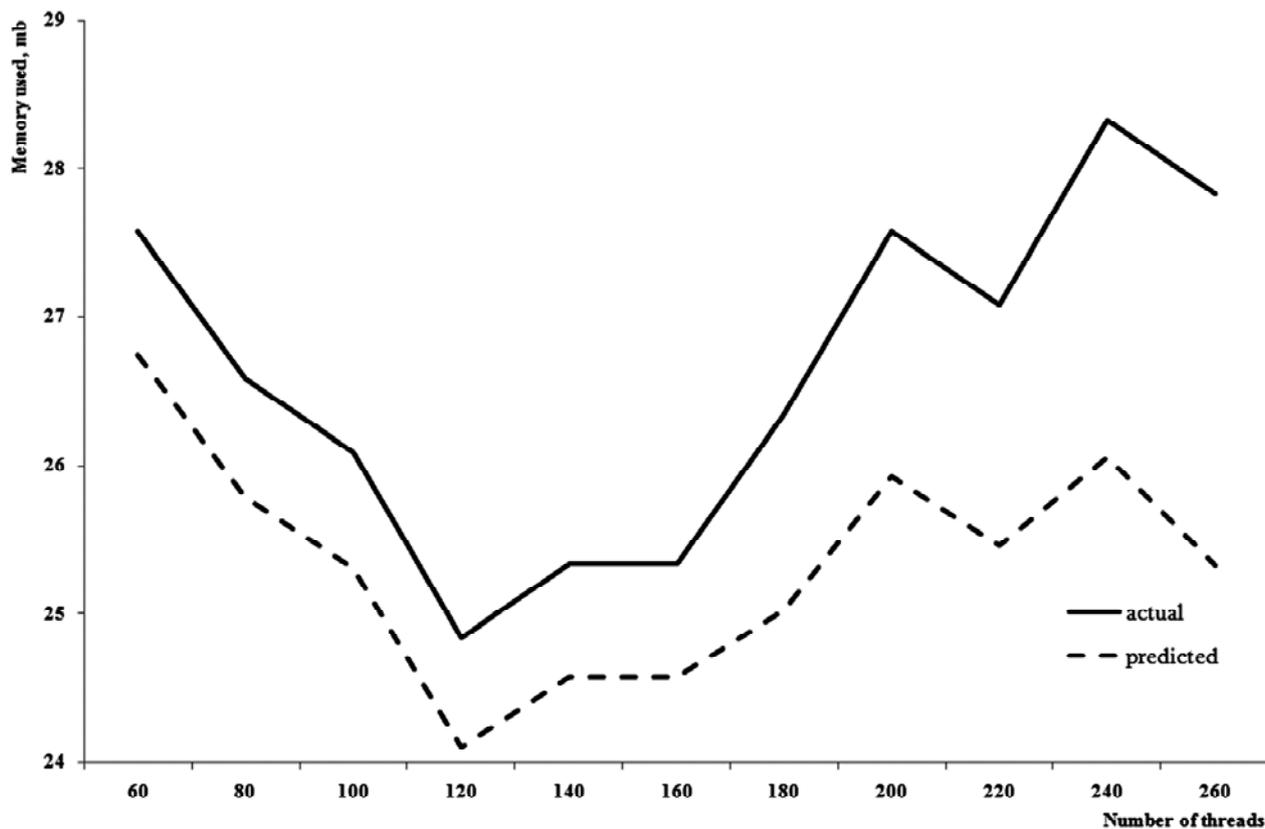


Figure 7 – Actual and predicted amount of memory consumption in GPU  
( $M=10240$ ;  $Q=318$ ;  $\alpha_{DT} = 0.15$ ;  $\alpha_{AR} = 0.28$ ;  $\alpha_{NS} = 0.57$ )

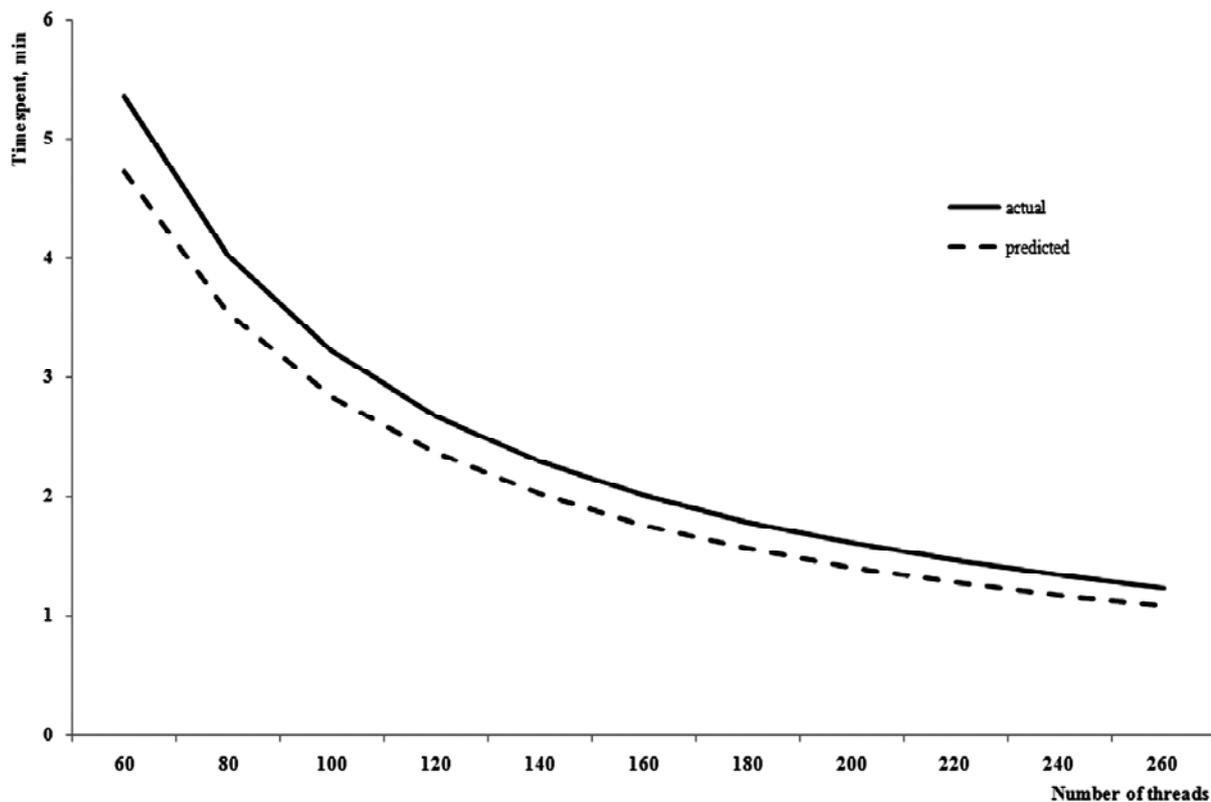


Figure 8 – Actual and predicted time spent in GPU  
( $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT} = 0.2$ ;  $\alpha_{AR} = 0.3$ ;  $\alpha_{NS} = 0.5$ )

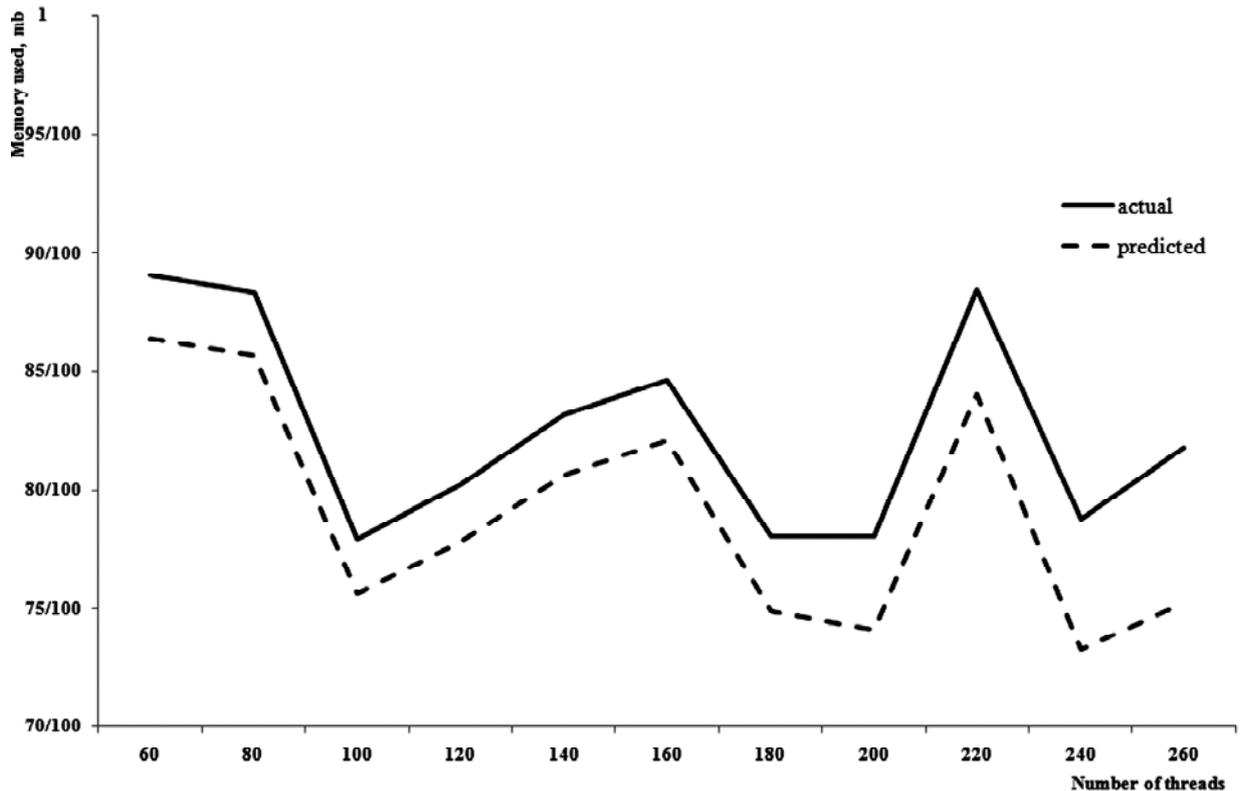


Figure 9 – Actual and predicted amount of memory consumption in GPU  
 ( $M=1023$ ;  $Q=95$ ;  $\alpha_{DT}=0.2$ ;  $\alpha_{AR}=0.3$ ;  $\alpha_{NS}=0.5$ )

Figures 3, 5, 7, 9 give evidence of the fact that GPU uses significantly less RAM in compare to cluster of CPUs while execution the parallel method of production rules extraction. This is because of data sample has been copied to a global GPU memory which is used by all threads. So there is no necessity to transfer the data to a local memory of each thread. Whereas each CPU in a cluster has its own memory pool which is inaccessible to the other CPUs, hence, each CPU has to copy a data sample to it's memory pool.

Mean square error  $MSE=2.31 \cdot 10^{-3}$  calculated for the amount of used RAM  $Mem$  is much lower than  $MSE=9.64 \cdot 10^{-2}$  calculated for time spent  $T$ . This follows from the fact that there are fewer factors which are affecting to the memory consumption process during the execution of the discussed method. Also memory consumption is a better predictable than the computational process.

Generally, both  $MSE$  values are in acceptable range, which allows recommending using the proposed model in practice.

## CONCLUSIONS

The actual task of used resources estimation of parallel computer system while extracting production rules has been solved.

Scientific novelty lies in the fact that a model for estimating the resources of a computer system used when performing a parallel method of production rules extraction has been proposed. The model takes into account the type of computer system, the amount of processors involved to solving the task and the bandwidth of data transfer network. Also the model considers parameters of used mathematical

equipment (the portions of parallel system nodes involved for production rules extraction based on decision trees, associative rules and negative selection). The parameters of solved application task are also taken into account. They are the number of observations and the number of characteristics in a given set of data describing the results of observations of the object or process being studied. The Synthesized neural model is a polyalgorithmic. It allows estimating two characteristics of parallel computer system while executing the parallel method of production rules extraction. They are the time spent and the volume of memory used.

The practical value of the results obtained lies in the developed software which implements the proposed model and allows predicting the time spent and the volume of memory used of parallel computer system while solving practice tasks in which the parallel method of production rules extraction is realized.

## ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed as part of research work "Methods and means of computational intelligence and parallel computing for processing large amounts of data in diagnostic systems" (number of state registration 0116U007419) of software tools department of Zaporizhzhia National Technical University.

## REFERENCES

1. Sobhani-Tehrani E. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach / E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani. – New York : Springer, 2009. – 265 p. – (Lecture notes in control and information sciences ; № 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.

2. Price C. Computer based diagnostic systems / C. Price. – London : Springer, 1999. – 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
3. Bodyanskiy Ye. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification / Ye. Bodyanskiy, O. Vynokurova // Information Sciences. – 2013. – Vol. 220. – P. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
4. Ukil A. Intelligent Systems and Signal Processing in Power Engineering / A. Ukil. – Berlin : Springer, 2007. – 372 p.
5. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
6. Бодяньський С. В. Послідовне нечітке кластерування на основі нейро-фаззи підходу / С. В. Бодяньський, А. О. Дейнеко, Я. В. Куценко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 30–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-4.
7. Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques / eds.: P. Melin, O. R. Castillo, E. G. Ramirez, J. Kacprzyk. – Heidelberg : Springer, 2007. – 855 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72432-2.
8. Encyclopedia of machine learning / [eds. C. Sammut, G. I. Webb]. – New York : Springer, 2011. – 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
9. Tenne Y. Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems / Y. Tenne, C.-K. Goh. – Berlin : Springer, 2010. – 800 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10701-6.
10. Duda R. O. Pattern Classification / R. O. Duda, P. E. Hart, D. G. Stork. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2000. – 680 p.
11. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing / S. Bow. – New York : Marcel Dekker Inc., 2002. – 698 c. DOI: 10.1201/9780203903896.
12. ASM handbook. – Vol. 17: Nondestructive evaluation and quality control. – Cleveland : ASM International, 1997. – 1607 p.
13. Oliinyk A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2015. – Vol. 24, № 1. – P. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
14. Oliinyk A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 419–426.
15. Diagnostic rule mining based on artificial immune systems for a case of uneven distribution of classes in sample / [S. Subbotin A. Oliinyk, V. Levashenko, E. Zaitseva] // Communications. – 2016. – Vol. 3. – P. 4–12.
16. Олійник А. О. Видобування продукційних правил на основі негативного відбору / А. О. Олійник // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 1. – С. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
17. Gebali F. Algorithms and Parallel Computing / F. Gebali. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2011. – 364 p. DOI: 10.1002/9780470932025.
18. Олійник А. О. Планування ресурсів паралельної обчислювальної системи при синтезі нейро-нечітких моделей для обробки великих даних / [А. О. Олійник, С. Ю. Скрупський, С. О. Суботін та ін.] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 4. – С. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
19. Sulistio A. Simulation of Parallel and Distributed Systems: A Taxonomy – and Survey of Tools / A. Sulistio, C. S. Yeo, R. Buyya // International Journal of Software Practice and Experience. Wiley Press. – 2002. – P. 1–19.
20. UCI Machine Learning Repository. <http://archive.ics.uci.edu/ml/>.
21. Subbotin S. A. Synthesis of neuro-fuzzy models for the allocation and detection of objects on a complex background on the two-dimensional image / S. A. Subbotin // Computer modeling and intelligent systems : proceedings of the conference. – Zaporizhzhya : ZNTU, 2007. – P. 68–91.
22. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания образов : монография / [С. А. Субботин, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман и др.]; под ред. С. А. Субботина. – Харьков : ООО «Компания Смит», 2012. – 317 с.
23. Oliinyk A. Training Sample Reduction Based on Association Rules for Neuro-Fuzzy Networks Synthesis / A. Oliinyk, T. Zaiko, S. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23, № 2. – P. 89–95. DOI: 10.3103/S1060992X14020039.
24. Bodyanskiy Ye. An evolving radial basis neural network with adaptive learning of its parameters and architecture / Ye. Bodyanskiy, A. K. Tyshchenko, A. Deineko // Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – Vol. 49, Issue 5. – P. 255–260. DOI: 10.3103/S0146411615050028.
25. Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications / K. Suzuki. – New York : InTech, 2013. – 264 p. DOI: 10.5772/3409.
26. Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP / M. J. Quinn. – New York, NY : McGraw-Hill, 2004. – 529 p.
27. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5. Santa Clara: NVIDIA Corporation, 2014. – 117 p.

Article was submitted 24.02.2017.

After revision 20.03.2017.

Олійник А. О.<sup>1</sup>, Скрупський С. Ю.<sup>2</sup>, Шкарупило В. В.<sup>2</sup>, Субботін С. О.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

<sup>3</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

#### **МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ВИКОРИСТОВУВАНИХ РЕСУРСІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ ПРИ ВИДОБУВАННІ ПРОДУКЦІЙНИХ ПРАВИЛ НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ**

**Актуальність.** Розглянуто задачу видобування продукційних правил при обробці великих масивів даних. Вирішено проблему оцінювання ресурсів комп'ютерної системи при видобуванні продукційних правил на основі паралельних обчислень. Об'єкт дослідження – процес видобування продукційних правил. Предмет дослідження – методи планування ресурсів паралельних комп'ютерних систем.

**Мета роботи** полягає в побудові моделі оцінювання ресурсів паралельних комп'ютерних систем при видобуванні продукційних правил.

**Метод.** Запропоновано модель оцінювання використовуваних ресурсів комп'ютерної системи при виконанні паралельного методу видобування продукційних правил. Синтезована модель враховує тип комп'ютерної системи, число процесів, на яких виконується задача, пропускну здатність мережі передачі даних, параметри використовуваного математичного забезпечення (частки вузлів паралельної системи, що використовуються для отримання продукційних правил на основі дерев рішень, асоціативних правил та негативного відбору, відповідно), а також параметри розв'язуваної прикладної задачі (кількість спостережень і кількість ознак в заданій множині даних, що описує результати спостережень за досліджуванним об'єктом або процесом). Синтезована нейромережева модель є поліалгоритмічною, дозволяє виконувати оцінювання двох характеристик (часу і обсягу споживаної пам'яті) паралельної системи при виконанні методу видобування продукційних правил.

**Результати.** Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропоновану модель і дозволяє прогнозувати для паралельної системи витрачений час і обсяг споживаної пам'яті при вирішенні практичних завдань.

**Висновки.** Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач обробки великих масивів даних. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в створенні паралельних методів відбору інформативних ознак, а також експериментальному дослідженні запропонованої моделі на більшому комплексі практичних задач різної природи і розмірності.

