



Запорізький національний технічний університет

## **Радіоелектроніка, інформатика, управління**

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 4(35) 2015

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2015

Запорожский национальный технический университет

## **Радиоэлектроника, информатика, управление**

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 4(35) 2015

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2015

Zaporizhzhya National Technical University

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

The scientific journal

Published four times per year

№ 4(35) 2015

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

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

Zaporizhzhya

ZNTU

2015

**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).

Постановою президії ВАК України № 1-05/4 від 26.05.2010 р. журнал **включений до переліку наукових фахових видань України**, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата технічних наук та фізико-математичних наук (радіофізика).

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 реферується та індексується** у провідних міжнародних та національних реферативних журналах і наукометричних базах даних, а також розміщується у цифрових архівах та бібліотеках з безкоштовним доступом у режимі on-line (у т. ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВІНТІ, 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** – Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

**Заст. головного редактора** – Субботін С. О., д-р техн. наук, Україна

**Члени редколегії:**

Андролідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

Бодянський С. 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

Каеяма М., д-р техн. наук, Японія

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

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

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

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

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

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

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

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

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

Папшицький М., д-р філософії, Польща

Піза Д. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

Чумаченко В. П., д-р фіз.-мат. наук, Україна, редактор розділу з радіоелектроніки

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 03 від 02.11.2015 р.

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).

Постановлением ВАК Украины №1-05/4 от 26.05.2010 г. журнал **внесен в перечень научных специализированных изданий Украины**, в которых могут публиковаться результаты диссертационных работ на получение научных степеней доктора и кандидата технических наук и физико-математических наук (радиофизика).

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 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 нейронечеткие 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** – Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

**Зам. главного редактора** – Субботин С. А., д-р техн. наук, Украина

**Члены редколлегии:**

Андрюлидакис 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

Пиза Д. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

Чумаченко В. П., д-р физ.-мат. наук, Украина, редактор раздела по радиоэлектронике

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 3 от 02.11.2015.

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, 2015

**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 Decree of the Presidium of All-Ukrainian Certification Commission № 1-05/4 dated 05.26.2010 the journal is **included to the list of the scientific specialized periodicals of Ukraine** where the results of dissertations for D.Sc. and Ph.D in Technical Sciences, Physics and Mathematics 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 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:** V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

**Deputy Editor-in-Chief:** S. A. Subbotin, 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

V. P. Chumachenko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine, Radio Electronics 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

D. M. Piza, Doctor of Science in Engineering, 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 № 03 dated 02.11.2015.

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)

## ЗМІСТ

<b>РАДІОФІЗИКА.....</b>	<b>7</b>
<i>Онуфриенко Л. М., [Чумаченко В. П.], Чумаченко Я. В.</i> К ОБОСНОВАНИЮ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ ВОЛНОВОДОВ. ЧАСТЬ II. Н-ПЛОСКОСТНАЯ ЗАДАЧА.....	7
<b>МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....</b>	<b>13</b>
<i>Мастиновский Ю. В.</i> МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ.....	13
<i>Костіков М. П.</i> ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ СЛОВОЗМІНИ ІМЕННИКІВ ПОЛЬСЬКОЇ МОВИ.....	18
<i>Субботин С. А.</i> МЕЖСТАТЕЙНЫЕ МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ.....	22
<i>Чопоров С. В.</i> МЕТОД ФОНОВОЙ СЕТКИ ДЛЯ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДВУМЕРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПОДХОДЕ.....	31
<b>НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....</b>	<b>39</b>
<i>Жихаревич В. В., Миронів І. В., Остапов С. Е.</i> АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ ТЕКСТУ НА ОСНОВІ КОНКУРУЮЧИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ.....	39
<i>Кучеренко Е. И., Ходак М. В.</i> ЗНАНИЕ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	45
<i>Москаленко В. В., Риждова А. С., Довбиш А. С.</i> ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НА ГАММА-КАМЕРІ.....	52
<i>Мочалин А. Е.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ.....	59
<b>ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....</b>	<b>66</b>
<i>Amanatidis D., Dossis M., Androulidakis I.</i> IMAGE CONTOUR SEGMENTATION IN HARDWARE.....	66
<i>Skobtsov Yu. A., Skobtsov V. Yu., Shalyto A. A.</i> TEST GENERATION AND SIMULATION FOR CROSSTALK FAULTS.....	72
<i>Шкарупило В. В., Кудерметов Р. К., Польська О. В.</i> DEVS-ОРІЄНТОВАНА МЕТОДИКА ВАЛДАЦІЇ КОМПОЗИТНИХ ВЕБ-СЕРВІСІВ.....	79
<b>УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>87</b>
<i>Дорофеев Ю. И.</i> ДЕСКРИПТОРНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ОГРАНИЧЕННОГО РОБАСТНОГО ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА.....	87
<i>Красношлык Н. А.</i> РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ГЛОБАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫМ АЛГОРИТМОМ ЛЕТУЧИХ МЫШЕЙ.....	96
<i>Левин В. И.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ МЕТОДОМ ДЕТЕРМИНИЗАЦИИ.....	104
<i>Молодецька К. В.</i> СПОСІБ ПІДТРИМАННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОПИТУ АКТОРІВ СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ НА КОНТЕНТ.....	113