**Ключові слова:** вибірка даних, паралельні обчислення, оцінювання ресурсів, продукційні правила, нейронна мережа.

Олейник А. А.<sup>1</sup>, Скрупский С. Ю.<sup>2</sup>, Шкарупило В. В.<sup>2</sup>, Субботин С. А.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

<sup>3</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

## МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ РЕСУРСОВ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ ИЗВЛЕЧЕНИИ ПРОДУКЦИОННЫХ ПРАВИЛ НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

**Актуальность.** Рассмотрена задача извлечения продукционных правил при обработке больших массивов данных. Решена проблема оценивания ресурсов компьютерной системы при извлечении продукционных правил на основе параллельных вычислений. Объект исследования – процесс извлечения продукционных правил. Предмет исследования – методы планирования ресурсов параллельных компьютерных систем.

**Цель работы** заключается в построении модели оценивания ресурсов параллельных компьютерных систем при извлечении продукционных правил.

**Метод.** Предложена модель оценивания используемых ресурсов компьютерной системы при выполнении параллельного метода извлечения продукционных правил. Синтезированная модель учитывает тип компьютерной системы, число процессов, на которых выполняется задача, пропускную способность сети передачи данных, параметры используемого математического обеспечения (доли узлов параллельной системы, используемых для извлечения продукционных правил на основе деревьев решений, ассоциативных правил и отрицательного отбора, соответственно), а также параметры решаемой прикладной задачи (число наблюдений и число признаков в заданном множестве данных, описывающем результаты наблюдений за исследуемым объектом или процессом). Синтезированная нейросетевая модель является полиалгоритмичной, позволяет выполнять оценивание двух характеристик (времени и объема потребляемой памяти) параллельной системы при выполнении метода извлечения продукционных правил.

**Результаты.** Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную модель и позволяет прогнозировать для параллельной системы затраченное время и объем потребляемой памяти при решении практических задач.

**Выводы.** Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при обработке больших массивов данных. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в создании параллельных методов отбора информативных признаков, а также экспериментальном исследовании предложенной модели на большем комплексе практических задач разной природы и размерности.

**Ключевые слова:** выборка данных, параллельные вычисления, оценивание ресурсов, продукционные правила, нейронная сеть.

## REFERENCES

- Sobhani-Tehrani E., Khorasani K. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach. New York, Springer, 2009, 265 p. (Lecture notes in control and information sciences, No. 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.
- Price C. Computer based diagnostic systems. London, Springer, 1999, 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
- Bodyanskiy Ye., Vynokurova O. Hybrid adaptive wavelet-neuro-fuzzy system for chaotic time series identification, *Information Sciences*, 2013, Vol. 220, pp. 170–179. DOI: 10.1016/j.ins.2012.07.044.
- Ukil A. Intelligent Systems and Signal Processing in Power Engineering. Berlin, Springer, 2007, 372 p.
- Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. New York, Springer, 2006, 738 p.
- Bodyanskiy Ye. V., Deineko A. O., Kutsenko Ya. V. Sequential fuzzy clustering based on neuro-fuzzy approach, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 30–38. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-4.
- Eds. Melin P., Castillo O. R., Ramirez E. G., Kacprzyk J. Analysis and design of intelligent systems using soft computing techniques. Heidelberg, Springer, 2007, 855 p. DOI: 10.1007/978-3-540-72432-2.
- Eds. Sammut C., Webb G. I. Encyclopedia of machine learning. New York, Springer, 2011, 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
- Tenne Y., Goh C.-K. Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems. Berlin, Springer, 2010, 800 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10701-6.
- Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G. Pattern Classification. New Jersey : John Wiley & Sons, 2000. – 680 p.
- Bow S. Pattern recognition and image preprocessing. New York, Marcel Dekker Inc., 2002, 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
- ASM handbook. – Vol. 17: Nondestructive evaluation and quality control. Cleveland, ASM International, 1997, 1607 p.
- Oliinyk A., Subbotin S. A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2015, Vol. 24, No. 1, pp. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
- Oliinyk A., Subbotin S. A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, Vol. 26, No. 2, pp. 419–426.
- Subbotin S., Oliinyk A., Levashenko V., Zaitseva E. Diagnostic rule mining based on artificial immune systems for a case of uneven distribution of classes in sample, *Communications*, 2016, Vol. 3, pp. 4–12.
- Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 1, pp. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
- Gebali F. Algorithms and Parallel Computing. New Jersey, John Wiley & Sons, 2011, 364 p. DOI: 10.1002/9780470932025.
- Oliinyk A., Skrupsky S., Subbotin S., Blagodariov O., Gofman Ye. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 4, pp. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
- Sulistio A., Yeo C. S., Buyya R. Simulation of Parallel and Distributed Systems: A Taxonomy – and Survey of Tools, *International Journal of Software Practice and Experience*. Wiley Press, 2002, pp. 1–19.
- UCI Machine Learning Repository. <http://archive.ics.uci.edu/ml/>.
- Subbotin S.A. Synthesis of neuro-fuzzy models for the allocation and detection of objects on a complex background on the two-dimensional image, *Computer modeling and intelligent systems : proceedings of the conference*, Zaporizhzhya, ZNTU, 2007, pp. 68–91.
- Subbotin S. A., Oliinyk A., Gofman Ye., Zaitsev S., Oliinyk O. Intelligent information technology of automated diagnostic and pattern recognition systems development : monograph. Kharkov, “Company Smith”, 2012, 317 p. (In russian).
- Oliinyk A., Zaiko T., Subbotin S. Training Sample Reduction Based on Association Rules for Neuro-Fuzzy Networks Synthesis, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2014, Vol. 23, No. 2, pp. 89–95. DOI: 10.3103/S1060992X14020039.
- Bodyanskiy Ye., Tyshchenko A. K., Deineko A. An evolving radial basis neural network with adaptive learning of its parameters and architecture, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2015, Vol. 49, Issue 5, pp. 255–260. DOI: 10.3103/S0146411615050028.
- Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications. New York, InTech, 2013, 264 p. DOI: 10.5772/3409.
- Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. New York, NY: McGraw-Hill, 2004, 529 p.
- NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5. Santa Clara: NVIDIA Corporation, 2014, 117 p.

# УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

## УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

### CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 005.33:510.3

Бушуев С. Д.<sup>1</sup>, Веренич Е. В.<sup>2</sup>, Бушуев Д. А.<sup>3</sup>, Ярошенко Р. Ф.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой управления проектами, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры управления проектами, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедры информационных технологий, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедры управления проектами, Киевский национальный университет строительства и архитектуры, Киев, Украина

## ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ МЕНТАЛЬНОГО ПРОСТРАНСТВА ПРОЕКТА ИЛИ ПРОГРАММЫ

**Актуальность.** Ментальное пространство проекта или программы является одним из четырех ментальных пространств, входящих в широкое ментальное пространство. Процесс внедрения проекта или программы будет успешным при однозначном понимании целей, задач, ценностей, подходов, методов проектного управления у всех участников разработки и реализации проекта или программы. Это позволит сократить время и усилия на преодоление непонимания между проектным менеджером/командой проекта, окружающей средой и заинтересованными сторонами. Отсутствие однозначного понимания часто приводит к задержкам в реализации проекта или программы, а иногда и к их неукладу. В связи с этим исследование и формализация ментального пространства проекта или программы является актуальным, поскольку позволяет проектным менеджерам увидеть зависимость между различными ментальными пространствами, входящими в широкое ментальное пространство, и использовать методы и подходы влияния на ментальное пространство проекта или программы для успешной их реализации.

**Целью работы** является исследование ментального пространства проекта или программы и его взаимодействия с другими ментальными пространствами, а также разработка формализованного описания такого пространства. В статье предложено использование методов математической теории множеств для представления формализованного описания ментального пространства проекта или программы.

**Результатом** исследования является объединение содержательного представления объектов исследования, фиксация их логической структуры и исследование логических свойств данного пространства.

**Выводы.** Исследования состоят в создании и исследовании формализованной модели ментального пространства проекта или программы.

Практическая апробация полученных результатов осуществлялась на примере одного из крупнейших инвестиционных, инфраструктурных, инновационных проектов Украины «Выдача государственных актов на право собственности на землю в сельской местности и развитие системы кадастра».

**Ключевые слова:** множество, проект, программа, управление проектами, ментальное пространство, знания; ценность.

### НОМЕНКЛАТУРА

$K$  – множество знаний проектного менеджера;

$K'$  – подмножество элементов знаний множества профессиональных знаний проектного менеджера, относящихся к проекту или программе;

$K_{env}^f$  – подмножество элементов знаний из множества знаний окружающей среды;

$K_{env}^{fimp}$  – подмножество формализованных знаний

множества знаний окружающей среды в  $SP_{im}$ ;

$K_{sh+}$  – множество знаний заинтересованных сторон, касающихся проекта или программы;

$K_{shi+}^f$  – подмножество формализованных элементов множества знаний заинтересованных сторон;

$K_{shi+}^{fimp}$  – подмножество формализованных знаний множества заинтересованных сторон в  $SP_{im}$ ;

$K_r$  – подмножество элементов, формализованных проектным менеджером из множества знаний заинтересованных сторон, относящихся к проекту или программе, и множества знаний окружающей среды;

$K^p$  – подмножество элементов множества знаний проектного менеджера/команды проекта;

$MSPP$  – ментальное пространство проекта или программы;

$P$  – множество практик проектного менеджера/команды проекта;

$P^p$  – подмножество элементов множества практик проектного менеджера/команды проекта;

$S$  – множество умений проектного менеджера/команды проекта;

$S^p$  – подмножество элементов множества умений проектного менеджера/команды проекта;

$SP_{ip}$  – множество инициализации и планирования;

$SP_{ip}^p$  – подмножество состоящее из части элементов  $SP_{ip}$ ;

$SP_{imp}$  – множество реализации;

$SP_{imp}^p$  – часть элементов  $SP_{imp}$ ;

$SP_{cl}$  – множество завершения;

$V_{ip}$  – подмножество ценностей  $SP_{ip}$ ;

$V_{imp}$  – подмножество ценностей  $SP_{imp}$ ;

$V_{cl}$  – подмножество ценностей  $SP_{cl}$ ;

$V_{env}$  – подмножество ценностей окружающей среды;

$V_{pm}$  – подмножество ценностей проектного менеджера;

$V_{pp}$  – подмножество ценностей проекта или программы;

$V_{sh}$  – подмножество ценностей заинтересованных сторон;

$MBPP$  – Международный банк реконструкции и развития.

## ВВЕДЕНИЕ

Иницируя, планируя, внедряя проект или программу всегда существует желание, чтобы все процессы проходили легко, «на одном дыхании», чтобы понимание цели, ценностей, подходов, путей реализации были понятны всем, кто причастен к проекту или программе, чтобы время, потраченное на установление взаимно однозначных связей между понятиями и терминами, был минимальным.

Однако на практике такое встречается не всегда. Помехой чаще всего становится непонимание, основанное на разных знаниях и подходах к цели, целей и ценностей проекта или программы, понимании принципов проектного управления.

Помощью в решении этой проблемы может стать формирование ментального пространства проекта или программы начиная от инициализации и до завершения.

Целью статьи является исследование ментального пространства проекта или программы и разработка формализованного описания этого пространства.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Внедряя проект или программу необходимо понимать, что он/она имеют свое собственное ментальное пространство, то есть пространство, в котором существуют, трансформируются и сохраняются знания относительно проекта или программы. Успешность внедрения

проекта или программы зависит от понимания принципов формирования, наполнения и функционирования этого пространства, что позволяет снять недоразумения относительно целей, ценностей, продукта проекта или программы, подходов к внедрению, путей коммуникации и взаимодействия. Такая согласованность должна быть результатом понимания и управляемости такого ментального пространства. Обеспечить это возможно за счет исследования пространства.

Для эффективного проведения исследования ментального пространства предлагается использовать аппарат теории множеств, который позволит построить формализованную модель, с определением входящих в него множеств. Каждое множество исследуется на наполненность, мощностность, измеримость и конечность.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Среди значительного количества исследований ментального пространства особое внимание привлекает, прежде всего, работа [1], где авторы рассматривают ментальное пространство с позиции создания, преобразования и функционирования знаний. В работе [2] рассмотрена роль ментального пространства в процессе формирования конкурентно-устойчивой организации. В работе [3] рассматривается подход управления программным обществом и его ментальным пространством. Но этот подход рассмотрен только для систем инновационного развития.

В работе [4] проанализировано динамику преобразования в кооперативной сети межорганизационных знаний в существующие пространства: физическое, виртуальное и ментальное. Исследование динамики развития ментального пространства и интроформационного взаимодействия, что возникает в процессе формирования нового типа спасателя в турбулентном окружении ИТ-технологий представлено в работе [5]. В работе [6] рассматривается целенаправленное формирование ментального пространства проектной команды распределенного образовательного проекта.

Среди исследований, касающихся изучения взаимодействия ментальных пространств нельзя не отметить работу [7], в которой авторы вводят понятие смешанного пространства, структурно образуется в результате взаимодействия других пространств и при этом имеет свое собственное концептуальное существование, что позволяет ему развиваться и обрести новыми ассоциациями. В этом же ракурсе необходимо отметить работу [8], в которой проанализированы понятия «ментальная репрезентация», как внутренний (ментальный) образ или формат кодирования. В работе указано, что в информационном подходе где центральными объясняющими конструктами являются процессы кодирования и декодирования, ментальная репрезентация понимается как результат или содержание декодирования.

Исходя из того, что ментальное пространство достаточно часто рассматривается как пространство знаний, в работе [9] представлено дискриптивную сервисную модель знаний для современной проектной среды.

Можем отметить, что научных исследований общего формализованного подхода представления ментального пространства отделенного от предметной области

существует не много. В частности, [10] представлено исследование общего ментального пространства, который состоит из четырех ментальных пространств: ментальное пространство подвижного контекста, проектного менеджера/команды проекта, заинтересованных сторон и проекта или программы. Формализованные модели ментальных пространств предложенные в [11–13] разработаны только для подвижного контекста, проектного менеджера/команды проекта и заинтересованных сторон.

В данной работе предлагается расширение вышеупомянутых исследований с позиции представления формализованного описания ментального пространства именно проекта или программы без отношения к определенной предметной области.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ментальное пространство проекта или программы является одним из составляющих общего ментального пространства, в котором реализуется любой проект или программа [10].

Проект и программа [14–16] состоят из процессов создания, включающих рождение идеи и анализ; инициализации и планирования; внедрения или реализации, то есть действий направленных на имплементацию замысла в жизнь и получения продукта; и завершения, нацеленных на подготовку финальных отчетов, вывод продукта на рынок и закрытия.

В каждом из процессов участвует прямо или косвенно определенное количество лиц, которые могут быть представлена как индивидуумами, так и организациями, и которые могут быть вовлеченными в процесс непосредственно или опосредованно. Однако все они привносят в ментальное пространство проекта или программы свои знания, практики и умения, создавая тем самым новое ментальное пространство.

Согласно процессного подхода РМВоК и вышеупомянутого ментальное пространство проекта или программы будет состоять из трех множеств: множество инициализации и планирования, исполнения и множество завершения.

Формализовано ментальное пространство проекта или программы может быть в виде  $\{SP_{ip}, SP_{imp}, SP_{cl}\} \subset MSPP$ , где  $SP_{ip}$  – множество инициализации и планирования,  $SP_{imp}$  – множество реализации,  $SP_{cl}$  – множество завершения.

Исследуем каждое множество детально.

**Множество инициализации и планирования.** Проект или программа представляют собой формализованные аккумулярованные знания. Фактически, все, кто принимает участие в инициации и планировании проекта или программы, используя свои знания создают множество ментального пространства проекта или программы инициализации и планирования ( $SP_{ip}$ ). Множество  $SP_{ip}$  состоит из пяти подмножеств:

1) уже формализованных элементов множества знаний заинтересованных сторон, которые будут привнесены из множества знаний заинтересованных сторон, касающихся проекта или программы [13]. Такое подмно-

жество обозначим через  $K_{shi+}^f$  и оно будет состоять из формализованных элементов множества  $K_{shi+}$ ;

2) элементов знаний множества профессиональных знаний проектного менеджера [12], относящиеся к проекту или программе. Такое подмножество обозначим через  $K^f$  и состоять оно будет из элементов множества  $K$ , которые относятся к проекту или программе;

3) элементов знаний из множества знаний окружающей среды. Такое подмножество обозначим  $K_{env}^f$  и состоять она будет элементов множеств глобального контекста, контекста страны, контекста отрасли страны и контекста организации [11]. Отметим, что понятие «знание окружающей среды» является абстрактным, поэтому они, как таковые, не могут быть описанными. Однако, используя подход, описанные в [11], в качестве формализованных знаний могут быть рассмотрены, например, законы из подмножества законодательных воздействий множества контекста страны, а как неформализованные знания – политические тенденции в стране из подмножества политических влияний множества контекста страны;

4) элементов, формализованных проектным менеджером из множества знаний заинтересованных сторон, относящихся к проекту или программы, и множества знаний окружающей среды. Такое подмножество обозначим  $K_{tr}$  через и состоять оно будет из неформализованных элементов подмножества  $K_{shi+}$  и элементов множеств глобального контекста, контекста страны, контекста отрасли страны и контекста организации, полученных с помощью функции преобразования;

5) ценностей, которые обозначим через  $V_{ip}$ . Это подмножество включает ценности, которые принадлежат проекту или программе, а также включает подмножества ценностей заинтересованных сторон, проектного менеджера/команды проекта и окружающей среды. Обозначим эти подмножества в соответствии  $V_{pp}$ ,  $V_{sh}$ ,  $V_{pm}$ ,  $V_{env}$ , которые  $v_{pp} > 0$ ,  $v_{sh} \geq 0$ ,  $v_{pm} \geq 0$ ,  $v_{env} \geq 0$ . Это означает, что определенные ценности могут быть, а могут и не быть, однако проект или программа должны создаваться ради создания ценностей.

Формализовано множество  $SP_{ip}$  может быть представлено в виде  $\{K_{shi+}^f, K^f, K_{env}^f, K_{tr}, V_{ip}\} \subset SP_{ip}$ .

Схематически представленное множество  $SP_{ip}$  на рис. 1 отмечено серым цветом.

Мощность множества  $SP_{ip}$  не является пустым, при условии, что под мощностью понимается его материальное представление, тогда величина является измеримой и конечной. Управление таким множеством осуще-

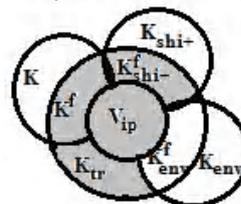


Рисунок 1 – Множество инициализации и планирования ментального пространства проекта или программы

ствляється через додавання в него нових елементів за счет формалізації неформалізованих знань заінтересованих сторін і оточуючої середовища.

**Множество реализации.** Проект или программа включается в себя не только документацию, касающуюся его/ее создания, а также и подходы относящиеся к реализации для получения продукта проекта или программы. При детальном планировании, с применением схоластического видения, документация, созданная во время инициализации и планирования будет уже содержать часть знаний относительно реализации проекта или программы. Знание проектных менеджеров будут касаться управления проектом для получения продукта проекта или программы. Знания заінтересованих сторін здесь будут присутствовать в меньшей степени. Множество  $SP_{imp}$  будет состоять из следующих подмножеств:

1) части элементов множества  $SP_{ip}$ . Это подмножество не включает все элементы множества  $SP_{ip}$ . Например, аналитические отчеты по экономическому состоянию отрасли, в которой будет реализовываться проект или программа, будут входить в множества  $SP_{ip}$ , но во множество  $SP_{imp}$  нет. Такое подмножество обозначим  $SP_{ip}^p$ . Оно будет измеримым и конечным, и его мощность будет меньше мощность множества  $SP_{ip}$ , то есть  $|SP_{ip}^p| < |SP_{ip}|$ ;

2) элементов формализованных знаний множества знаний оточуючої середовища. Такое подмножество обозначим через  $K_{env}^{fimp}$ ,  $K_{env}^f \neq K_{env}^{fimp}$ . Оно является измеримым и конечным;

3) элементов формализованных элементов множества знаний заінтересованих сторін, которые будут привнесены из множества знаний заінтересованих сторін, касающихся проекта или программы [13]. Такое подмножество обозначим через  $K_{shi+}^{fimp}$  и оно будет состоять из формализованных элементов множества  $K_{shi+}$ ,  $K_{shi+}^{fimp} \neq K_{shi+}$ . Оно является измеримым и конечным;

4) из элементов множеств знаний, практик и умений проектного менеджера/команды проекта [12], которые проектные менеджеры будут применять для реализации именно этого проекта или программы. Такие подмножества обозначим  $K^p, P^p, S^p$ ,  $K^p \subset K, P^p \subset P, S^p \subset S$ . Они также будут измеримыми и конечными.

5) ценностей. Подмножество ценностей в данном множестве может или абсолютно полностью совпадать с подмножеством ценностей  $V_{ip}$  множества  $SP_{ip}$ , или быть большим за счет создания дополнительных ценностей в процессе внедрения проекта или программы в подмножествах  $V_{pp}$ ,  $V_{sh}$ ,  $V_{pm}$ ,  $V_{env}$  или быть меньшим за счет того, что произойдут определенные рискованные события. Обозначим подмножество ценностей множества  $SP_{imp}$  через  $V_{imp}$ . Это подмножество также является измеримым и конечным.

Формализовано множество  $SP_{imp}$  может быть представлено в виде

$$\{K_{shi+}^{fimp}, K^p, K_{env}^{fimp}, S^p, P^p, SP_{ip}^p, V_{imp}\} \subset SP_{imp}.$$

Как было показано выше и в [12], все множества и подмножества, входящие в множество  $SP_{imp}$  являются измеримыми и конечными, количество элементов в них окончено, мощность равна количеству элементов.

Схематично представленное множество  $SP_{imp}$  на рис. 2 выделено серым цветом.

Управление множеством осуществляется при помощи добавления в него новых элементов за счет формализации неформализованных знаний заінтересованих сторін і оточуючої середовища.

**Множество завершения.** Процесс завершения – это процесс, когда фактически почти все знания проекта или программы из множества  $SP_{imp}$  превращаются из неформализованных в формализованные. Неформализованные знания не входят в  $SP_{cl}$ . Обозначим часть знаний множества  $SP_{imp}$ , которая входит в множество  $SP_{cl}$  через  $SP_{imp}^p$ ,  $SP_{imp}^p \subset SP_{imp}$ . Это подмножество является измеримым и конечным. Кроме того, это этап получения ценностей, запланированных и «рожденных» на предыдущих этапах, что чаще всего представляется в форме формализованных знаний. Одним из подмножеств, входящих в  $SP_{cl}$  будет подмножество ценностей, сформированное из элементов  $V_{ip}$ ,  $V_{imp}$ , но в процессе завершения последние могут быть определенным образом изменены (увеличены или уменьшены) или, даже, могут быть сформированы новые ценности. Подмножество ценностей завершения множества обозначим через  $V_{cl}$ ,  $V_{cl} > 0$ .

Это подмножество является измеримым и конечным. Таким образом, форматизировано множество  $SP_{cl}$  может быть представлено в виде  $\{SP_{imp}^p, V_{cl}\} \subset SP_{cl}$ . Такое множество будет измеримым и конечным.

Ценности, полученные в процессе завершения, будут преобразованы в знания, которые затем будут использованы при инициализации, планировании, реализации последующих проектов и программ.

Схематически представленное множество  $SP_{cl}$  отмечено на рис. 3 серым цветом.

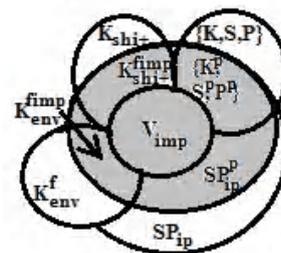


Рисунок 2 – Множество реализации ментального пространства проекта или программы

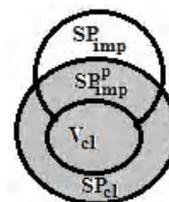


Рисунок 3 – Множество завершения ментального пространства проекта или программы

Управление этим множеством со стороны проектно-менеджера/команды проекта происходит с минимальным вмешательством, поскольку существенных инноваций или изменений привнести сюда в процессе закрытия практически не возможно.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследование было апробировано во время инициализации, реализации и завершения проекта «Выдача государственных актов на право собственности на землю в сельской местности и развитие системы кадастра» (далее – Проект) [17].

Этот Проект является одним из крупнейших инвестиционных, институциональных, инфраструктурных проектов Украины. Финансирование осуществлялось за средства Международного банка реконструкции и развития (далее – МБРР) и государства Украины (на первых этапах). Проект реализовывался в период с 2004–2013 гг. Целью проекта было создание государственного кадастра и системы регистрации прав собственности на землю, передача на справедливой основе земельных участков частным лицам в сельской местности, введение прав собственности путем выдачи государственных актов на право собственности на землю и поддержка реформирования хозяйств в более эффективные структуры, уделяя при этом должное внимание превентивным экологическим и социальным мероприятиям.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Представим Проект в соответствии с вышеприведенным исследованием:

1) множество инициализации и планирования.

– подмножество  $K_{shi+}^f$  – использовались шаблоны документов МБРР для инициализации и планирования проектов;

– подмножество  $K^f$  – Проект готовился при поддержке профессиональных проектных менеджеров из МБРР, Украина предоставила специалистов в области земельных ресурсов, для подготовки необходимой информации и проектных документов, согласно представленным шаблонам;

– подмножество  $K_{env}^f$  – законодательные и подзаконные акты государства Украины, нормативно-правовые акты, регулирующие земельные отношения в Украине; аналитические отчеты о состоянии и паевании сельскохозяйственный земель в Украине;

– подмножество  $K_{tr}$  – ситуация на рынке подготовки специалистов для работы в сфере земельных отношений; состояние картографической основы для создания системы кадастра; проведение социологического опроса касательно ожиданий сельского населения от паевания сельскохозяйственных земель и их дальнейшего использования; инфраструктурное положение в государстве по внедрению автоматизированной информационной системы земельного кадастра и регистрации прав;

– подмножество  $V_{ip}$  – основной ценностью была передача большинства земель сельскохозяйственного назначения в частную собственности через регистрацию в защищенной системе регистрации земель. В свою оче-

редь ценность подмножества  $V_{pp}$  – создание защищенной информационной системы учета земель и прав на нее на территории всего государства; для подмножества  $V_{sh}$  – получение обновленной картографической основы на территорию всего государства; информированность сельского населения по вопросам земельной реформы; повышение профессионального уровня специалистов в области земельных отношений; выдача государственных актов на право собственности на землю сельским землевладельцам; для подмножества  $V_{rm}$  – опыт внедрения проектов такого уровня на территории государства; для подмножества  $V_{env}$  – создание основы для подготовки новых законов или поправок к ним, которые стимулируют развитие рынка земли.

2) множество реализации:

– подмножество  $SP_{ip}^p$  – проектные документы были подготовлены двумя пакетами: первый пакет был включен в Соглашение о Займе между Украиной и МБРР; второй пакет был включен в пул документов по оценке проекта;

– подмножество  $K_{env}^{fimp}$  – изменения в подзаконных актах, регулирующих земельные отношения; изменения в налоговом законодательстве; изменения в бюджетной сфере страны; изменения в Соглашение о Займе, принятие Закона о Государственном земельном кадастре; принятие распоряжений Кабинета Министров Украины, финансовая ситуация государства в период мирового финансового кризиса 2008 года;

– подмножество  $K_{shi+}^{fimp}$  – отчетные формы государственных органов власти; отчетные формы МБРР; социологические опросы по вопросам земельных отношений; требования вузов, готовящих специалистов для сферы земельных ресурсов, касательно программного и аппаратного обеспечения процесса обучения;

– множества  $K^p, P^p, S^p$  – повышение профессионального уровня за счет решения сложных текущих проектных задач по внедрению проекта в турбулентной среде (8 смен руководства организации бенефициара; отсутствие в течение 9 лет законодательной базы касающейся создания, функционирования, расположения и использования автоматизированной информационной кадастровой системы);

– подмножество  $V_{ip}$  – основная ценность была трансформирована в (i) проведение приватизации земель государственных и коллективных сельскохозяйственных предприятий, путем передачи им сотрудникам этих предприятий земельного участка (пая); (ii) отвод в натуре (на местности) земельных участков (паев) и выдачи государственных актов на право собственности на землю; и (iii) создании системы земельного кадастра. В свою очередь ценность подмножеств этого подмножества были дополнены и/или изменены: подмножество  $V_{pp}$  – изменен на создание только автоматизированной системы государственного земельного кадастра на всей территории государства вместо автоматизированной системы регистрации прав недвижимого имущества; подмножество  $V_{sh}$  – дополнено повышением уровня квалификации преподавателей, готовящих специалистов для сферы земель-

ных ресурсов; обновлением материально-технической базы органов земельных ресурсов; информированием всех получателей государственных актов о их права на собственность и пользование земельными участками, а также юридические процедуры, связанные с владением и арендой земельных участков; подмножество  $V_{rm}$  – не изменилась; подмножество  $V_{env}$  – получение автоматизированной системы управления земельным кадастром.

3) множество завершения:

– подмножество  $SP_{imp}^P$  – отчетные формы государственных органов власти и МБРР;

– подмножество  $V_{cl}$  – расширено ценностью касающейся перехода на более высокую ступень во всемирном рейтинге легкости ведения бизнеса за счет внедрения продукта Проекта и создании на его основе информационного ресурса «Публичная кадастровая карта Украины» [18].

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Как показано на примере Проекта, применение разработанной формализованной модели позволяет проектному менеджеру/команде проекта формировать ментальное пространство Проекта. Понимание подходов относительно его создания и функционирования на различных этапах жизненного цикла Проекта позволило создать доверительную рабочую атмосферу и достичь поставленной цели. Учитывая тот факт, что Проект мог быть закрыт, не достигнув своей цели, применение результатов исследования позволили не только не закрыть Проект, а завершить его с положительной оценкой со стороны МБРР. Внедрение продукта позволило Украине подняться на 28 позиций со 140 места на 112 место в рейтинге легкости ведения бизнеса (Doing Business), который был подготовлен МБРР в 2014 году [19].

Кроме того, представленное исследование может быть положено в основу разработки моделей оценки и управления ментальными пространствами проектов и программ.

## ВЫВОДЫ

Ментальное пространство проекта или программы является одним из пространств общего ментального пространства. Знания, умения, практики аккумулируются в не только в ментальном пространстве самого проектного менеджера, заинтересованных сторон или окружающей среды, но и в ментальном пространстве, что принадлежит проекту или программе. Эти знания, практика и умение проектного менеджера/команды проекта создают в этом пространстве новое множество – множество ценностей проекта или программы. Это множество является «кирпичиками» развития ментального пространства как проектного менеджера, так и заинтересованных сторон и окружающей среды.

Исследование ментального пространства проекта или программы позволяет понять, какие множества входят в него, из каких элементов они состоят и каким образом они трансформируются в новые элементы и множества. Попытка формализации такого ментального пространства позволяет смоделировать само пространство, ис-

следовать его составляющие и взаимосвязи с другими ментальными пространствами.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках реализации проекта «Выдача государственных актов на право собственности на землю в сельской местности и развитие системы кадастра» (Соглашение о займе между Украиной и МБРР №4709-UA от 17.10.2003).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нонака И. Компания – создатель знания. Зарождение и развитие инноваций в японских фирмах / И. Нонака, Х. Такеучи. – Н.-Й. : Оксфорд Юниверсити Пресс, 1995. – 384 с.
2. Куценко М. Н. Формирование ментального пространства и создание сетей знаний в программах инновационного развития / М. Н. Куценко // Управління розвитком складних систем. – 2011. – № 8. – С. 28–34.
3. Бушуев С. Д. Формирование ментального пространства программ инновационного развития / С. Д. Бушуев, Р. Ф. Ярошенко, Н. Ярошенко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 1, № 5(49). – С. 4–7. – Режим доступа: <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/1966/1861>
4. Caldas P. T. Inter-Organizational Knowledge Conversion and Innovative Capacity in Cooperative Networks / P. T. Caldas, G. A. Svndido // Journal of Technology Management & Innovation. – 2013. – Vol. 8. – P. 104–114. DOI: 10.4067/s0718-27242013000300009
5. Буряк Н. С. Модель проектно-інформаційного середовища покращення підготовки рятувальника в ментальному просторі IT-технологій / Н. С. Буряк, Ю. П. Рак // Вісник ЛДУ БЖД. – 2014. – № 10. – С. 24–31.
6. Boychenko G. N. Organization culture of distributed education project in personality's mental space development / G. N. Boychenko, L. I. Gurevich, L. I. Kundozerovala // European Journal of Natural history. – 2008. – Vol. 2. – P. 90–92.
7. Turner, M. Conceptual Integration and Formal Expression / M. Turner, G. Fauconnier // Journal of Metaphor and Symbolic Activity. – 1995. – Vol. 10, No. 3. – P. 183–204.
8. Ментальная репрезентация [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://epistemology\\_of\\_science.academic.ru/](http://epistemology_of_science.academic.ru/)
9. Hoffman, J. B. R.E.A.L. Knowledge at NASA. A Knowledge Service Model for the Modern Project Environmental [Electronic resource] / J. B. Hoffman (Eds.). – Access mode: <http://www.pmi.org/ebooks/real-knowledge-nasa.pdf>
10. Веренич О. В. Концептуальна модель формування ментального простору / О. В. Веренич // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 23. – С. 39–43.
11. Веренич О. В. Розробка та впровадження формалізованої моделі ментального простору оточуючого середовища проекту чи програми / О. В. Веренич // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2016. – Т. 2, № 4(80). – С. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65635.
12. Веренич О. В. Формалізована модель ментального простору проектного менеджера/команди проекту / О. В. Веренич // Управління розвитком складних систем. – 2015. – № 24. – С. 23–29.
13. Веренич О. В. Формалізована модель ментального простору зацікавлених сторін / О. В. Веренич // Управління розвитком складних систем. – 2016. – № 26. – С. 58–66.
14. Руководство к Своду знаний по управлению проектами (Руководство РМВОК) 5-е издание. – Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, Inc., 2013. – 589 с.
15. Systems and software engineering. Vocabulary: ISO/IEC/IEEE 24765:2010. — [Effective form 2016-07-08]. – Geneva: ISO, 2016. – 410 p.

16. Руководство по управлению инновационными проектами и программами организаций : монография / пер. под ред. Ф. А. Ярошенко. – К. : Украинская ассоциация управления проектами, 2011. – Т.1, Версия 1.2.
17. Implementation completion and results report on a loan to Ukraine for a Rural land Titling and Cadastre Development Project [Electronic resource]. – Access mode: <http://www-wds.worldbank.org/>
18. Публічна кадастрова карта України [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://map.land.gov.ua/kadastrova-karta>
19. Рейтинг Doing Business-2014: Украина взлетела на 28 позиций, но в топ-100 не вошла (обновлено) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://podrobnosti.ua/938930-rejting-doing-business-2014-ukraina-vzletela-na-28-pozitsij-no-v-top-100-ne-voshla-obnovleno.html>

Статья поступила в редакцию 06.12.2016.  
После доработки 23.12.2016.

Бушуєв С. Д.<sup>1</sup>, Веренич О. В.<sup>2</sup>, Бушуєв Д. А.<sup>3</sup>, Ярошенко Р. Ф.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедрою управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедри інформаційних технологій, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

<sup>4</sup>Канд. техн. наук, докторант кафедри управління проектами, Київський національний університет будівництва та архітектури, Київ, Україна

#### ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ МЕНТАЛЬНОГО ПРОСТОРУ ПРОЕКТУ ЧИ ПРОГРАМИ

**Актуальність.** Ментальний простір проекту чи програми є одним з чотирьох ментальних просторів, який входить у широкий ментальний простір. Процес впровадження проекту чи програми буде успішним при однозначному розумінні мети, цінностей, підходів, методів проектного управління у всіх учасників розробки та реалізації проекту чи програми. Це дозволить зменшити час та зусилля на подолання непорозумінь між проектним менеджером/командою проекту, оточуючим середовищем та зацікавленими сторонами. Відсутність однозначного розуміння часто призводить до затримки в реалізації проекту чи програми, а іноді й до їх неуспіху. У зв'язку з цим дослідження та формалізація ментального простору проекту чи програми є актуальною проблемою, оскільки дозволяє проектним менеджерам побачити залежність між різними ментальними просторами, які входять у широкий ментальний простір, та використати відповідні методи та підходи впливу на ментальний простір проекту чи програми задля успіху їх впровадження.

**Метою роботи** є дослідження ментального простору проекту чи програми та його взаємодії з іншими ментальними просторами, а також розробка формалізованого опису цього простору. У статті запропоновано використання методів математичної теорії множин для формалізованого опису ментального простору проекту чи програми.

**Результатом** дослідження є об'єднання змістовного представлення об'єктів дослідження, фіксація їх логічної структури та дослідження логічних властивостей даного простору.

**Висновки.** Наукова новизна дослідження полягає у створенні та дослідженні формалізованої моделі ментального простору проекту чи програми.

Практична апробація отриманих результатів здійснювалась на прикладі одного з найбільших інвестиційних, інституційних, інфраструктурних проектів України «Видача державних актів на право власності на землю у сільській місцевості та розвиток системи кадастру».

**Ключові слова:** множина, проект, програма, управління проектами, ментальний простір, знання, цінність.

Bushuyev S. D.<sup>1</sup>, Verenyich O. V.<sup>2</sup>, Bushuyev D. A.<sup>3</sup>, Jaroshenko R. F.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Dr.Sc., Professor, Head of Project Management Chair, Kyiv National University of Constructional of Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor, Professor of Project Management Chair, Kyiv National University of Constructional of Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Ph.D., Doctorant of Informational Technologies Chair, Kyiv National University of Constructional of Architecture, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>Ph.D., Doctorant of Project Management Chair, Kyiv National University of Constructional of Architecture, Kyiv, Ukraine

#### FORMAL MODEL OF PROJECT OR PROGRAM MENTAL SPACE

**Context.** A project or program mental space is one of the four mental spaces that are included in the wide mental space. A process of project or program implementation will be successful if the understanding of the purpose, values, approaches, project management methods are unambiguous for all participants of project or program creation and implementation. It allows reducing the time and effort to overcome misunderstandings between the project manager/project team, movable context, and stakeholders. A lack of unambiguous understanding often lead to troubles in project or program implementation, sometimes it can lead to failure in project or program implementation. The research and formalization of project or program mental space are timely. It allows project managers to see dependence between different mental space that are included in the wide mental space and to use methods and technics for influence on the project or program mental space for successful their implementation.