---

# CONTENTS

<b>RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....</b>	<b>7</b>
<i>Onufriyenko L. M., Chumachenko V. P., Chumachenko Ya. V.</i> ON JUSTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR A PLANAR JUNCTION OF THREE WAVEGUIDES. PART II. H-PLANE PROBLEM.....	7
<b>MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....</b>	<b>13</b>
<i>Mastinovskiy Y. V.</i> MATHEMATICAL MODEL OF NON-STATIONARY THERMO-ELASTIC DEFORMATION OF MULTILAYER DAMPING COATINGS IN ELECTRONICS.....	13
<i>Kostikov M. P.</i> A FORMAL MODEL OF POLISH NOUNS INFLECTION.....	18
<i>Subbotin S. A.</i> INTER-PAPER QUALITY METRICS FOR SCIENTIFIC PUBLICATION ANALYSIS AUTOMATION.....	22
<i>Choporov S. V.</i> BACKGROUND GRID METHOD FOR PLANE SHAPES TRIANGULATION IN FUNCTIONAL APPROACH.....	31
<b>NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....</b>	<b>39</b>
<i>Zhikharevich V. V., Myroniv I. V., Ostapov S. E.</i> CHARACTER RECOGNITION ALGORITHM ON THE BASE OF COMPETITIVE CELLULAR AUTOMATA.....	39
<i>Kucherenko Ye. I., Khodak M. V.</i> KNOWLEDGE-ORIENTED INTELLECTUAL METHODS DECISION UNDER UNCERTAINTY.....	45
<i>Moskalenko V. V., Rizhova A. S., Dovbysh A. S.</i> INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS WITH GAMMA CAMERA.....	52
<i>Mochalin O. Ye.</i> GENETIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF MULTIEXTREMUM FUNCTIONS WITH LARGE PARAMETERS NUMBER.....	59
<b>PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....</b>	<b>66</b>
<i>Amanatidis D., Dossis M., Androulidakis I.</i> IMAGE CONTOUR SEGMENTATION IN HARDWARE.....	66
<i>Skobtsov Yu. A., Skobtsov V. Yu., Shalyto A. A.</i> TEST GENERATION AND SIMULATION FOR CROSSTALK FAULTS.....	72
<i>Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K., Polska O. V.</i> DEVS-ORIENTED TECHNIQUE FOR COMPOSITE WEB SERVICES VALIDITY CHECKING.....	79
<b>CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....</b>	<b>87</b>
<i>Dorofieiev Yu. I.</i> DESCRIPTOR APPROACH TO THE SYNTHESIS OF CONSTRAINED ROBUST GUARANTEED INVENTORY CONTROL USING PARAMETER-DEPENDENT LYAPUNOV FUNCTION.....	87
<i>Krasnoshlyk N. O.</i> A MODIFIED BATA ALGORITHM FOR SOLVING GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEM.....	96
<i>Levin V. I.</i> THE OPTIMIZATION IN CONDITION OF UNCERTAINTY BY DETERMINATION METHOD.....	104
<i>Molodetska K.</i> METHOD OF MAINTENANCE THE SPECIFIED LEVEL FOR SOCIAL NETWORKING SERVICES ACTORS' MARKET FOR THE CONTENT.....	113

# РАДИОФИЗИКА

# РАДИОФИЗИКА

# RADIOPHYSICS

УДК 517.9 : 537.86

Онуфриенко Л. М.<sup>1</sup>, Чумаченко В. П.<sup>2</sup>, Чумаченко Я. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

<sup>2</sup>Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математических методов в инженерии Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