**The Objective** of the work is to study the mental space of the project or program and its interaction with other mental space, and the development of formalized description of this space. In the paper, **the methods** of the mathematical set theory are used for presentation of project or program formalized description.

**The result** is a combination of a content-related representation of the research objects, fixing their logical structure and investigation of the logical properties of the space.

**Conclusions.** The study originality is creation and research of formalized model of project and program mental space.

The practical improvement of the study was realized in the example of the project «Rural Land Titling and Cadaster System Development». It was the one of the biggest investment, an institutional and infrastructural project in Ukraine.

**Keywords:** set, project, program, project management, mental space, knowledge, value.

## REFERENCES

1. Nonaka I., Takeuchi H. The knowledge – creating company. How Japanese companies create the dynamics of innovation. NY, Oxford University Press, 1995, 384 p.
2. Kutsenko, M. Mental space formation and network knowledge creation in innovation programs development. *Management of Development of Complex Systems*, 2011, No. 8, pp. 28–34.
3. Bushuyev S. D., Yaroshenko R. F., Yaroshenko N. F. Mental space formation of innovation development, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2011, No. 1/5 (49), pp. 4–7. Available at: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/1966/1861>
4. Caldas P. T., Cwindido G. A. Inter-Organizational Knowledge Conversion and Innovative Capacity in Cooperative Networks, *Journal of Technology Management & Innovation*, 2013, Vol. 8, pp. 104–114. DOI: 10.4067/s0718-27242013000300009
5. Buriak, N. Ye., Rak Yu. P. Model proektno-informatsiinogo seredovishcha pokrashchennia pidgotovky riaduvnykh v mentalnomu prostori IT-tehnologii, *Visnyk LDU BZHD*, 2014, No. 10, pp. 24–31.
6. Boychenko G. N., Gurevich L. I., Kundozerova L. I. Organization culture of distributed education project in personality's mental space development, *European Journal of Natural history*, 2008, No. 2, pp. 90–92.
7. Turner M., Fauconnier G. Conceptual Integration and Formal Expression, *Journal of Metaphor and Symbolic Activity*, 1995, Vol. 10, No. 3, pp. 183–204.
8. Mental representation [Electronic resource]. Access mode: [http://epistemology\\_of\\_science.academic.ru](http://epistemology_of_science.academic.ru)
9. Hoffman J. B. (Eds.) R.E.A.L. Knowledge at NASA. A Knowledge Service Model for the Modern Project Environmental [Electronic resource]. Access mode: <http://www.pmi.org/ebooks/real-knowledge-nasa.pdf>
10. Verenysh O. V. Conceptual model of mental space formation, *Management of Development of Complex Systems*, 2015, Vol. 23, pp. 39–43.
11. Verenysh O. V. Development and implementation of formalized model of mental space of project or program environmental, *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 2016. – Vol. 2/3 (80), pp. 21–31. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.65635
12. Verenysh O. V. Formalizovana model mentalnogo prostory menedzera/komandy proekty, *Management of Development of Complex Systems*, 2015, Vol. 24, pp. 23–29.
13. Verenysh, O., V. Formalizovana model mentalnogo prostory zatsikavlenyh storig, *Management of Development of Complex Systems*, 2016, Vol. 26, pp. 58–66.
14. A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide, 5th ed.). Newtown Square, PA, USA: Project Management Institute, 2013. – 589 p. ISBN 978-1935589679
15. Systems and software engineering. Vocabulary: ISO/IEC/IEEE 24765:2010. – [Effective form 2016-07-08]. Geneva: ISO, 2016, 410 p.
16. Rukovodstvo po upravleniyu innovatsionnymi proektami I programmami : monografia. Perevod na russkiy yazyk pod redactsyey Dr., prof. Jaroshenko F. A. Kiev, Ukrainskaya assotsiatsia upravlenia proektami, 2011, V.1, Version 1.2.
17. Implementation completion and results report on a loan to Ukraine for a Rural land Titling and Cadastre Development Project [Electronic resource]. Access mode: <http://www-wds.worldbank.org/>
18. Publichna kadastrava karta Ukrainy [Electronic resource]. Access mode: <http://map.land.gov.ua/kadastrava-karta>
19. Reiting Doing Business-2014: Ukraina vzletela na 28 pozitsii, no v top-100 ne voshla (obnovleno) [Electronic resource]. Access mode: <http://podrobnosti.ua/938930-rejting-doing-business-2014-ukraina-vzletela-na-28-pozitsij-no-v-top-100-ne-voshla-obnovleno.html>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерной математики и математического моделирования Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

## ПОДАВЛЕНИЕ «ЭФФЕКТА ХЛЫСТА» В ЦЕПЯХ ПОСТАВОК С ПОМОЩЬЮ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ИНВАРИАНТНЫХ ЭЛЛИПСОИДОВ

**Актуальность.** Решена актуальная задача синтеза децентрализованного управления запасами материальных ресурсов в цепях поставок в условиях неопределенности внешнего спроса и наличия эксплуатационных ограничений.

**Цель работы.** Развитие метода оптимальной стабилизации локальных узлов цепей поставок с помощью линейной динамической обратной связи по отклонению между наличными и страховыми уровнями запасов ресурсов в узлах цепи, обеспечивающего подавление «эффекта хлыста», а также развитие метода анализа устойчивости децентрализованной системы управления запасами в цепях поставок.

**Метод.** Предложен подход на основе метода инвариантных эллипсоидов, который обеспечивает полное и своевременное удовлетворение неизвестного, но ограниченного внешнего спроса на ресурсы, стабилизацию замкнутых локальных подсистем при выполнении заданных ограничений на значения локальных состояний и управляющих воздействий, а также подавление «эффекта хлыста» в цепях поставок. С помощью метода векторных функций Ляпунова и метода сравнения установлены условия устойчивости децентрализованной системы управления запасами в цепях поставок.

**Результаты.** Задача синтеза управления с помощью техники линейных матричных неравенств сведена к последовательности задач полуопределенного программирования, которые решаются численно в реальном времени.

**Выводы.** Получил дальнейшее развитие метод субоптимального структурного и параметрического синтеза децентрализованного ограниченного управления запасами в цепях поставок, что позволяет снизить затраты, связанные с транспортированием и хранением материальных ресурсов за счет подавления «эффекта хлыста»; степень подавления указанного эффекта для различных эшелонов цепи поставок определяется выбором значений весовых матриц локальных критериев качества. Разработанные модели и алгоритмы децентрализованного управления запасами в условиях неопределенности спроса и наличия эксплуатационных ограничений внедрены на промышленных предприятиях и организациях, которые занимаются производством, хранением и распределением материальных ресурсов, в частности, КП «Харьковводоканал» - одним из крупнейших в Украине предприятий по предоставлению услуг водоснабжения и ООО Компании «СВ» (г. Харьков) – ведущем производителе средств бытовой химии в Украине.

**Ключевые слова:** управление запасами, эффект хлыста, децентрализованное управление, метод инвариантных эллипсоидов, линейное матричное неравенство.

### НОМЕНКЛАТУРА

«+» – псевдообращение Мура-Пенроуза;

$> 0$  ( $\geq 0$ ) – положительно определенная (полуопределенная) матрица;

$O_{n \times n}$  – нулевая матрица соответствующей размерности;

$A_i$  – матрица динамики расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$B_i$  – матрица влияния управлений расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$B_{it}$  – матрицы влияния управлений исходной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$C_i$  – матрица выходов расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$D$  – допустимое множество значений внешних возмущений цепи поставок;

$E_i$  – матрица влияния возмущений исходной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$G_i$  – матрица влияния возмущений расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$I_n$  – единичная матрица соответствующей размерности;

$J_i(k)$  – критерий качества  $i$ -го узла цепи поставок;

$K_i(k)$  – нестационарная матрица коэффициентов обратной связи  $i$ -го узла цепи поставок;

$N$  – количество узлов цепи поставок;

$N_i$  – размерность вектора состояний расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$P_i(k)$  – нестационарная матрица функции Ляпунова  $i$ -го узла цепи поставок;

$U_i$  – допустимое множество значений управлений  $i$ -го узла цепи поставок;

$W_i^{\xi}, W_i^{\mu}$  – диагональные весовые матрицы локального критерия качества;

$X_i$  – допустимое множество значений состояний  $i$ -го узла цепи поставок;

$d^{\min}, d^{\max}$  – векторы нижних и верхних граничных значений внешнего спроса;

$d(k)$  – вектор внешних возмущающих воздействий цепи поставок;

$e_m$  – единичный вектор соответствующей размерности;

$k$  – номер дискретного интервала времени;

$m$  – среднее значение размеров заказов;

$m_i$  – размерность вектора управляющих воздействий  $i$ -го узла цепи поставок;

$n_i$  – размерность вектора состояний  $i$ -го узла цепи поставок;

$u_i(k)$  – вектор управляющих воздействий  $i$ -го узла цепи поставок;

$q$  – размерность вектора внешних возмущений цепи поставок;

$x_i^*$  – вектор страховых запасов ресурсов  $i$ -го узла цепи поставок;

$x_i^{\max}$  – вектор граничных значений состояний  $i$ -го узла цепи поставок;

$x_i(k)$  – вектор состояний исходной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

$w_i(k)$  – вектор внешних возмущений  $i$ -го узла цепи поставок;

$\Pi_i$  – матрица влияния внешнего спроса на вектор состояний  $i$ -го узла цепи поставок;

$\Pi_{ij}$  – технологические матрицы  $i$ -го узла цепи поставок;

$\Phi(k)$  – нестационарная матрица динамики линейной системы сравнения;

$\Lambda_i$  – максимальное значение интервалов запаздывания  $i$ -го узла цепи поставок;

$\beta \in [0,1]$  – коэффициент дисконтирования;

$\varepsilon$  – малая положительная константа;

$\rho_{S,C}$  – количественная мера проявления «эффекта хлыста» в цепи поставок;

$\sigma^2$  – дисперсия значений размеров заказов;

$v(k)$  – вектор состояний линейной системы сравнения;

$\eta(k)$  – скалярная функция, которая является выходом линейной системы сравнения;

$\xi_i(k)$  – вектор состояний расширенной модели  $i$ -го узла цепи поставок;

ЛМН – линейное матричное неравенство;

ЦП – цепь поставок.

## ВВЕДЕНИЕ

Цепь поставок представляет собой интегрированный производственный процесс, включающий взаимосвязанные производственные узлы, склады и каналы распределения ресурсов, которые добывают сырье, перерабатывают его и поставляют готовую продукцию в розничную сеть либо конечным потребителям.

Для управления цепями поставок разработано множество подходов, которые используются для эффективной интеграции поставщиков, производителей, дистрибьюторов и продавцов так, чтобы продукция производилась и распределялась в нужном количестве, в нужных местах и в нужное время с целью минимизации общесистемных затрат при обеспечении заданного уровня обслуживания. Большинство публикаций по управлению ЦП посвящено разработке эвристических подходов либо методов математического программирования. Однако, в настоящее время стало понятно, что оптимизация потоков материальных ресурсов в ЦП невозможна без применения системного подхода и методологии теории автоматического управления.

Поскольку ЦП представляет собой сложный многосвязный объект, существует множество аспектов исследований в управлении ЦП. Одним из них является со-

вершенствование стратегии управления запасами с целью подавления эффекта, известного под названием «эффект хлыста».

Эффект хлыста (от англ. bullwhip effect) – явление в цепи поставок, при котором незначительные изменения спроса конечного потребителя приводят к значительным отклонениям в размерах спроса на всех уровнях цепи поставок, причем колебания спроса возрастают при движении по цепи от потребителя к производителю. Эффект хлыста приводит к возникновению либо дефицита, либо избытка материальных ресурсов. В результате повышается риск невыполнения заказов, снижается устойчивость цепи и, следовательно, уровень обслуживания клиентов. Поэтому предотвращение или сглаживание эффекта хлыста является одной из важнейших проблем в области управления ЦП.

Целью работы является синтез децентрализованного управления запасами на основе метода инвариантных эллипсоидов и дескрипторного описания системы для управления уровнями запасов ресурсов и подавления эффекта хлыста в цепи поставок.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для математического описания процесса управления запасами в цепи поставок используется дискретная модель в пространстве состояний, уравнения которой описывают изменение уровня запасов каждого вида ресурсов с течением времени. Выбирается период дискретизации по времени и считается, что все временные интервалы, необходимые для выполнения заказов в узлах ЦП и транспортировки ресурсов между узлами, известны и кратны выбранному периоду дискретизации.

Выполним декомпозицию цепи поставок  $S$  на локальные подсистемы  $S_i$ ,  $i = \overline{1, N}$ , которые являются децентрализованными по входам. Пополнение запасов происходит с запаздыванием относительно момента формирования заказа. Поведение системы определяется уравнениями динамики подсистем  $S_i$ , каждое из которых является разностным уравнением с запаздыванием:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + \sum_{t=0}^{\Lambda_i} B_{it} u_i(k-t) + E_i w_i(k). \quad (1)$$

Вектор внешних возмущений узла  $w_i(k) \in \mathbb{R}^{n_i}$  включает функции внешнего спроса и спроса, формируемого узлами цепи, для которых узел  $S_i$  является поставщиком ресурсов:

$$w_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Pi_{ij} u_j(k) + \Pi_i d(k). \quad (2)$$

Необходимое и достаточное условие продуктивности матрицы  $\Pi_{ij}$ : число Фробениуса матрицы (максимальное собственное значение) должно быть меньше 1.

Предполагается, что для каждого узла ЦП заданы эксплуатационные ограничения в виде максимальных допустимых уровней запасов ресурсов. Тогда в каждый момент времени  $k \geq 0$  должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} x_i(k) \in X_i &= \{x_i \in \mathbb{R}^{n_i} : 0 \leq x_i \leq x_i^{\max}\}, \\ u_i(k) \in U_i &= \{u_i \in \mathbb{R}^{m_i} : 0 \leq u_i\}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для моделирования неопределенности внешнего спроса используется набор интервалов, в пределах которых компоненты векторной функции  $d(k)$ , описывающей спрос, принимают значения произвольным образом. В результате внешние возмущения ЦП удовлетворяют ограничениям  $d(k) \in D = \{d \in \mathbb{R}^q : 0 \leq d^{\min} \leq d \leq d^{\max}\}$ , где векторы  $d^{\min}$  и  $d^{\max}$  считаются известными.

Для количественной оценки эффекта хлыста предложено следующее соотношение [1]:

$$\rho_{S,C} = \frac{\sigma_{\text{SUPPLIER}}^2 / m_{\text{SUPPLIER}}}{\sigma_{\text{CUSTOMER}}^2 / m_{\text{CUSTOMER}}}, \quad (4)$$

где дисперсия  $\sigma^2$  и среднее значение  $m$  размеров заказов поставщика (англ.: supplier) и заказчика (англ.: customer) вычисляются за определенный период.

Для системы, состоящей из взаимосвязанных узлов, динамика которых описывается уравнениями (1), необходимо решить задачу синтеза децентрализованного управления запасами, которое для любого допустимого внешнего спроса  $\forall d(k) \in D$  обеспечивает:

- 1) полное и своевременное удовлетворение спроса на ресурсы, то есть выполнение первого из ограничений (3) на значения состояний;
- 2) устойчивость замкнутой системы в целом с учетом взаимосвязей при выполнении второго из ограничений (3) на значения управляющих воздействий;
- 3) подавление эффекта хлыста в цепи поставок.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ различных подходов к управлению запасами можно найти в работе [2] и библиографии к ней. Среди многообразия моделей выделяют два основных типа: модель критических уровней и модель периодической проверки. В первом случае предполагается непрерывный контроль за состоянием запасов и размещение заказов фиксированного размера при снижении текущих запасов до некоторых критических уровней. Второй тип модели предполагает проверку уровня запасов через равные промежутки времени и размещение заказа, размер которого определяется в соответствии с выбранной стратегией.

В работе рассматривается модель периодической проверки, а задача управления запасами сформулирована как задача подавления влияния неслучайных ограниченных внешних возмущений, методы решения которой рассмотрены в работе [3].

Одним из подходов к данной проблематике в теории автоматического управления является концепция инвариантных множеств, среди которых особо выделяются эллипсоиды вследствие их простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова. При этом для синтеза оптимального регулятора требуется решить эквивалентную задачу поиска наименьшего по некоторому критерию инвариантного эллипсоида замкнутой динамической системы. В работе [3] на основе техники ЛМН устанавливается достаточное условие устойчивости замкнутой системы – это существование квадратичной функции Ляпунова, построенной на решениях системы.

После того, как были развиты вычислительные методы, основанные на идеях выпуклой оптимизации, и для их реализации разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение [4], техника ЛМН используется в качестве общего метода анализа и синтеза динамических систем как в непрерывном, так и в дискретном времени.

Вопросам изучения эффекта хлыста посвящено большое количество научных трудов (см. работу [5] и библиографию к ней). В настоящее время исследования указанного феномена заключаются в основном в описательном анализе его причин и последствий. Анализ публикаций показал, что исследователи в качестве основных причин появления эффекта хлыста выделяют практически одни и те же факторы [6], а для подавления эффекта предлагают методы, ориентированные либо на использование соответствующих менеджерских решений, либо на рациональный выбор параметров ЦП.

Однако, в последнее время появились работы, авторы которых предлагают использовать методологию теории автоматического управления для подавления эффекта хлыста. В частности, в работе [7] сравнивается применение метода прогнозирующего управления с целью уменьшения эффекта хлыста при синтезе централизованной и децентрализованной стратегии управления запасами в 4-уровневой цепи поставок. Полученные результаты свидетельствуют, что при централизованном подходе получение информации о спросе конечного потребителя всеми звеньями цепи позволяет значительно уменьшить колебания размеров заказов в ЦП. С другой стороны, применение децентрализованной структуры управления позволяет сглаживать проявление эффекта хлыста в различных эшелонах цепи поставок путем выбора соответствующих значений весовых матриц локальных показателей качества.

Однако, применение метода прогнозирующего управления предполагает наличие информации о внешнем спросе для построения его адекватной модели, в то время как на практике подобная информация, как правило, отсутствует. Кроме того, распространение информации о спросе конечного потребителя требует наличия централизованной системы сбора и передачи информации, а соответствующая задача синтеза централизованного управления характеризуется значительной вычислительной сложностью.

В результате возникает необходимость развития метода инвариантных эллипсоидов для задач децентрализованного управления запасами в цепях поставок. Предполагается, что оптимальная стабилизация локальных подсистем позволит добиться подавления эффекта хлыста в каждом из эшелонов цепи поставок, после чего необходимо решить задачу анализа устойчивости системы в целом с учетом взаимосвязей.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Первым этапом решения задачи является преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздывания на основе расширения вектора состояний узла путем включения в него векторов, которые определяют размеры ранее заказанных ресурсов, находящихся в процессе транспортировки и переработки:

$\xi_i(k) = [x_i^T(k), u_i^T(k-1), u_i^T(k-2), \dots, u_i^T(k-\Lambda_i)]^T$ . Тогда уравнения расширенной модели узла примут вид:

$$\xi_i(k+1) = A_i \xi_i(k) + B_i u_i(k) + G_i w_i(k), \quad x_i(k) = C_i \xi_i(k),$$

где матрицы  $A_i \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ ,  $B_i \in \mathbb{R}^{N_i \times m_i}$ ,  $G_i \in \mathbb{R}^{N_i \times n_i}$ ,  $C_i \in \mathbb{R}^{n_i \times N_i}$ ,  $N_i = n_i + m_i \Lambda_i$  имеют соответствующую блочную структуру.

Выполним аппроксимацию множеств значений внешних воздействий локальных узлов эллипсоидами наименьшего объема. Для определения граничных значений внешних воздействий каждого из узлов цепи на основании граничных значений внешнего спроса предложен следующий алгоритм.

$$1. \forall i = \overline{1, N}: d_i^{\min} = \Pi_i d^{\min}, \quad d_i^{\max} = \Pi_i d^{\max}.$$

$$2. \forall i = \overline{1, q}: \Pi_i^{\min} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \Pi_{ij} d_j^{\min},$$

$$\Pi_i^{\max} = \sum_{j=1, j \neq i}^q \Pi_{ij} d_j^{\max}, \quad w_i^{\min} = d_i^{\min} + \Pi_i^{\min},$$

$$w_i^{\max} = d_i^{\max} + \Pi_i^{\max}.$$

$$3. \forall i = \overline{q+1, N}: \Pi_i^{\min} = \sum_{j=1}^{i-1} \Pi_{ij} (\Pi_j^{\min} + d_j^{\min}),$$

$$\Pi_i^{\max} = \sum_{j=1}^{i-1} \Pi_{ij} (\Pi_j^{\max} + d_j^{\max}),$$

$$w_i^{\min} = d_i^{\min} + \Pi_i^{\min}, \quad w_i^{\max} = d_i^{\max} + \Pi_i^{\max}. \quad (4)$$

Тогда значения страховых запасов узла  $S_i$  вычисляются по формуле  $x_i^* = (\Lambda_i + 1)w_i^{\max}$ , а множество значений внешних воздействий узла аппроксимируется эллипсоидом:

$$E_i^w(w_i^*, Q_{w_i}) = \{w_i \in \mathbb{R}^{n_i} : (w_i(k) - w_i^*)^T Q_{w_i}^{-1} (w_i(k) - w_i^*) \leq 1\}, \quad (5)$$

параметры которого  $Q_{w_i} \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$  и  $w_i^* \in \mathbb{R}^{n_i}$  определяются в соответствии с выражениями:

$$Q_{w_i} = \hat{W}_i^{-2}, \quad w_i^* = \hat{W}_i^{-1} \hat{z}_i, \quad (6)$$

где  $\hat{W}_i, \hat{z}_i$  – решение задачи полуопределенного программирования  $-\lg \det W_i \rightarrow \min$  при ограничениях на матричную  $W_i = W_i^T \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$  и векторную  $z_i \in \mathbb{R}^{n_i}$  переменные:

$$W_i \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (W_i w_i - z_i)^T \\ W_i w_i - z_i & I_{n_i} \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, 2^{n_i}},$$

где  $w_i \in \mathbb{R}^{n_i}$  – векторы, компоненты которых содержат координаты вершин многогранника, определяющего допустимое множество значений внешних воздействий узла  $S_i$ .

Также выполняется аппроксимация множества  $X_i$  эллипсоидом наименьшего объема

$$E_i^x(x_i^*, Q_{x_i}) = \{x_i \in \mathbb{R}^{n_i} : (x_i(k) - x_i^*)^T Q_{x_i}^{-1} (x_i(k) - x_i^*) \leq 1\}, \quad (7)$$

у которого вектор координат центра совпадает с вектором страховых запасов  $x_i^*$ , а матрица вычисляется в результате решения задачи полуопределенного программирования  $\text{tr } Q_{x_i} \rightarrow \min$  при ограничениях на матричную переменную  $Q_{x_i} = Q_{x_i}^T \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ :

$$Q_{x_i} \succ 0, \quad \begin{bmatrix} 1 & (x_i - x_i^*)^T \\ x_i - x_i^* & Q_{x_i} \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, 2^{n_i}},$$

где  $x_i \in \mathbb{R}^{n_i}$  – векторы, которые содержат координаты вершин многогранника  $X_i$ .

Локальный критерий качества в случае бесконечного временного горизонта выбран в виде:

$$J_i(k) = \sum_{t=k}^{\infty} \beta^t \left( (\xi_i(t) - \xi_i^*)^T W_i^{\xi} (\xi_i(t) - \xi_i^*) + u_i^T(t) W_i^u u_i(t) \right), \quad (8)$$

где  $\xi_i^*$  – вектор, составленный из  $(\Lambda_i + 1)$  векторов  $x_i^*$ .

Необходимыми и достаточными условиями разрешимости задачи синтеза управления запасами в цепи поставок являются: 1) управляемость всех пар матриц  $(A_i, B_i)$ ,  $i = \overline{1, N}$ ; 2) условие достаточности ресурсов управления (см. [8]).

Традиционным средством защиты от неопределенности спроса является создание страховых запасов. Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запасов ресурсов:

$$u_i(k) = K_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*). \quad (9)$$

Тогда расширенная модель замкнутой локальной подсистемы с учетом (9) примет вид:

$$\begin{aligned} \xi_i(k+1) &= A_i^f(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) + A_i \xi_i^* + G_i w_i(k), \\ x_i(k) &= C_i \xi_i(k), \quad A_i^f(k) = A_i + B_i K_i(k). \end{aligned} \quad (10)$$

Задача отыскания управления, минимизирующего квадратичный критерий качества, является одной из основных в теории управления. В данной работе для ее решения применяется метод инвариантных эллипсоидов. Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E_i(\xi_i^*, Q_i(k)) = \{\xi_i \in \mathbb{R}^{N_i} : (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T Q_i^{-1}(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) \leq 1\}, \quad (11)$$

где  $Q_i(k) \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$  – матрица эллипсоида,  $\xi_i^*$  – вектор, компоненты которого определяют координаты центра эллипсоида, называется инвариантным по состоянию для системы (10), если любая траектория системы, начавшись в эллипсоиде, остается в нем для любого момента времени  $k \geq 0$ .

Вспользуемся подходом, который основан на достаточных условиях устойчивости и заключается в построении функции Ляпунова для замкнутой системы. Определим квадратичную функцию Ляпунова, построенную на решениях системы (10), в виде:

$$V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T P_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*)$$

$$P_i(k) = P_i^T(k) \succ 0. \quad (12)$$

Сравнение выражений (11) и (12) позволяет утверждать, что при выполнении равенства  $P_i(k) = Q_i^{-1}(k)$  инвариантный эллипсоид (11) представляет множество, которое находится внутри поверхности уровня функции Ляпунова (12). Таким образом, задача стабилизации подсистемы заключается в построении регулятора, который обеспечивает минимизацию по некоторому критерию инвариантного эллипсоида замкнутой подсистемы при заданных ограничениях. В качестве критерия выбрана сумма квадратов полуосей эллипсоида, то есть след его матрицы  $Q_i(k)$ .

Вычислим первую разность по  $k$  функции Ляпунова (12) и потребуем, чтобы значение функции с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, которая определяется значением показателя качества (8):

$$V_i(\xi_i(k+1) - \xi_i^*) - V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) \leq$$

$$\leq - \left( (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T W_i^\xi (\xi_i(k) - \xi_i^*) + u_i^T(k) W_i^u u_i(k) \right). \quad (13)$$

Просуммируем по  $k$  от 0 до  $\infty$  левые и правые части неравенства типа Ляпунова (13) и получим оценку

$$\max_{d(k) \in D} J_i(k) \leq V_i(\xi_i(0) - \xi_i^*). \text{ Тогда управляющие воздействия необходимо искать из условия минимизации функции Ляпунова } u_i(k) = \arg \min_{u_i(k) \in U_i} V_i(\xi_i(0) - \xi_i^*).$$

В итоге, решая задачу минимизации инвариантного эллипсоида замкнутой подсистемы по критерию следа матрицы при ограничении, задаваемом неравенством типа Ляпунова (13), приходим к регулятору, который обеспечивает минимизацию верхнего граничного значения показателя качества (8) при любом допустимом внешнем возмущении, а также устойчивость замкнутой подсистемы. Такой подход позволяет свести задачу синтеза ограниченного децентрализованного управления запасами к решению задачи полуопределенного программирования.

В силу неушербности  $S$ -процедуры при одном ограничении [3] выполнение неравенств (5) и (13), которые представлены в виде квадратичных форм относительно вектора

$$s_i(k) = \left[ (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T, \xi_i^{*T}, w_i^{*T}, (w_i(k) - w_i^*)^T \right]^T, \text{ эквивалентно выполнению для некоторого скаляра } \alpha_i(k) > 0 \text{ совокупности ЛМН:}$$

$$Q_i(k) \succ 0, \begin{bmatrix} Q_i(k) & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times n_i} & (A_i Q_i(k) + B_i Y_i(k))^T & O_{N_i \times n_i} & Q_i(k) W_i^\xi & Y_i^T(k) W_i^u \\ O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times n_i} & (A_i - I_{N_i})^T & O_{N_i \times n_i} & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times m_i} \\ O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times n_i} & G_i^T & O_{n_i \times n_i} & O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times m_i} \\ A_i Q_i(k) + B_i Y_i(k) & A_i - I_{N_i} & G_i & Q_i(k) & G_i Q_{w_i}^{1/2} & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times m_i} \\ O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times n_i} & Q_{w_i}^{1/2} G_i^T & \alpha_i(k) I_{n_i} & O_{n_i \times N_i} & O_{n_i \times m_i} \\ W_i^\xi Q_i(k) & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times n_i} & O_{N_i \times N_i} & O_{N_i \times n_i} & W_i^\xi & O_{N_i \times m_i} \\ W_i^u Y_i(k) & O_{m_i \times N_i} & W_i^u \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (14)$$

где  $Y_i(k) = K_i(k) Q_i(k)$ .

Ограничения (3) с помощью модификации леммы Шура для нестрогих матричных неравенств представлены в виде совокупности ЛМН:

$$\begin{bmatrix} Q_{x_i} & C_i Q_i(k) \\ Q_i(k) C_i^T & Q_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0,$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon e_{m_i} (\xi_i(k) - \xi_i^*)^T Y_i^T(k) & Y_i(k) \\ Y_i^T(k) & Q_i(k) \end{bmatrix} \preceq 0. \quad (15)$$

Наличие второго из ЛМН (15) приводит к закону управления в виде динамической обратной связи, поскольку

матрица неравенства зависит от текущего значения вектора состояний  $\xi_i(k)$ .

Тогда результат решения задачи синтеза децентрализованного управления запасами в цепи поставок на основе метода инвариантных эллипсоидов представлен в виде теоремы.

Теорема. Если для системы (10) с ограничениями (3) матрицы  $\hat{Q}_i(k)$  и  $\hat{Y}_i(k)$  получены в результате решения оптимизационной задачи

$$\text{tr } Q_i(k) \rightarrow \min \quad (16)$$

при ограничениях (14), (15) на матричные переменные  $Q_i(k) = Q_i^T(k) \in \mathbb{R}^{N_i \times N_i}$ ,  $Y_i(k) \in \mathbb{R}^{m_i \times N_i}$  и скалярный параметр  $\alpha_i(k) > 0$ , то:

1) для любого начального состояния  $\xi_i(0) = [x_i^T(0), u_i^T(-1), \dots, u_i^T(-\Lambda)]^T$ , где  $x_i(0) \geq x_i^*$ ,  $u_i(k) = O_{m_i \times 1} \forall k \leq 0$  и любого внешнего возмущения  $w_i(k) \in E_i^w(w_i^*, Q_{w_i})$  подсистема (10) является устойчивой при ограничениях (3);

2) среди всех линейных управлений вида (9) регулятор с матрицей

$$K_i(k) = \hat{Y}_i(k) \hat{Q}_i^{-1}(k) \quad (17)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантного эллипсоида замкнутой подсистемы  $S_i$  в момент времени  $k$ . Доказательство теоремы приведено в [9].

Уравнение динамики расширенной модели узла с учетом взаимосвязей (2) примет вид:

$$\xi_i(k+1) = A_i \xi_i(k) + B_i u_i(k) + \sum_{j=1, j \neq i}^N B_{ij} u_j(k) + F_i d(k), \quad (18)$$

где матрицы  $B_{ij} \in \mathbb{R}^{N_i \times m_j}$ ,  $F_i \in \mathbb{R}^{N_i \times q}$  имеют блочную структуру:

$$B_{ij}^T = [\Pi_{ij} E_i \mid O_{m_j \times m_i} \mid \dots \mid O_{m_j \times m_i}],$$

$$F_i^T = [\Pi_i E_i \mid O_{q \times m_i} \mid \dots \mid O_{q \times m_i}].$$

Уравнение (18) с учетом (9) и обозначения  $F_{ij}(k) = B_{ij} K_j(k)$  примет вид:

$$\xi_i(k+1) = A_i^f(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*) + A_i \xi_i^* + \sum_{j=1, j \neq i}^N F_{ij}(k) (\xi_j(k) - \xi_j^*) + F_i d(k).$$

Для сети поставок  $S$  построим векторную функцию Ляпунова:

$$V(\xi(k) - \xi^*) = [V_1(\xi_1(k) - \xi_1^*), \dots, V_N(\xi_N(k) - \xi_N^*)]^T, \quad (19)$$

где  $\xi(k) = [\xi_1^T(k), \dots, \xi_N^T(k)]^T$  и  $\xi^* = [\xi_1^{*T}, \dots, \xi_N^{*T}]^T$  – составные векторы соответствующей размерности. Компонентами функции (19) являются функции Ляпунова (12) локальных подсистем. На основе векторной функции Ляпунова (19) строится модульная функция Ляпунова для управляемой сети поставок  $S$ :

$$V_0(\xi(k) - \xi^*) = \sum_{i=1}^N p_{0i} V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = P_0 V(\xi(k) - \xi^*), \quad (20)$$

где  $P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0N}] \in \mathbb{R}^{1 \times N}$ ,  $p_{0i} > 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Сопоставим набору локальных подсистем  $S_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  линейную систему сравнения, обусловленную разностными уравнениями:

$$v(k+1) = \Phi(k) v(k), \quad v(0) = V(\xi(0) - \xi^*),$$

$$\eta(k) = P_0 v(k). \quad (21)$$

Квадратичные формы  $V_i(A_i^f(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*))$  и  $V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*)$  определяют пучок форм  $V_i(A_i^f(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*)) - \mu V_i(\xi_i(k) - \xi_i^*)$ , где  $\mu$  – некоторый параметр. Аналогично определяется пучок форм  $V_j(F_{ij}(k)(\xi_j(k) - \xi_j^*)) - \mu V_j(\xi_j(k) - \xi_j^*)$ . Вычисление элементов матрицы  $\Phi(k)$  выполняется по характеристическим уравнениям пучков квадратичных форм:

$$\det(A_i^{fT}(k) P_i(k) A_i^f(k) - \mu_{ii} P_i(k)) = 0, \quad i = \overline{1, N},$$

$$\det(F_{ij}^T(k) P_i(k) F_{ij}(k) - \mu_{ij} P_j(k)) = 0, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad j \neq i,$$

где  $[\Phi(k)]_{ij} = (\mu_{ij}^{\max})^{1/2}$ ;  $\mu_{ij}^{\max}$  – максимальное значение корня соответствующего уравнения. В результате для векторной (19) и модульной (20) функций Ляпунова цепи поставок выполняются неравенства:

$$V(\xi(k) - \xi^*) \leq v(k), \quad V_0(\xi(k) - \xi^*) \leq \eta(k).$$

Таким образом, система сравнения (21) покомпонентно мажорирует векторную и модульную функции Ляпунова, построенные для рассматриваемой системы. В результате анализ устойчивости децентрализованной системы управления запасами в цепи поставок сводится к анализу устойчивости линейной положительной системы сравнения (21).

Если граф, представляющий модель цепи, не имеет циклов, то матрица динамики системы сравнения является нижнетреугольной. Поскольку локальные подсистемы после замыкания являются стабилизированными, то значения диагональных элементов матрицы динамики являются положительными и меньше единицы. В результате матрица  $\forall k \Phi(k)$  является нильпотентной и, таким образом, система сравнения (21) является устойчивой. Следовательно, управляемая цепь поставок, которая состоит из взаимосвязанных подсистем, замкнутых локальными обратными связями с децентрализованными регуляторами (17), является устойчивой по Ляпунову.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В качестве примера исследована 4-уровневая цепь поставок, состоящая из 4 одно-менклатурных узлов, которая изучалась в работе [6]. Определим узлы ЦП следующим образом:

{Поставщик сырья, Производственный узел, Оптовый склад, Ритейлер}.

Каждый из эшелонов цепи обозначается  $i = \overline{1, 4}$ . Таким образом, для модели цепи поставок, представленной на рис. 1,  $i = 1$  обозначает «Ритейлера», а  $i = 4$  – «Поставщика сырья».

Заданы значения интервалов времени, необходимого для транспортировки ресурсов между узлами сети:  $T_{4,3} = T_{3,2} = T_{2,1} = 1$ ; а также технологические матрицы,

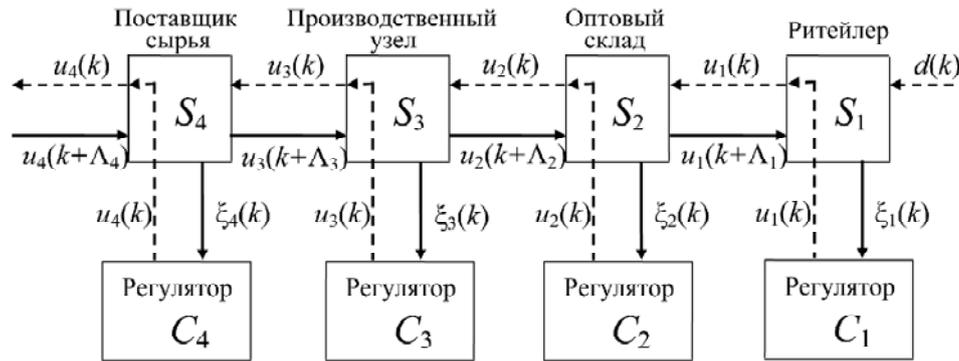


Рисунок 1 – Модель 4-уровневой цепи поставок

которые в рассматриваемом случае являются скалярами:  $\Pi_{43} = \Pi_{32} = \Pi_{21} = 1$ . Размерности расширенных моделей подсистем равны:  $N_1 = N_2 = N_3 = N_4 = 2$ . Внешний спрос моделируется следующим образом:

$$\begin{cases} d(0) = m + e(0), \\ d(k) = r \cdot (d(k-1) - m) - \theta \cdot e(k-1) + m, \quad k = 1, 2, \dots \end{cases}$$

где  $m$  – среднее значение спроса, равное 30 ед.;  $r = 0,9$  – коэффициент авторегрессии;  $\theta = 4$  – коэффициент скользящего среднего;  $e(k), k = 0, 1, \dots$  – последовательность случайных величин, распределенных по нормальному закону. В результате граничные значения внешнего спроса равны:  $d^{\min} = 18, d^{\max} = 40$ .