## К ОБОСНОВАНИЮ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ ВОЛНОВОДОВ. ЧАСТЬ II. $H$ -ПЛОСКОСТНАЯ ЗАДАЧА

В работе предложена и обоснована математическая модель  $H$ -плоскостного соединения трех волноводов с произвольно треугольной областью связи. Задача рассеяния волноводных мод формулируется в виде краевой задачи для уравнения Гельмгольца с однородными граничными условиями Дирихле на контуре конфигурации, условиями излучения в волноводах и условием на ребре. Модель основывается на представлении искомой компоненты поля внутри треугольной соединительной полости в виде суммы тригонометрических рядов, полученных на основе метода произведения областей. Для улучшения сходимости используемых рядов скорректирован традиционный для этого метода вид разложения по синусам. Изучены характерные особенности бесконечной системы линейных алгебраических уравнений, возникающей в ходе решения задачи. Показано, что после простой модификации она приводится к эквивалентной системе, которая имеет те же свойства, что и система, которая была исследована в первой части работы при анализе аналогичной  $E$ -плоскостной структуры. Этот факт позволил интерпретировать систему преобразованных уравнений, как одно функциональное уравнение с фредгольмовым оператором в пространстве последовательностей  $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ , где  $l_1$  является пространством абсолютно сходящихся рядов, а также доказать, что это уравнение имеет единственное решение, которое может быть найдено методом редукции, сходящимся по норме  $l_1^{(3)}$ .

**Ключевые слова:** волноводные неоднородности, метод произведения областей, матрично-операторные уравнения.

### НОМЕНКЛАТУРА

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений;

$l_1$  – пространство последовательностей  $\mathbf{s} = \{s_n\}$  та-

ких, что  $\sum_{n=0}^{\infty} |s_n| < \infty$ ;

$\tilde{l}_2$  – пространство последовательностей  $\mathbf{s} = \{s_n\}$  та-

ких, что  $|s_0|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} |s_n|^2 < \infty$ ;

$X \oplus Y$  – прямая сумма линейных пространств  $X$  и  $Y$ ;

$O(x)$  – символ порядка: если  $f(x) = O(g(x))$  при  $x \rightarrow a$ , то существует постоянная  $C$  такая, что  $|f(x)| \leq C |g(x)|$  при  $x \rightarrow a$ ;

$i$  – мнимая единица;

$\operatorname{Re} c, \operatorname{Im} c$  – действительная и мнимая части комплексного числа  $c$ ;

$\delta_{mn}$  – символ Кронекера;

$e^{i\omega t}$  – временная зависимость монохроматического процесса;

$\omega$  – круговая частота колебаний;

$\epsilon_0, \mu_0$  – электрическая и магнитная постоянные;

$\epsilon, \mu$  – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, предполагается  $\mu = 1$ ;

$\chi$  – волновое число,  $\chi = \omega \sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}$ ;

$x, y, z$  – декартовы координаты.

### ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа является продолжением работ [1–3], посвященных построению эффективных математических моделей гибких автономных блоков треугольной формы, которые можно ввести в процессе сегментации волноводных узлов при применении метода обобщенных матриц рассеяния. В первой ее части [4] рассматривалась  $E$ -плоскостная конфигурация, состоящая из трех волновых каналов, присоединенных к апертурам соединительной полости. Как и в предшествующих работах, в [4] для представления искомого поля внутри области связи были использованы тригонометрические разложения, получен-

ные на основе метода произведения областей [5]. Ниже предлагается и обосновывается математическая модель аналогичного соединения волноводов в  $H$ -плоскости. Полученные результаты основываются на устанавливаемой в работе возможности сведения бесконечной СЛАНУ, возникающей при решении задачи рассеяния собственных волн волноводов на их сочленении, к эквивалентной системе, которая в пространстве последовательностей  $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$  являет собой матрично-операторное уравнение с теми же свойствами, что и уравнение, изученное в [4].

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сечение структуры плоскостью  $z = \text{const}$  имеет такой же вид, как и случае  $E$ -плоскостного соединения. Для удобства читателя геометрия задачи восстановлена на рис. 1.

Кроме основной системы координат  $(x, y)$  для каждой из сторон треугольника  $S_j$  длиной  $2a_j$  введена локальная система  $(x_j, y_j)$  так, что начало ее отсчета  $O_j$  находится в центре  $S_j$ , а ось  $O_j y_j$  направлена внутрь соединительной полости  $\Omega$ . Через  $\alpha_j$  обозначены внутренние углы, отвечающие вершинам  $M_j (j = \overline{1,3})$ . Треугольник является невырожденным. Перпендикулярно к его сторонам присоединены полубесконечные волноводы  $W_j = \{(x_j, y_j) : -a_j < x_j < a_j, y_j < 0\}$ . Как и в [4], будем считать, что разветвление волноводов заполнено однородным диэлектриком с относительной проницаемостью  $\epsilon$ .