С помощью алгоритма (4) вычислены граничные значения внешних воздействий для всех узлов ЦП, на основе которых вычислены размеры страховых запасов ресурсов в узлах цепи. В результате решения соответствующих задач полуопределенного программирования по формулам (6) определены параметры эллипсоидов (5), аппроксимирующих допустимые множества значений внешних воздействий (в рассматриваемом примере эллипсоиды вырождаются в отрезки). Также определены матрицы эллипсоидов (7), аппроксимирующих допустимые множества значений состояний каждого из узлов ЦП.

Граничные и страховые значения уровней запасов ресурсов, начальные условия, а также параметры аппроксимирующих эллипсоидов всех узлов ЦП представлены в табл. 1, где также приведены значения элементов весовых матриц локальных критериев качества (8).

Моделирование осуществлялось в течение 50 периодов. Матрицы локальных регуляторов вычислены в соответствии с (17) в результате решения последовательности задач полуопределенного программирования (16) при ограничениях (14), (15). Численное решение задач получено в среде MATLAB с помощью свободно распространяемого пакета CVX [10].

Таблица 1 – Характеристики децентрализованной системы управления запасами

Номер узла $i$	$x_i^{\max}$ , ед.	$x_i^*$ , ед.	$x_i(0)$ , ед.	$w_i^*$ , ед.	$Q_i^w$	$Q_i^x$	$W_i^\xi$	$W_i^u$
1	150	80	80	40	117	13122	0,1	0,1
2	150	80	80	40	117	13122	0,1	0,1
3	150	80	80	40	117	13122	0,1	0,1
4	150	80	80	40	117	13122	0,1	0,1

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты моделирования представлены на рис. 2, где  $a, b, d$  – значения внешнего спроса и объемов заказов;  $b, \gamma, e$  – значения граничного, страхового и наличного уровней запасов для узлов 1–3, соответственно. Для сравнения на графиках также показаны результаты, полученные с помощью системы децентрализованного управления, где локальные регуляторы реализуют стратегию управления с критическим уровнем запаса, которая состоит в следующем: если имеющийся уровень запаса меньше критического уровня  $x_i^*$ , то формируется заказ на пополнение запаса до этого уровня, в противном случае пополнение не происходит:

$$u_i(k) = \begin{cases} x_i^* - x_i(k), & x_i(k) < x_i^*, \\ 0, & x_i(k) \geq x_i^*. \end{cases} \quad (22)$$

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 2 приведены результаты количественной оценки эффекта хлыста по формуле (4) при распространении заказов по цепи поставок от узла 1 к узлу 4, полученные с помощью децентрализованного управления на основе двух подходов: стратегии управления с критическим уровнем запасов (22) и метода инвариантных эллипсоидов (9), (17).

В первом случае имеет место явно выраженный эффект хлыста, что приводит к возникновению дефицита ресурсов в узлах цепи, начиная со 2-го. Построение децентрализованного управления запасами на основе метода инвариантных эллипсоидов позволяет подавить эффект хлыста, причем степень подавления для различных эшелонов ЦП можно изменять путем выбора значений весовых матриц локальных критериев качества, от которых зависят размеры инвариантных эллипсоидов замкнутых локальных подсистем. Значение показателя каче-

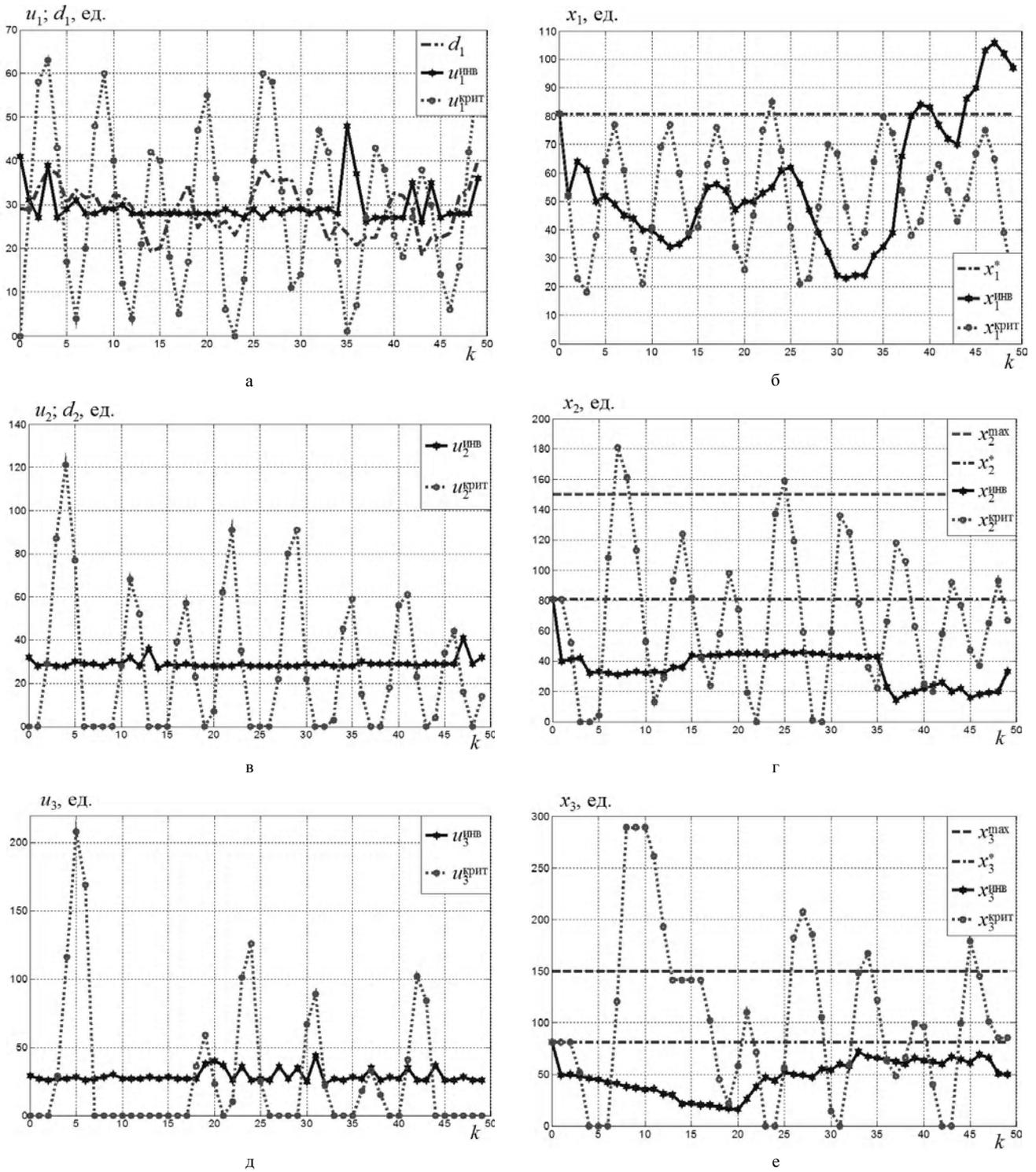


Рисунок 2 – Графики переходных процессов в цепи поставок

ства, полученное на основе предложенного подхода путем суммирования значений локальных показателей (8),

оказалось на 34,5% меньше значения, полученного для системы управления с критическим уровнем запасов.

Таблица 2 – Количественные оценки меры проявления эффекта хлыста в ЦП

Стратегия управления	$\rho_{1,2}$	$\rho_{1,3}$	$\rho_{1,4}$
С критическим уровнем	3,072	7,041	15,065
Метод инвариантных эллипсоидов	0,295	1,201	0,925

## ВЫВОДЫ

В статье предложен подход к решению задачи синтеза децентрализованного ограниченного управления запасами в цепях поставок в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и наличия эксплуатационных ограничений. Локальные законы управления строятся в виде линейной динамической обратной связи по отклонению между наличными и страховыми уровнями запасов ресурсов. Предложенный подход основан на оптимальной стабилизации локальных подсистем с помощью метода инвариантных эллипсоидов. Использование техники ЛМН позволяет свести задачу синтеза управления к последовательности задач полуопределенного программирования, которые решаются численно в реальном времени. В результате: получил дальнейшее развитие метод субоптимального структурного и параметрического синтеза децентрализованного ограниченного управления запасами в цепях поставок на основе развития метода инвариантных эллипсоидов, что позволяет снизить затраты, связанные с транспортированием и хранением материальных ресурсов за счет подавления «эффекта хлыста» в цепи поставок; степень подавления указанного эффекта для различных эшелонов цепи определяется выбором значений весовых матриц локальных критериев качества; получил дальнейшее развитие метод анализа устойчивости децентрализованной системы управления запасами в цепях поставок на основе использования метода векторных функций Ляпунова и метода сравнения, что позволяет установить достаточные условия, при которых нестационарная матрица динамики линейной системы сравнения, построенной для модели децентрализованной системы управления запасами, является нильпотентной и, следовательно, управляемая цепь поставок, которая состоит из взаимосвязанных подсистем, замкнутых локальными обратными связями с децентрализованными регуляторами, является устойчивой по Ляпунову.

Разработанные модели и алгоритмы децентрализованного управления запасами внедрены на промышленных предприятиях и организациях, которые занимаются производством, хранением и распределением материальных ресурсов, в частности, КП «Харьковводоканал» – одним из крупнейших в Украине предприятий по предоставлению услуг водоснабжения и ООО Компании «СВ»

(г. Харьков) – ведущем производителе средств бытовой химии в Украине.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» «Разработка информационной технологии формирования портфелей проектов национального уровня на основе имитационной модели научно-технологического развития Украины» (номер государственной регистрации 0115U000543).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Disney S. M. The effect of vendor managed inventory dynamics on the bullwhip effect in supply chains / S. M. Disney, D. R. Towill // *Int. J. Prod. Econ.* – 2003. – Vol. 85. – P. 199–215.
2. Лотоцкий В. А. Модели и методы управления запасами / В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель. – М. : Наука, 1991. – 188 с.
3. Поляк Б. Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков. – М. : ЛЕ-НАНД, 2014. – 560 с.
4. Чурилов А. Н. Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам / А. Н. Чурилов, А. В. Гессен. – СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2004. – 148 с.
5. Wang X. The bullwhip effect: progress, trends and directions / X. Wang, S. M. Disney // *Eur. J. Operat. Res.* – 2016. – Vol. 250. – P. 691–701.
6. Вохмянина А. В. Анализ влияния «эффекта хлыста» на уровень обслуживания в логистической цепи поставок / А. В. Вохмянина, М. А. Журавская, Qiao Cong // *Транспорт: наука, техника, управление.* – 2015. – № 9. – С. 38–45.
7. Fu D. Decentralized and centralized model predictive control to reduce the bullwhip effect in supply chain management / D. Fu, C. M. Ionescu, El-H. Aghezzaf, R. De Keyser // *Comput. Ind. Eng.* – 2014. – Vol. 73. – P. 21–31.
8. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich // *IEEE Transactions on Robotics and Automation.* – 2000. – Vol. 16, No. 3. – P. 313–317.
9. Дорофеев Ю. И. Робастное управление запасами в сетях поставок в условиях неопределенности спроса и транспортных запаздываний : дис. ... доктора техн. наук : 05.13.07 / Дорофеев Юрий Иванович. – Харьков, 2016. – 284 с.
10. Grant M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.1 / M. Grant, S. Boyd // [Electronic resource]. – Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

Статья поступила в редакцию 21.12.2016.  
После доработки 28.12.2016.

Дорофеев Ю. И.<sup>1</sup>, Любчик Л. М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

<sup>2</sup>Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры компьютерной математики и математического моделирования Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

## СТРИМАННЯ «ЕФЕКТУ ХЛИСТА» В ЛАНЦЮГАХ ПОСТАВОК ЗА ДОПОМОГОЮ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ ЗАПАСАМИ НА ОСНОВІ МЕТОДУ ІНВАРІАНТНИХ ЕЛІПСОЇДІВ

**Актуальність.** Вирішено актуальну задачу синтезу децентралізованого керування запасами матеріальних ресурсів в ланцюгах поставок в умовах невизначеності зовнішнього попиту та наявності експлуатаційних обмежень.

**Мета роботи.** Розвиток методу оптимальної стабілізації локальних вузлів ланцюгів поставок за допомогою лінійного динамічного зворотного зв'язку за відхиленням між наявними і страховими рівнями запасів ресурсів у вузлах ланцюга, що забезпечує стримання «ефекту хлыста», а також розвиток методу аналізу стійкості децентралізованої системи керування запасами в ланцюгах поставок.

**Метод.** Запропоновано підхід на основі методу інваріантних еліпсоїдів, який забезпечує повне та своєчасне задоволення невідомого, але обмеженого зовнішнього попиту на ресурси, стабілізацію замкнених локальних підсистем при виконанні заданих обмежень на значення локальних станів і керуючих дій, а також стримання «ефекту хлыста» в ланцюгах поставок. За допомогою методу векторних

функцій Ляпунова та методу порівняння встановлено умови стійкості децентралізованої системи керування запасами в ланцюгах поставок.

**Результати.** Задачу синтезу керування за допомогою техніки лінійних матричних нерівностей зведено до послідовності задач напіввизначеного програмування, які розв'язуються чисельно в реальному часі.

**Висновки.** Отримав подальший розвиток метод субоптимального структурного і параметричного синтезу децентралізованого обмеженого керування запасами в ланцюгах поставок, що дозволяє знизити витрати, пов'язані з транспортуванням та зберіганням матеріальних ресурсів за рахунок стримання «ефекту хлиста»; ступінь стримання зазначеного ефекту для різних ешелонів ланцюга поставок визначається вибором значень вагових матриць локальних критеріїв якості. Розроблені моделі та алгоритми децентралізованого керування запасами в умовах невизначеності попиту та наявності експлуатаційних обмежень впроваджені на промислових підприємствах та організаціях, які займаються виробництвом, зберіганням і розподілом матеріальних ресурсів, зокрема, КП «Харківводоканал» – одному з найбільших в Україні підприємств з надання послуг водопостачання і ТзОВ Компанії «СВ» (м. Харків) – провідному виробнику засобів побутової хімії в Україні.

**Ключові слова:** керування запасами, ефект хлиста, децентралізоване керування, метод інваріантних еліпсоїдів, лінійна матрична нерівність.

Dorofiev Yu. I.<sup>1</sup>, Lyubchik L. M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Doctor of Science, Associate Professor, Professor of the Department of System Analysis and Control, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Computer Mathematics and Mathematical Modeling, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

#### BULLWHIP EFFECT IN SUPPLY CHAINS REDUCING BY DECENTRALIZED INVENTORY CONTROL BASED ON INVARIANT ELLIPSOIDS METHOD

**Context.** The urgent task of the decentralized inventory control synthesis of material resources in supply chains with uncertainty of external demand and availability of operational constraints has been solved.

**Objective** is a development of the method of optimal stabilization of local supply chain nodes using a linear dynamic feedback from deviation between available and safety levels of resource stocks in the chain nodes, providing suppression of «bullwhip effect» and the development of the stability analysis method of the decentralized inventory control system in supply chains.

**Method.** An approach based on the invariant ellipsoids method, which provides a complete and timely response of the «unknown, but bounded» external demand for resources, the stabilization of the closed local subsystems under predefined constraints on the values of local states and control actions, as well as the suppression of «bullwhip effect» in the supply chains has been invited. The stability conditions for decentralized inventory control system in supply chains using the vector Lyapunov functions method and the comparison method has been determined.

**Results.** The problem of control synthesis using the technique of linear matrix inequalities was reduced to a sequence of semidefinite programming problems, which are solved numerically in real time.

**Conclusions.** The method of suboptimal structural and parametric synthesis of the decentralized constrained inventory control in supply chains was further developed through the development of the invariant ellipsoids method, thus the costs associated with transportation and storage of material resources were reduced due to suppression of «bullwhip effect»; the degree of suppression of mentioned above effect for different levels of the supply chains is determined by the choice of weighting matrices of local quality criteria. The developed models and algorithms of the decentralized inventory control under uncertainty of demand and availability of operational constraints were introduced at the industrial enterprises and organizations which deal with the production, storage and distribution of material resources, such as the «Kharkivvodokanal» – one of the largest enterprises in Ukraine providing water services and the Ltd. Company «SV» (Kharkiv) – the leading manufacturer of household chemical goods in Ukraine.

**Keywords:** inventory control, bullwhip effect, decentralized control, invariant ellipsoids method, linear matrix inequality.

#### REFERENCES

1. Disney S. M., Towill D. R. The effect of vendor managed inventory dynamics on the bullwhip effect in supply chains, *Int. J. Prod. Econ.*, 2003, Vol. 85, pp. 199–215.
2. Lotockij V. A., Mandel' A. S. *Modeli i metody upravlenija zapasami*. Moscow, Nauka, 1991, 188 p.
3. Poljak B. T., Hlebnikov M. V., Shherbakov P. S. *Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushhenijah: tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv*. Moscow, LENAND, 2014, 560 p.
4. Churilov A. N., Gessen A. V. *Issledovanie linejnyh matrichnyh neravenstv. Putevoditel' po programmym paketam*. Sankt-Peterburg, Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2004, 148 p.
5. Wang X., Disney S. M. The bullwhip effect: progress, trends and directions, 2016, *Eur. J. Operat. Res.* Vol. 250, pp. 691–701.
6. Vohmyanina A. V., Zhuravskaya M. A., Qiao Cong. *Analiz vliyaniya «effekta hlysta» na uroven' obsluzhivaniya v logisticheskoy cepi postavok*, *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie*, 2015, No. 9, pp. 38–45.
7. Fu D., Ionescu C. M., Aghezzaf El-H., De Keyser R. Decentralized and centralized model predictive control to reduce the bullwhip effect in supply chain management, *Comput. Ind. Eng.*, 2014, Vol. 73, pp. 21–31.
8. Blanchini F., Pesenti R., Rinaldi F., Ukovich W. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays, *IEEE Trans. Robot. Autom.*, 2000, Vol. 16, No. 3, pp. 313–317.
9. Dorofiev Yu. I. *Robastnoe upravlenie zapasami v setyah postavok v usloviyah neopredelennosti sprosa i transportnyh zapazdyvanij* : dis. ... doktora tekhn. nauk : 05.13.07 / Dorofiev Yuriy Ivanovich, Kharkiv, 2016, 284 p.
10. Grant M., Boyd S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.1, Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних систем і мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет», м. Кривий Ріг, Україна

## СТРУКТУРА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТУ ЖИТЛОВИХ ПРИМІЩЕНЬ

**Актуальність.** Постійно зростаюча тенденція до подорожчання енергоресурсів призводить до необхідності зниження енергоспоживання, тобто до економії енергоресурсів. З точки зору житлових приміщень, впровадження систем мікроклімату необхідне для організації комфортних умов перебування суб'єктів і економного використання енергоресурсів.

**Мета.** Метою роботи є вирішення актуальної задачі енергоефективного регулювання мікроклімату приміщень на основі використання інформаційної інтелектуальної системи яка враховує побажання суб'єктів які там знаходяться, що у свою чергу, дозволяє забезпечити ефективне керування опалювальними приладами за рахунок зменшення або збільшення температури оточуючого середовища.

**Метод.** Вирішення поставленої задачі запропоновано шляхом використання структури експертної системи, як однієї із складових системи інтелектуального регулювання мікроклімату приміщень, на основі використання нейро-нечіткої підсистеми логічного виводу. Дана підсистема дозволяє автоматично формувати керуючу інформацію для регулювання мікроклімату приміщень в залежності від побажань суб'єктів, узагальнюючи інформацію про час і місце їх перебування у різні періоди часу. У якості підсистеми логічного виводу запропоновано п'ятишарову нейро-нечітку систему прямого розповсюдження помилки, яка реалізує систему нечіткого виводу типу Сугено нульового порядку. Також запропоновано схему роботи інтелектуальної системи регулювання мікроклімату приміщень та підхід щодо реалізації процесу ідентифікації суб'єктів у приміщенні.

**Результати** експериментальних досліджень підтвердили ефективність використання запропонованої структури експертної системи в системах типу «Інтелектуальний дім». Також було встановлено значення параметрів які впливають на якість та продуктивність роботи запропонованої системи. У якості енергоресурсу було обрано природний газ та середньостатистичні діапазони температур житлових приміщень.

**Висновки.** Особливістю запропонованої системи є універсальність використання будь-яких кліматичних пристроїв, а також можливість автоматичного налаштування мікроклімату приміщення з урахуванням побажань суб'єктів. Також, головною особливістю запропонованого методу налаштування мікроклімату є визначення та запам'ятовування поведінки суб'єктів приміщення, що у поєднанні із апаратом нейронних мереж надає змогу до прогнозування встановлення відповідних значень мікроклімату приміщення, і, як результат, до економії енергоресурсів.

**Ключові слова:** інтелектуальна система, мікроклімат приміщення, експертна система, енергоспоживання.

### НОМЕНКЛАТУРА

ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system;

RFID – Radio Frequency IDentification;

$A_i$  – лінгвістична нечітка змінна асоційована з  $i$  вузлом;

$E$  – значення середньоквадратичної помилки;

$P$  – тиск;

$U_j$  – висновок кожного  $j$ -го правила;

$T$  – температура;

$N$  – кількість спостережень у вибірці навчальних даних  $v_p$ ;

$j$  – загальна кількість правил нечіткої системи виводу;

$u$  – загальний вихід мережі;

$U_j$  – вихід нейронну 4-го шару;

$v_p$  – різниця між заданою та поточною температурою у приміщенні;

$\overline{W}_j$  – відносна ступінь (вага) виконання нечіткого правила;

$w_j$  – вихід нейрону  $j$ -го правила;

$\alpha$  – кількість кроків навчання;

$\delta$  – значення середньоквадратичного відхилення обраної температури суб'єктами приміщення;

$\mu_{A_i}(\chi)$  – функція належності;

$\chi$  – значення  $i$ -го вузла;

$\Phi$  – відносна вологість;

БД – база даних;

БЗ – база знань;

ЕС – експертна система;

САУ – система автоматичного управління.

### ВСТУП

Сучасні системи забезпечення мікроклімату житлових і виробничих приміщень неможливо уявити без систем автоматизованого управління. Застосовуючи САУ можливо оптимізувати роботу кліматичного обладнання, знижуючи витрати на експлуатацію, наприклад, за рахунок зменшення енергоспоживання [2].

Необхідність зниження енергоспоживання також обумовлена постійно зростаючою тенденцією до подорожчання, і, як наслідок, економії енергоресурсів [1]. У системах забезпечення мікроклімату приміщень, як результат, виникає необхідність використання сучасного енергозберігаючого обладнання та проведення різних організаційних заходів. З точки зору організації енергозберігаючих заходів можна виділити керовані процеси автоматичного регулювання температури в залежності від часу доби, дня тижня, переривчастого опалення і т. д.

Використання сучасного енергозберігаючого обладнання є невід'ємною вимогою при організації систем

автоматичного регулювання мікроклімату, що, в свою чергу, дозволяє забезпечити необхідний і точний рівень регулювання, наприклад, температури і вологості повітря.

З точки зору житлових приміщень, таких як квартири, котеджі або приватні будинки, система мікроклімату, в першу чергу, необхідна для організації комфортних умов для перебування людини в приміщенні. Вона повинна допомагати підтримувати комфортну для мешканців температуру і вологість. У свою чергу, для кожної людини існують свої комфортні параметри клімату, так як деякі люди звикли до прохолоди, а інші - до тепла.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Процес налаштування і підтримки комфортних умов проживання для однієї людини є досить простим, тому що враховує параметричні особливості одного суб'єкта [4]. За умови врахування особливостей декількох суб'єктів, можливість комфортного регулювання мікроклімату повинна містити довгі і складні алгоритми підстроювання обладнання, або може стати практично неможливою.

Так як існуючі інформаційні системи, методи, підходи автоматизованого регулювання мікроклімату мають можливість виконувати регулювання параметрів мікроклімату тільки на основі раніше прописаної логіки роботи і не враховують специфіку поведінки суб'єктів приміщення то, головною метою досліджень було розробка структури експертної системи як частини інформаційної системи інтелектуального регулювання мікроклімату (ІСІРМ) житлових приміщень з урахуванням особливостей і побажань всіх проживаючих суб'єктів, що має привести до спрощення процесу регулювання і автоматичного підстроювання під потреби кожного або групи суб'єктів. Також, метою досліджень було створення підходу щодо інтелектуального регулювання мікроклімату на основі вдосконалення існуючої ІСІРМ.

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Реалізація поставленого завдання зводиться до труднощів, які виникають при використанні різної логіки окремих елементів, і які є складовою частиною систем забезпечення мікроклімату. Частина існуючих контролерів мають жорстку логіку і при проектуванні САУ не дозволяють вийти за межі заводських налаштувань. Також, у більшості програмованих логічних контролерах практично неможливо прописати алгоритм, який буде вирішувати поставлену задачу [3].

На основі аналізу існуючих рішень регулювання мікроклімату в приміщеннях, можна виділити наступні варіанти при створенні алгоритму регулювання [2, 7]:

- 1) виконання аналізу параметрів зовнішнього середовища і мікроклімату, в результаті чого вибирається заздалегідь запрограмований алгоритм;
- 2) інформаційна система сама прораховує різні комбінації схемних рішень і сама вибирає з них найбільш оптимальні;
- 3) адаптивна інформаційна система яка налаштовується під поточні умови в результаті чого видозмінює алгоритми управління кліматичною технікою

У загальному випадку процес інтелектуального регулювання мікроклімату в приміщенні має такий вигляд (рис. 1) [7, 8]:

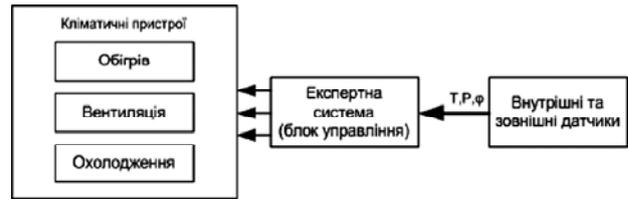


Рисунок 1 – Структурна схема процесу регулювання мікроклімату

де  $T$  – температура,  $P$  – тиск,  $\Phi$  – відносна вологість, отримана з внутрішніх і зовнішніх датчиків приміщення. Блок управління являє собою експертну систему, яка «навчається» протягом усієї своєї роботи. Тобто, поповнює або коригує свою базу знань в залежності від змін внутрішніх або зовнішніх факторів приміщення, обліку днів тижня або сезону року, в якому вона працює. У якості виконавчих пристроїв можуть виступати радіатори, кондиціонери, вентилятори тощо.

Слід зазначити, що головною умовою правильної і коректної роботи ІСІРМ є наявність відповідних виконавчих пристроїв. Наприклад, в якості опалювальних приладів слід використовувати замість звичних чавунних радіаторів, яким властива велика інерційність, сталеві, алюмінієві або біметалічні [1].

Головним недоліком існуючих інформаційних систем інтелектуального регулювання мікроклімату є відсутність можливості автоматичного підстроювання температурних параметрів мікроклімату приміщення під кожного суб'єкта.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Авторами запропонована структура ІСІРМ яка дозволяє автоматично змінювати мікроклімат приміщення на основі побажань суб'єктів і їх часу перебування (рис. 2).



Рисунок 2 – Вдосконалена схема ІСІРМ

Де блок «Вибір оптимальних умов мікроклімату» є вибором відповідних значень вологості і температури суб'єктом у відповідному приміщенні (наприклад, в кухні, залі, ванній і т. д.). Блок «Ідентифікація суб'єкта» реєструє час і тривалість перебування суб'єкта в відповідному приміщенні. Структурна схема даного блоку має наступний вигляд (див. рис. 3).

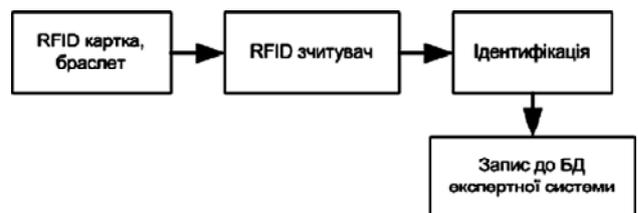


Рисунок 3 – Схема ідентифікації суб'єкта ІСІРМ

Кожен із суб'єктів при вході або виході з приміщення повинен реєструватися за допомогою RFID зчитувача, в результаті чого відповідна інформація зберігається в БД експертної системи. Логіко-функціональна схема роботи експертної системи має наступний вигляд (див. рис. 4).

Для реалізації блоку «Логічний висновок і формування керуючої інформації» запропоновано використовувати адаптивну систему нейро-нечіткого виводу. Дана система дозволяє автоматично формувати керуючу інформацію для регулювання мікроклімату приміщення в залежності від побажань суб'єктів, узагальнюючи інформацію про час і місце їх перебування в різні періоди часу. Моделювання процесів управління виконано в середовищі MatLab з пакетом розширення Fuzzy Logic Toolbox [6].

Блок «Логічний висновок і формування керуючої інформації» формує керуючий вплив на елементи вико-



Рисунок 4 – Логіко-функціональна схема роботи експертної системи

навчих пристроїв підтримки мікроклімату в приміщенні (механізм сервоприводу крана батареї, реле включення кондиціонера, вентиляції або нагрівача), змінюючи температуру навколишнього повітря  $T$  і відносну вологість  $\Phi$ .

Метою управління є вплив на елементи управління виконавчих пристроїв, тобто закриття або відкриття крана батареї, а також включення або виключення кондиціонера. Керуючий вплив формується на основі інформації про неузгодженість інформації між заданою і поточною температурою в приміщенні.

Блок «Логічний висновок і формування керуючої інформації» містить систему нечіткого виводу – наприклад, для управління краном батареї і реле включення кондиціонера. Дана система представлена у вигляді нейро-нечіткої п'ятишарової мережі прямого поширення помилки (див. рис. 5). Мережа реалізує систему нечіткого виводу типу Сугено нульового порядку та має чотири вхідні змінні:

1. IVG – пора року (час опалювального сезону чи ні);
2. IT – місцевий час;
3. ICO – температура навколишнього середовища;
4. ICZ – задана температура.

Виходом мережі є лінгвістична змінна OU яка в залежності від значень вхідних змінних формує керуючу інформацію для виконавчих пристроїв, тобто включення/вимикання сервоприводу крана батареї або реле включення кондиціонера.

Для лінгвістичної оцінки вхідної змінної IVG використовується три терми, для змінної IT – 6 термів, для змінної ICO – 5 термів і для змінної ICZ – 5 термів. У якості терми-множини першої лінгвістичної змінної IVG використовується множина  $PIVG = \{ \text{«опалювальний сезон}_1\text{»}, \text{«не опалювальний сезон»}, \text{«опалювальний сезон}_2\text{»} \}$ , яке записується в символічному вигляді як  $PIVG = \{IVGZ1, IVGL, IVGL2\}$ . У якості терми-множини другої лінгвістичної змінної IT використовується безліч  $PII = \{ \text{«ранній ранок»}, \text{«ранок»}, \text{«полудень»}, \text{«вечір»}, \text{«пізній вечір»}, \text{«ніч»} \}$ , яке записується в символічному вигляді як  $PII = \{ ITR, ITU, ITP, ITV, ITPV, ITN \}$ . У якості терми-множи-

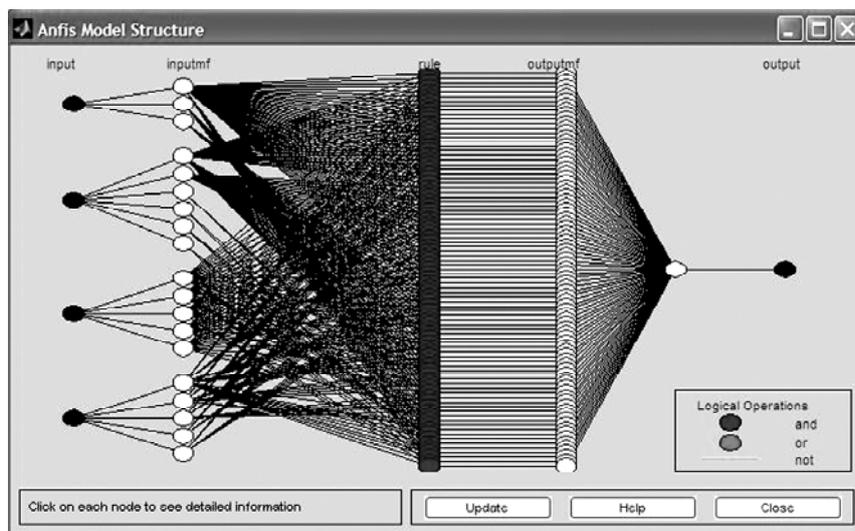


Рисунок 5 – Структура нейро-нечіткої мережі системи нечіткого виведення

ни третьої лінгвістичної змінної ІСО використовується множина ТІСО = {«холодно», «прохолодно», «комфортно», «жарко», «дуже жарко»}, яке записується в символічному вигляді як ТІСО = {ІСОН, ІСОР, ІСОК, ІСОІ, ІСОП}. У якості терми-множини четвертої лінгвістичної змінної ІСЗ використовується множина ТІСЗ = {«холодно», «прохолодно», «комфортно», «жарко», «дуже жарко»}, яке записується в символічному вигляді як ТІСЗ = {ІСЗН, ІСЗР, ІСЗК, ІСЗІ, ІСЗП}. Терм-множина вихідної лінгвістичної змінної ОУ становить множину значень для кліматичних пристроїв ТОУ = {U<sub>j</sub>}, j = 1, .. 5.

Залежно від отриманих значень можна виділити наступні режими роботи кліматичних пристроїв:

1. U<sub>1</sub> – закрити кран батареї;
2. U<sub>2</sub> – відкрити кран батареї;
3. U<sub>3</sub> – нічого не робити;
4. U<sub>4</sub> – включити кондиціонер;
5. U<sub>5</sub> – вимкнути кондиціонер.

Шари нейро-нечіткої мережі мають наступне призначення (рис. 5):

Шар 1. Визначає нечіткі терми вхідних параметрів. Виходи цього шару представляють значення функції приналежності при конкретних значеннях. Кожен вузол шару є адаптивним з функцією приналежності  $\mu_{A_i}(\chi)$ , де  $\chi$  – значення *i*-го вузла,  $i=1, \dots, n$ ;  $A_i$  – лінгвістична нечітка змінна асоційована з даним вузлом. Для термів вхідних змінних обрані трапецієподібні функції приналежності.

Шар 2. Визначає посилки нечітких правил. Даний шар – неадаптивний. Кожен вузол з'єднаний з тими вузлами першого шару, які формують передумови відповідного правила. Виконує нечітку логічну операцію «AND» на параметрах посилки правила. Виходами нейронів цього шару є міри істинності посилки кожного *j*-го правила бази знань системи, обчислені за формулою:

$$w_j = \min |\mu_{IVG_j}(IVG), \mu_{IT_j}(IT), \mu_{ICO_j}(ICO), \mu_{ICZ_j}(ICZ)|, \quad (1)$$

де  $j=1, \dots, 200$  – визначає загальну кількість правил нечіткої системи виведення.

Шар 3. Здійснює нормалізацію ступенів виконання правил. Неадаптивні вузли цього шару розраховують відносну ступінь (вагу) виконання нечіткого правила по формулі:

$$\overline{W}_j = w_j / \sum_{j=1}^{200} w_j. \quad (2)$$

Шар 4. Чітке число  $U_p$  задає результат кожного *j*-го правила, розглядається як нечітка множина з синглетною функцією приналежності. Адаптивні вузли четвертого шару розраховують внесок кожного нечіткого правила у вихід мережі за формулою:

$$y_j = \overline{W}_j U_j, i = 1, \dots, 200. \quad (3)$$

Шар 5. Неадаптивний вузол цього шару підсумовує вклади всіх правил:

$$y = \sum_{j=1}^{200} y_j. \quad (4)$$

Програмна реалізація нейро-нечіткої мережі отримана в математичному пакеті Matlab Fuzzy Logic з використанням програмної *m*-функції ANFIS. Система нечіткого виводу була налаштована автоматично. Параметри вузлів мережі при навчанні налаштовувалися таким чином, щоб мінімізувати стандартну помилку (RMSE) на основі наступної залежності:

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [v_p(i) - OU(i)]^2} \longrightarrow \min, \quad (5)$$

де  $v_p$  – неузгодженість між заданою і поточною температурою у приміщенні,  $N$  – кількість спостережень у вибірці навчальних даних  $v_p$ .

Як алгоритм навчання мережі ANFIS для визначення параметрів функції належності було вибрано метод зворотного поширення помилки, заснований на градієнтному методі найшвидшого спуску.

Процес заповнення БД експертної системи відбувається у декілька кроків. Першим кроком є запис всіх можливих значень ID міток суб'єктів, значенням температури, пори року та часу до БД протягом деякого часу  $T$ . Час  $T$  обирається індивідуально і може сягати від декількох хвилин до декількох годин. У результаті отримаємо середні значення температури у відповідності до побажань суб'єктів та їх спільного часу перебування у приміщенні.

Якщо необхідно внести зміни до роботи ІСІРМ, наприклад зміна кліматичного приладу, зміна побажань суб'єктів тощо, то необхідна корекція БД. У даному випадку відбувається коригування БД у відповідності до поточної пори року.