Со стороны плеча  $p$  соединение возбуждается  $r$ -й собственной волной единичной амплитуды, имеющей лишь электрическую составляющую вдоль оси  $z$ . Задача состоит в отыскании единственной  $z$ -компоненты электромагнитного поля  $E_z = u e^{i\omega t}$ . Введем обозначения:  $u_\Omega \equiv u \nabla(x, y) \in \Omega, u^{(j)} \equiv u \nabla(x, y) \in W_j$ ,

$$S \varphi_n^{(j)}(x_j) = \sin \frac{n\pi(x_j + a_j)}{2a_j}, \quad \gamma_n^{(j)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{2a_j}\right)^2 - \chi^2}. \quad (1)$$

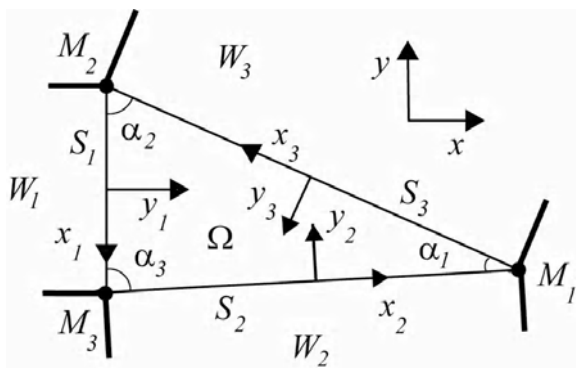


Рисунок 1 – Геометрия задачи

Функция  $u$  должна удовлетворять двумерному уравнению Гельмгольца

$$\Delta u + \chi^2 u = 0, \quad (2)$$

однородным граничным условиям Дирихле на контуре узла, условиям сопряжения полей в апертурах соединительной полости

$$u_\Omega \Big|_{y_s=0+} = u^{(s)} \Big|_{y_s=0-}, \quad \frac{\partial u_\Omega}{\partial y_s} \Big|_{y_s=0+} = \frac{\partial u^{(s)}}{\partial y_s} \Big|_{y_s=0-},$$

$$x_s \in (-a_s, a_s), \quad s = \overline{1,3}, \quad (3)$$

$$u^{(s)} = \delta_{sp} S \varphi_r^{(s)}(x_s) e^{-\gamma_r^{(s)} y_s} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n^{(s)} S \varphi_n^{(s)}(x_s) e^{\gamma_n^{(s)} y_s},$$

$$(x_s, y_s) \in W_s, \quad s = \overline{1,3}. \quad (4)$$

При  $\text{Im} \epsilon \leq 0$  существует единственное решение этой задачи для всех значений частоты  $\omega > 0$ , исключая не более чем счетное множество точек [6]. В последующем мы рассматриваем только те значения  $\omega$ , при которых граничная задача однозначно разрешима.

### 2 СЛАНУ. ЕДИНСТВЕННОСТЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Как и в случае блока с двумя присоединенными волноводами [3], будем искать  $u_\Omega$  в виде

$$u_\Omega = \sum_{j=1}^3 (u_\Omega^{(j)} + D_0^{(j)} e^{i\chi y_j}),$$

$$u_\Omega^{(j)} = \sum_{n=1}^{\infty} D_n^{(j)} S \varphi_n^{(j)}(x_j) e^{-\gamma_n^{(j)} y_j}. \quad (5)$$

Бесконечные вектор-столбцы коэффициентов разложений  $\mathbf{A}^{(s)} = \{A_n^{(s)}\}$  и  $\mathbf{D}^{(j)} = \{D_n^{(j)}\}$  подлежат определению. Известно [7], что система функций, используемая в (5) для разложения величины  $u_\Omega$ , линейно независима за исключением некоторого счетного множества значений  $\omega$ . Последнее множество также не включается в рассмотрение. Отметим, что в отличие от случая  $E$ -плоскостной структуры в сумму, представляющую  $u_\Omega$ , введены дополнительные слагаемые  $D_0^{(j)} e^{i\chi y_j}$ . Это сделано с целью улучшения сходимости разложений  $u_\Omega^{(j)}$  по синусам. Для нахождения значений  $D_0^{(j)}$  добавляются точечные граничные условия в вершинах треугольника

$$\left( \sum_{j=1}^3 D_0^{(j)} e^{i\chi y_j} \right) \Big|_{M_l} + u_\Omega^{(l)}(M_l) = 0, \quad l = \overline{1,3}, \quad (6)$$

следующие из однородных условий Дирихле на контуре узла в предположении, что  $u_\Omega^{(j)} \Big|_{\substack{x_j = \pm a_j \\ y_j = 0}} = 0$ .



Подставив выражения (4), (5) в (3) и (6), а также воспользовавшись ортогональностью системы функций  $\{S \varphi_n^{(s)}(x_s)\}$  на интервале  $(-a_s, a_s)$ , мы получим бесконечную СЛАУ относительно коэффициентов разложений:

$$D_m^{(s)} + \sum_{l=1}^3 q_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)} + \sum_{l \neq s, n=1}^{\infty} q_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = \delta_{sp} \delta_{mr} + A_m^{(s)}, \quad (7)$$

$$-D_m^{(s)} + \sum_{l=1}^3 \tilde{p}_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)} + \sum_{l \neq s, n=1}^{\infty} \tilde{p}_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = -\delta_{sp} \delta_{mr} + A_m^{(s)}, \quad (8)$$

$$\sum_{\tau=1}^3 t^{(\nu\tau)} D_0^{(\tau)} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n^{(\nu)} D_n^{(\nu)} = 0, \quad \nu = \overline{1,3}, \quad (9)$$

где  $s = \overline{1,3}, m = \overline{1, \infty}$ , а

$$q_{m0}^{(sl)} = \frac{1}{a_s} \int_{-a_s}^{a_s} \left( e^{i\chi y_l} \right)_{y_s=0} S \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad (10)$$

$$\tilde{p}_{m0}^{(sl)} = \frac{1}{a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \left( \frac{\partial}{\partial y_s} e^{i\chi y_l} \right)_{y_s=0} S \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad (11)$$

$$q_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{a_s} \int_{-a_s}^{a_s} \left[ S \varphi_n^{(l)}(x_l) e^{-\gamma_n^{(l)} y_l} \right]_{y_s=0} S \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad n \geq 1, \quad (12)$$

$$\tilde{p}_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \left\{ \frac{\partial}{\partial y_s} \left[ S \varphi_n^{(l)}(x_l) e^{-\gamma_n^{(l)} y_l} \right] \right\}_{y_s=0} S \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad n \geq 1, \quad (13)$$

$$b_n^{(\nu)} = \left[ S \varphi_n^{(\nu)}(x_\nu) e^{-\gamma_n^{(\nu)} y_\nu} \right]_{M_\nu}, \quad (14)$$

$$t^{(\nu\tau)} = \left( e^{i\chi y_\tau} \right)_{M_\nu}. \quad (15)$$

Как и в случае  $E$ -плоскостного узла, наложим требование  $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)} \in l_1 \subset \tilde{l}_2$ , которое является достаточным для выполнения условия конечности энергии в ограниченной области. Существование соответствующих последовательностей  $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)}$  следует из разрешимости СЛАУ, устанавливаемой в следующем разделе.

Соображения аналогичные изложенным в [4] приводят нас к утверждению, что если бесконечная СЛАУ (7)–(9) имеет решение  $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)} \in l_1, (s = \overline{1,3})$ , то после его подстановки в (4), (5) мы получим величину, удовлетворяющую как уравнению Гельмгольца, так и всем требуемым условиям на границе. Это означает, что эта система может иметь в  $l_1$  не более одного решения, так как противоположное предположение противоречит теореме един-

ственности решения рассматриваемой краевой задачи. Отметим в этой связи, что равномерная сходимость рядов  $u_\Omega^{(s)} \Big|_{S_s} = \sum_{m=1}^{\infty} D_m^{(s)} S \varphi_m^{(s)}(x_s)$ , следующая из  $\mathbf{D}^{(s)} \in l_1$ , и непрерывность функций  $S \varphi_m^{(s)}(x_s)$  (равных нулю на концах интервала  $[-a_s, a_s]$ ) означает, что  $u_\Omega^{(s)} \Big|_{S_s}$  будет непрерывной функцией, обращающейся в нуль в этих же точках, а значит, граничное условие  $u_\Omega(M_l) = 0$  действительно должно иметь вид (6).