Приклад таблиці БД експертної системи представлено у табл. 1, і відповідно структура таблиці відповідає першій нормальній формі.

Завданням підсистеми придбання знань є оновлення бази знань на основі отриманої інформації з датчиків, а також вона може бути відкоригована суб'єктом. Слід зазначити, що експертна система може бути в стані навчання і в звичайному стані. Метою режиму навчання є формування блоком логічного виводу керуючої інформації для виконавчих пристроїв на основі інформації отриманої від суб'єктів.

Взаємодію БД з БЗ можна продемонструвати наступним чином. Нехай маємо  $\{d/D\}$  – множину станів кліматичних пристроїв ( $\beta$ ) записаних у термінах доменів  $D$ .

Таблиця 1 – Приклад таблиці БД експертної систем

№ запису	ID суб'єкта	Місяць	День	Час заходу у приміщення	Час виходу із приміщення	№ приміщення
1	12212	7	21	11.00	13.00	1
2	89761	8	12	12.00	13.00	1
---	---	---	---	---	---	---

Тоді  $\{\tau/T\}$  – множина поточних значень за допомогою яких визначається стан кліматичного пристрою ( $\tau$ ) записаних у термінах доменів  $T$ .  $\{\tau/T\}$  – результати поточних даних для конкретного кліматичного пристрою. Під станом кліматичного пристрою слід розуміти стан «ввімкнений» або «вимкнений».

При визначенні поточного стану кліматичного пристрою на вхід БЗ поступають результати поточних даних, а на виході отримуємо список результатів:

$$\forall \beta \{\tau/T\} \rightarrow БЗ \rightarrow \{d/D\}. \quad (6)$$

У випадку зворотної задачі: на вході отримаємо стан пристрою або зміну кліматичних параметрів для приміщення, а на виході отримаємо множину нових записів БД, тоді отримаємо наступну залежність:

$$\{d/D\} \rightarrow БЗ \rightarrow \{\tau/T\}_1, \dots, \{\tau/T\}_n. \quad (7)$$

Слід відмітити те, що у процесі визначення поточного стану кліматичного пристрою при заповненні БД можуть виникати різні фактори  $\{\mu\}$ . Під факторами слід розуміти, наприклад ремонт кліматичного пристрою, відсутність електроенергії, тощо. Тому у загальному випадку, залежність (1) прийме наступний вигляд:

$$\forall \beta \exists \{\mu\} \subseteq БЗ : \forall \mu \in \{\mu\}, \{\tau/T\} \xrightarrow{\mu} \{d/D\}. \quad (8)$$

Отже на основі отриманих залежностей структура даних БЗ експертної системи матиме наступний вигляд (таблиця 2).

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Було проведено моделювання роботи запропонованого підходу в інформаційній інтелектуальній системі регулювання мікроклімату на основі використання системи нейро-нечіткого виводу з метою створення керуючої інформації. Навчальна вибірка отримана на основі використання методу Монте-Карло. Початкове значення кроку навчання в напрямку антиградієнта критерію  $E$  при зміні параметрів функції належності задано рівним  $\alpha = 10^{-4}$ . Допустима зміна величини кроку за одну ітерацію – 15%. Для навчання мережі значення критерію навчання, в середньому, становить  $E = 2,187$ , після 500 ітерацій –  $E = 0,159$ . Залежність значення помилки навчання від кількості даних навчальної вибірки представлено на рис. 6.

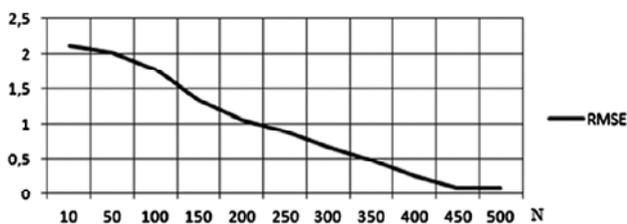


Рисунок 6 – Залежність похибки навчання від кількості елементів навчальної вибірки

При моделюванні роботи експертної системи малося на увазі, що використовуються сучасні сталеві або біметалічні радіатори, і проведені енергоефективні заходи, наприклад, утеплення зовнішніх стін, а також в приміщенні є кондиціонер.

Головною особливістю запропонованої структури експертної системи як частини ІСІРМ є автоматичне налаштування мікроклімату приміщення під суб'єкта який там знаходиться, з можливістю запам'ятовування часу перебування. В результаті чого, в період часу коли суб'єкт (суб'єкти) відсутні або їх вибрані температурні режими збігаються і ЕС здатна зменшити витрати використовуваного енергетичного ресурсу за рахунок зменшення температури повітря в приміщенні.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати моделювання використання кількості тепла для опалення приміщення представлені на рис. 7. У якості енергетичного ресурсу для розрахунку кількості використаного тепла, було вибрано природний газ.

Де  $\delta$  – середньоквадратичне відхилення обраної температури суб'єктами приміщення. Наприклад, для  $\delta = 0,82$  діапазон вибраних температур становить  $18 - 19^\circ\text{C}$ , для  $\delta = 1,53$  діапазон вибраних температур становить  $С$  і т. д. В якості одиниці вимірювання використаної кількості тепла було обрано Гкал.

Для досягнення підвищення температури в приміщенні на  $1^\circ\text{C}$  в якості норми споживання тепла було прийнято  $0,001\text{Гкал}$ , ґрунтуючись на раніше розглянутих розрахунках [5]. Тобто, з отриманих даних, наприклад, для підтримки середньої температури в приміщенні без використання ЕС необхідно в місяць витратити  $0,001 \times 41,67 = 0,04\text{Гкал}$  (рис. 7). Слід зазначити, що під середньою температурою приміщення мається на увазі температура, обрана в якості оптимальної для всіх суб'єктів.

#### 6 ОБГОВОРЕННЯ

З результатів моделювання видно, що при значенні  $\delta < 1$  або  $\delta > 6,5$  використання ЕС не є раціональним,

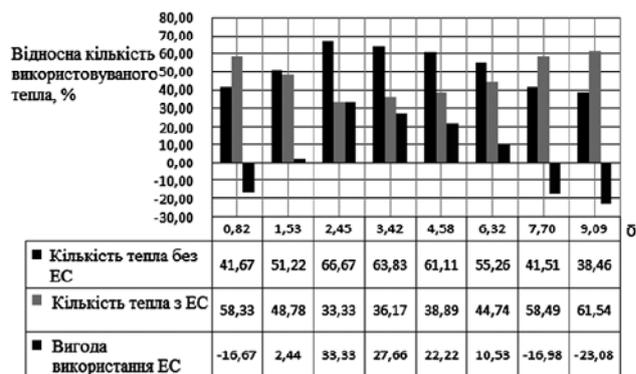


Рисунок 7 – Результати моделювання роботи ІСІРМ

Таблиця 2 – Приклад таблиці БЗ експертної систем

№ запису	ID пристрою	Місяць	День	Час включення	Час виключення	Стан
1	12212	7	21	11.00	13.00	1
2	89761	8	12	12.00	13.00	0
---	---	---	---	---	---	---

відбувається перевитрата тепла, і відповідно, збільшується кількість витрат енергоресурсу. Також, під час навчання нейро-нечіткої мережі для досягнення меншого значення середньоквадратичної помилки навчання необхідно використовувати навчальну вибірку з великим значенням вхідних даних або більшого значення кількості епох навчання. Але, зі збільшенням кількості епох навчання збільшується загальний час навчання нейро-нечіткої мережі, що в свою чергу впливає на загальну реакцію системи. Залежність часу навчання від кількості епох представлено на рис. 8, значення  $N$  було обрано рівним 250,  $E=10^{-3}$ , у якості апаратних ресурсів було обрано комп'ютер з процесором Intel Atom 1.8 Ghz, RAM=4Gb.

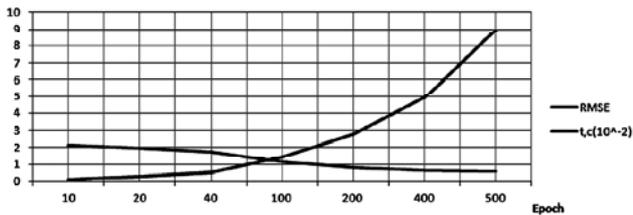


Рисунок 8 – Залежність часу навчання від кількості епох

З результатів видно, що при досягненні мінімального значення RMSE необхідно затратити більше часу на навчання нейро-нечіткої мережі. Тому доцільно знаходити «золоту середину» по часу навчання, значенням RMSE і кількості елементів вхідної вибірки.

## ВИСНОВКИ

На сьогоднішній день інтелектуальні системи регулювання мікроклімату є невід'ємною частиною систем «розумний дім». З урахуванням всіх переваг і досягнень сучасних методів, способів і інформаційних технологій регулювання мікроклімату, сьогодні практично не існує систем, які б налаштовувалися автоматично під кожного суб'єкта.

Використання запропонованої структури ЕС у складі інтелектуальної системи ICIPM дозволить зменшити в середньому до 23,4% кількості використовуваного тепла для опалення приміщення за рахунок врахування побажань суб'єктів щодо комфортних умов в приміщенні. Дані умови досягаються за рахунок налаштування температури на період перебування суб'єкта в приміщенні, наприклад, якщо людині С1 комфортно при 18°C, а людині С2 при 22°C, причому С1 знаходиться в приміщенні з 9.00 до 14.00, а С2 з 13.00 до 18.00 то ЕС автоматично і плавно підлаштує температуру під даних суб'єктів. Слід

Купин А. И.<sup>1</sup>, Музыка И. О.<sup>2</sup>, Кузнецов Д. И.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедри комп'ютерних систем і мереж ГВУЗ «Криворізький національний університет», г. Кривий Ріг, Україна

<sup>2</sup>Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем і мереж ГВУЗ «Криворізький національний університет», г. Кривий Ріг, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук старший преподаватель кафедри комп'ютерних систем і мереж ГВУЗ «Криворізький національний університет», г. Кривий Ріг, Україна

## СТРУКТУРА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО РЕГУЛЮВАННЯ МІКРОКЛІМАТА ЖИЛИХ ПОМЕЩЕНЬ

**Актуальність.** Постійно ростиюча тенденція к удорожанию енергоресурсов приводит к необходимости снижения энергопотребления, то есть к экономии энергоресурсов. С точки зрения жилых помещений, внедрение систем микроклимата необходимо для организации комфортных условий пребывания субъектов и экономного использования энергоресурсов.

зазначити, що якщо час перебування суб'єктів збігається, то вибирається середнє значення температури.

Можна зробити висновок, що використання запропонованої ЕС дає можливість налаштувати сприятливі умови мікроклімату під кожного суб'єкта приміщення, а також зменшити енерговитрати.

## ПОДЯКИ

Дослідження виконувалось відповідно до постанови НАН України №179 від 20.10.2013 р. «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2014–2018 роки» на базі кафедри комп'ютерних систем та мереж ДВНЗ «Криворізький національний університет».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Конох И. С. Разработка и исследование интеллектуальной системы регулирования параметров микроклимата помещения / И. С. Конох, И. С. Гула, С.В. Сукач // Электромеханические и энергосберегающие системы. – 2010. – №3 (11). – С. 80–85.
2. Мансуров Р. Ш. Экспериментальное исследование переходных процессов в системах обеспечения микроклимата / Р. Ш. Мансуров // Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции: IV Международная научно-техническая конференция, Москва, 10–12 октября 2011 г.: тезисы докладов. – Москва: МГСУ, 2011. – С. 382–387.
3. Кувшинов Ю. Я. Динамические свойства помещения с регулируемой температурой воздуха / Ю. Я. Кувшинов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1993. – № 4. – С. 201–210.
4. Управление микроклиматом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.soliton.com.ua/pr/MA-2009-Feb-Produal-small.pdf>.
5. Расчет Гкал на отопление [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://otoplenie-gid.ru/operacii/raschety/364-raschet-gkal-na-otoplenie>
6. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штовба. – М.: Горячая линия, 2007. – 288 с.
7. Mayer A. An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses / A. Mayer, E. Kamel, F. Enrico // Energy Efficiency. – 2016. – № 9. – P. 1241–1255
8. Marvuglia A. Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to improve thermal comfort regulation in an office building / A. Marvuglia // Building and Environment. – 2014. – № 72. – P. 287–299.
9. Рутковская Д. А. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. А. Рутковская. – М.: Питер, 2006. – 124 с.
10. Abonyi J. Cluster analysis for data mining and system identification / J. Abonyi, B. Feil. – Basel: Birkhäuser, 2007. – 303 p.

Стаття надійшла до редакції 30.11.2016.

Після доробки 28.12.2016.

**Цель.** Целью работы является решение актуальной задачи энергоэффективного регулирования микроклимата помещений на основе использования информационной интеллектуальной системы учитывающей пожелания субъектов находящихся там, что в свою очередь, позволяет обеспечить эффективное управление отопительными приборами за счет уменьшения или увеличения температуры окружающей среды.

**Метод.** Решение поставленной задачи предложено путем использования структуры экспертной системы, как одной из составляющих системы интеллектуального регулирования микроклимата помещений на основе использования нейро-нечеткой подсистемы логического вывода. Данная подсистема позволяет автоматически формировать управляющую информацию для регулирования микроклимата помещений в зависимости от пожеланий субъектов, обобщая информацию о времени и месте их пребывания в разные периоды времени. В качестве подсистемы логического-вывода предложено пятислойную нейро-нечеткую систему прямого распространения ошибки, которая реализует систему нечеткого вывода типа Сугено нулевого порядка. Также предложена схема работы интеллектуальной системы регулирования микроклимата помещений и подход к реализации процесса идентификации субъектов в помещении.

**Результаты** экспериментальных исследований подтвердили эффективность использования предложенной структуры экспертной системы в системах типа «Интеллектуальный дом». Также было установлено значение параметров влияющих на качество и производительность работы предложенной системы. В качестве энергоресурса был избран природный газ и среднестатистические диапазоны температур жилых помещений.

**Выводы.** Особенностью предлагаемой системы является универсальность использования любых климатических устройств, а также возможность автоматической настройки микроклимата помещения с учетом пожеланий субъектов. Также, главной особенностью предложенного метода настройки микроклимата является определение и запоминание поведения субъектов помещения что в сочетании с аппаратом нейронных сетей дает возможность к прогнозированию и установления соответствующих значений микроклимата помещения, и, как результат, к экономии энергоресурсов.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, микроклимат помещения, экспертная система, энергопотребление.

Kupin A. I.<sup>1</sup>, Muzyka I. O.<sup>2</sup>, Kuznetsov D. I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sc.D., Professor, Head of Department of Computer Systems and Networks SHEE «Kryvyi Rih National University», Krivoy Rog, Ukraine

<sup>2</sup>Ph.D., Associate Professor of Department of Computer Systems and Networks SHEE «Kryvyi Rih National University», Krivoy Rog, Ukraine

<sup>3</sup>Ph.D., Senior teacher of Department of Computer Systems and Networks SHEE «Kryvyi Rih National University», Krivoy Rog, Ukraine

## STRUCTURE OF DECISION SUPPORT SYSTEM OF INFORMATION SYSTEM INTELLIGENT CLIMATE CONTROL RESIDENTIAL

**Context.** The ever-growing tendency to rise in price of energy makes it necessary to reduce power consumption, that is, to save energy. In terms of accommodation, the introduction of microclimate necessary for the organization of comfortable conditions for the subjects and economical use of energy.

**Objective.** The purpose of work is to solve the actual problem of energy-efficient indoor climate control based on the use of information intellectual system which takes into account the wishes of the subjects are there, which in turn, helps to ensure effective management of heating devices by reducing or increasing the ambient temperature.

**Method.** The solution of the problem suggested by the use of expert system structure as a component of the intelligent control system of indoor climate through the use of neuro-fuzzy inference subsystem. This subsystem allows you to automatically generate control information for indoor climate control, depending on the wishes of the subjects, summarizing information on the time and place of their stay in different periods of time. As a logical subsystem suggested a five-layer neuro-fuzzy feedforward error system, which implements the fuzzy inference Sugeno zero order. Scheme of intelligent indoor climate control system is also proposed and the approach to the implementation of the process of identifying the subjects in the room.

**Results.** The experimental results confirmed the efficiency of the proposed expert system structure in systems «Smart House». It was also set parameters affecting the quality and performance of the proposed system. As an energy source, natural gas has been elected, and the average temperature ranges premises.

**Conclusions.** A feature of the proposed system is the versatility of the use of any air conditioning, as well as to automatically adjust the room climate to meet the wishes of subjects. Also, the main feature of the proposed method is to determine the microclimate settings and memory behavior of the subjects of the room combined with neural networks makes it possible to predict and detect relevant indoor climate values, and as a result, to save energy.

**Keywords:** intelligent system, indoor climate, expert system, power consumption.

## REFERENCES

1. Konoh I. S., Gula I. S., Sukach S. V. Razrabotka i issledovanie intellektual'noj sistemy regulirovanija parametrov mikroklimate pomeshhenija, *Jeletromehaničeskie i jenergosberegajushhie*, 2010, No. 3(11), pp. 80–85.
2. Mansurov R. Sh. Jeksperimental'noe issledovanie perehodnyh processov v sistemah obespečenija mikroklimate, *Teoreticheskie osnovy teplogazosnabženija i ventiljacii: IV Meždunarodnaja naučno-tehničeskaja konferencija, Moskva, 10–12 oktjabrja 2011 g. : tezisy dokladov*. Moskva, MGSU, 2011, pp. 382–387.
3. Kuvshinov Ju. Ja. Dinamičeskie svojstva pomeshhenija s reguliruemoj temperaturoj vozduha, *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo i arhitektura*, 1993, No. 4, pp. 201–210.
4. Upravlenie mikroklimate [Jeletronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.soliton.com.ua/pr/MA-2009-Feb-Produal-small.pdf>.
5. Raschet Gkal na otoplenie [Electronic resource]. Access mode: <http://otoplenie-gid.ru/operacii/raschety/364-raschet-gkal-na-otoplenie>
6. Shtovba S. D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB. Moscow, Gorjachaja linija, 2007, 288 p.
7. Mayer A., Kamel E., Enrico F. An intelligent system for the climate control and energy savings in agricultural greenhouses, *Energy Efficiency*, 2016, No. 9, pp. 1241–1255
8. Marvuglia A. Coupling a neural network temperature predictor and a fuzzy logic controller to improve thermal comfort regulation in an office building, *Building and Environment*, 2014, No. 72, pp. 287–299.
9. Rutkovskaja D. A. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow, Piter, 2006, 124 p.
10. Abonyi J., Feil B. Cluster analysis for data mining and system identification, Basel, Birkhäuser, 2007, 303 p.

*Наукове видання*

**Радіоелектроніка,  
інформатика,  
управління**

**№ 1/2017**

**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 04.04.2017. Формат 60×84/8.  
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 20,69.  
Тираж 300 прим. Зам. № 355.*

*69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 2394 від 27.12.2005.