Далее вместо системы (7)–(9) мы будем изучать эквивалентную систему, состоящую из уравнения (9) и разности уравнений (7) и (8), деленной на 2,

$$\sum_{\tau=1}^3 t^{(\nu\tau)} D_0^{(\tau)} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n^{(\nu)} D_n^{(\nu)} = 0, \quad \nu = \overline{1,3}, \quad (16)$$

$$D_m^{(s)} + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 [q_{m0}^{(sl)} - \tilde{p}_{m0}^{(sl)}] D_0^{(l)} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq s, n=1}^{\infty} [q_{mn}^{(sl)} - \tilde{p}_{mn}^{(sl)}] D_n^{(l)} = \delta_{sp} \delta_{mr}, \quad s = \overline{1,3}, m = \overline{1, \infty}, \quad (17)$$

а также пересчетной формулы

$$A_m^{(s)} = \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 [q_{m0}^{(sl)} + \tilde{p}_{m0}^{(sl)}] D_0^{(l)} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq s, n=1}^{\infty} [q_{mn}^{(sl)} + \tilde{p}_{mn}^{(sl)}] D_n^{(l)}, \quad (18)$$

полученной после сложения этих уравнений и позволяющей определить последовательности коэффициентов  $\mathbf{A}^{(s)}$  по известным  $\mathbf{D}^{(l)}$ .

### 3 АНАЛИЗ МАТРИЧНЫХ ОПЕРАТОРОВ. РЕШЕНИЕ СЛАУ

Введем обозначения аналогичные принятым в [4]:

$$\Gamma_n = \gamma_n^{(2)} \sin \alpha_3, \quad {}^0 \Gamma_n = \frac{n\pi}{2a_2} \sin \alpha_3, \quad \Pi_n = \frac{n\pi}{2a_2} \cos \alpha_3, \quad (19)$$

$$\Lambda_n = 2\Pi_n a_1, \quad \Phi_{mn}^\pm = \Gamma_n^2 + \left( \frac{m\pi}{2a_1} \pm \Pi_n \right)^2,$$

$$\Psi_{mn}^\pm = \frac{1}{\Phi_{mn}^+} \pm \frac{1}{\Phi_{mn}^-}, \quad (20)$$

$${}^0 \Phi_{mn}^\pm = \begin{cases} \left( \frac{m\pi}{2a_1} \right)^2 + \left( \frac{n\pi}{2a_2} \right)^2 \pm \frac{mn\pi^2}{2a_1 a_2} \cos \alpha_3, & \forall mn > 0; \\ \infty, & \forall mn = 0, \end{cases}$$

$${}^0 \Psi_{mn}^\pm = \frac{1}{{}^0 \Phi_{mn}^+} \pm \frac{1}{{}^0 \Phi_{mn}^-}. \quad (21)$$

С целью анализа выпишем явные выражения для значений интегралов  $q_{mn}^{(12)}$  и  $\tilde{p}_{mn}^{(12)}$  при  $n \geq 1$ :

$$q_{mn}^{(12)} = \frac{1}{2a_1} \left\{ \left[ (-1)^m \Gamma_n - (\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) e^{-2\Gamma_n a_1} \right] \Psi_{mn}^- + \frac{m\pi}{2a_1} \sin \Lambda_n e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^+ \right\}, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_{mn}^{(12)} = & \frac{1}{2\gamma_m^{(1)} a_1} \left\{ (-1)^{m+1} \left[ \chi^2 \sin \alpha_3 \cos \alpha_3 \Psi_{mn}^- + {}^0\Gamma_n \frac{m\pi}{2a_1} \Psi_{mn}^+ \right] + \right. \\ & + \left[ {}^0\Gamma_n (\Gamma_n \sin \Lambda_n + \Pi_n \cos \Lambda_n) - \gamma_n^{(2)} \cos \alpha_3 (\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) \right] e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^- + \\ & \left. + \frac{m\pi}{2a_1} \left[ \gamma_n^{(2)} \cos \alpha_3 \sin \Lambda_n + {}^0\Gamma_n \cos \Lambda_n \right] e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^+ \right\}. \quad (23) \end{aligned}$$

Величины  $q_{mn}^{(21)}$  и  $\tilde{p}_{mn}^{(21)}$  могут быть найдены из (19)–(23) путем перестановок  $a_1 \leftrightarrow a_2$ ,  $\gamma_k^{(1)} \leftrightarrow \gamma_k^{(2)}$  и умножения полученных выражений на  $(-1)^{m+n}$ . Если  $l$  номер стороны треугольника, следующей за  $s$ -й стороной против часовой стрелки, то значения  $q_{mn}^{(sl)}$  и  $\tilde{p}_{mn}^{(sl)}$  могут быть получены из формул (19)–(23), заменяя в правых их частях индексы 1 на  $s$ , 2 на  $l$ , а угол  $\alpha_3$  на угол между сторонами  $s$  и  $l$ . Если  $l$ -я сторона предшествует  $s$ -й стороне, то значения  $q_{mn}^{(sl)}$  и  $\tilde{p}_{mn}^{(sl)}$  получаются за таким же принципом из формул для  $q_{mn}^{(21)}$  и  $\tilde{p}_{mn}^{(21)}$ .

Изучение полученных формул показывает, что величины  $q_{mn}^{(sl)}$  при больших  $m$  имеют порядок  $O\left(\frac{1}{m}\right)$ , причем при  $n \geq 1$  это обусловлено тем, что в каждом из выражений для  $q_{mn}^{(sl)}$  присутствует однотипное слагаемое, имеющее для  $q_{mn}^{(12)}$  вид  $\frac{m\pi}{4a_1^2} \sin \Lambda_n e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^+ = O\left(\frac{1}{m}\right)$ . Это значит, что матрицы, связанные с выписанной СЛАУ, нельзя рассматривать в качестве ограниченных операторов  $l_1 \rightarrow l_1$ . Покажем, однако, что после простых преобразований анализ может быть переведен в это пространство.

После вычисления интегралов  $q_{m0}^{(sl)}$ , устанавливаем, что их значения можно записать в виде

$$q_{m0}^{(sl)} = \frac{m\pi \left\{ [e^{i\chi y_l}]_{M_s^-} - (-1)^m [e^{i\chi y_l}]_{M_s^+} \right\}}{2a_s^2 \left[ \left( \frac{m\pi}{2a_s} \right)^2 - \chi^2 \sin^2 \beta_{sl} \right]}, \quad (24)$$

где  $M_s^-$  и  $M_s^+$  – начальная и конечная точки  $s$ -й стороны (например,  $M_1^- = M_2$ ,  $M_1^+ = M_3$ ), а  $\beta_{sl}$  – угол между сторонами  $s$  и  $l$  (например,  $\beta_{ss} = 0$ ,  $\beta_{12} = \beta_{21} = \alpha_3$ ). Запишем граничные условия (16) в точках  $M_s^-$  и  $M_s^+$ .

Умножим затем второе из полученных уравнений на  $(-1)^{m+1}$ , сложим его с первым и результат разделим на  $\frac{m\pi}{2}$ . Мы получим

$$\sum_{l=1}^3 d_{m0}^{(sl)} D_0^{(l)} + \sum_{l \neq s} \sum_{n=1}^{\infty} d_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = 0, \quad (25)$$

где

$$d_{m0}^{(sl)} = \frac{2 \left\{ [e^{i\chi y_l}]_{M_s^-} - (-1)^m [e^{i\chi y_l}]_{M_s^+} \right\}}{m\pi},$$

$$d_{mn}^{(12)} = \frac{2}{m\pi} \sin \Lambda_n e^{-2a_1 \Gamma_n}, \quad (26)$$

а для других  $s$  и  $l$  при  $m, n \geq 1$  значения  $d_{mn}^{(sl)}$  связаны со значениями  $d_{mn}^{(12)}$  теми же правилами, что и  $q_{mn}^{(sl)}$  с  $q_{mn}^{(12)}$ . Учитывая формулы (24), (26), несложно убедиться, что

$$\begin{aligned} \tilde{q}_{m0}^{(sl)} = q_{m0}^{(sl)} - d_{m0}^{(sl)} &= \begin{cases} O\left(\frac{1}{m^3}\right), & l \neq s, \\ 0, & l = s, \end{cases} \\ \tilde{q}_{mn}^{(sl)} = q_{mn}^{(sl)} - d_{mn}^{(sl)} &= O\left(\frac{1}{m^2}\right), \quad l \neq s, \\ & n \geq 1. \end{cases} \quad (27)$$

Вычтем равенства (25), деленные на 2, из уравнений (17) для всех возможных значений  $s$  и  $m$ . К полученным уравнениям добавим под номерами  $s = \overline{1,3}$ ,  $m = 0$  уравнения (16), записанные для точек  $M_s^+$ . В результате, вместо СЛАУ (16), (17) мы будем иметь систему

$$\begin{aligned} D_m^{(s)} + \frac{1}{2} \sum_{l=1}^3 \sum_{n=0}^{\infty} [\tilde{q}_{mn}^{(sl)} - \tilde{p}_{mn}^{(sl)}] D_n^{(l)} &= \tilde{h}_m^{(s)}, \\ s = \overline{1,3}, m = \overline{0, \infty}, \end{aligned} \quad (28)$$

которую уже можно рассматривать как функциональное уравнение в пространстве  $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ . Здесь  $\tilde{h}_m^{(s)} = \delta_{sp} \delta_{mr}$ ,  $\tilde{q}_{0n}^{(ss)} = \tilde{p}_{0n}^{(sl)} = 0$  при  $n \geq 0$ ,  $\tilde{q}_{mn}^{(ss)} = \tilde{p}_{mn}^{(ss)} = 0$  при  $mn \geq 1$  и

$$\tilde{q}_{0n}^{(ss^-)} = \begin{cases} 2t^{(s^-s^-)}, & n = 0 \\ 2b_n^{(s^-)}, & n \geq 1 \end{cases}, \quad \tilde{q}_{0n}^{(s,s^+)} = \begin{cases} 2, & n = 0; \\ 0, & n \geq 1, \end{cases} \quad (29)$$

где  $s^- = \begin{cases} s-1, s > 1; \\ 3, s = 1, \end{cases}$  и  $s^+ = \begin{cases} s+1, s < 3; \\ 1, s = 3. \end{cases}$

Пусть  $\tilde{f}_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{2} [\tilde{q}_{mn}^{(sl)} - \tilde{p}_{mn}^{(sl)}]$ . Будем рассматривать матрицы  $\tilde{Q}^{(sl)} = (\tilde{q}_{mn}^{(sl)})$ ,  $\tilde{P}^{(sl)} = (\tilde{p}_{mn}^{(sl)})$  и  $\tilde{F}^{(sl)} = \frac{1}{2} (\tilde{f}_{mn}^{(sl)})$

в качестве операторов в пространстве последовательностей  $l_1$ . Очевидно, что операторы  $\tilde{F}^{(ss)}$  являются  $\omega$ -непрерывными. Положим

$${}^0\tilde{q}_{mn}^{(12)} = \frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^-, \quad {}^0\tilde{p}_{mn}^{(12)} = -\frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^+,$$

$${}^0\tilde{j}_{mn}^{(12)} = \frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n {}^0\Phi_{mn}^+ \quad (30)$$

и определим  ${}^0\tilde{q}_{mn}^{(sl)}$ ,  ${}^0\tilde{p}_{mn}^{(sl)}$  для других значений  $s$  и  $l$  по тем же правилам, что и  $q_{mn}^{(sl)}$ ,  $\tilde{p}_{mn}^{(sl)}$ .

Разности  $\tilde{F}^{(sl)} - {}^0\tilde{F}^{(sl)}$  при  $s \neq l$  также являются  $\omega$ -непрерывными. Сравнив формулы (30) с формулами (18) из [4], мы видим, что  ${}^0\tilde{Q}^{(sl)} = -{}^0\hat{P}^{(sl)}$ ,  ${}^0\tilde{P}^{(sl)} = -{}^0\hat{Q}^{(sl)}$  и  ${}^0\tilde{F}^{(sl)} = {}^0\hat{F}^{(sl)}$ . Система (28) имеет тот же тип, что и СЛАУ (10) в работе [4]. Далее, проделав выкладки подобные выполненным в [4] в случае  $E$ -плоскостной задачи, устанавливаем, что система (28) имеет в  $l_1^{(3)}$  единственное решение, которое может быть найдено методом редукции, сходящимся по норме этого пространства.

## ВЫВОДЫ

Рассмотрена задача рассеяния волн в однородно заполненном  $H$ -плоскостном соединении трех волноводов с областью связи, ограниченной произвольным треугольником. Исследованы свойства матрицы бесконечной системы линейных уравнений, появляющейся при применении для анализа такой структуры метода произведения областей. Продемонстрировано, что после простых преобразований СЛАУ приводится к эквивалентной системе, которая имеет те же свойства, что и СЛАУ, возникающая в случае решения задачи рассеяния для аналогичной  $E$ -плоскостной конфигурации. Это дает возможность интерпретировать преобразованную систему в качестве операторного уравнения фредгольмового типа

в пространстве последовательностей  $l_1^{(3)}$ , а также подобно [4] показать, что для почти всех значений частотного параметра  $\omega > 0$  рассматриваемая СЛАУ разрешима единственным образом и ее решение может быть найдено методом редукции, сходящимся по норме названного пространства.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Математические модели в прикладных проблемах механики и электродинамики» (номер гос. регистрации 0112U005342).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ващенко В. В. О выборе представления поля для базовой треугольной области в задачах моделирования  $H$ -плоскостных волноводных узлов / В. В. Ващенко, В. П. Чумаченко // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 5–9.
2. Chumachenko V. P. A GSM analysis of E-plane waveguide junctions filled with piecewise homogeneous dielectric / V. P. Chumachenko, V. V. Vashchenko // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2012. – Vol. 25, No. 2. – P. 163–174.
3. Chumachenko V. P. Properties of some matrix operators appearing in the theory of planar waveguide junctions / V. P. Chumachenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, No. 6. – P. 469–484.
4. Онуфрієнко Л. М. К обоснованию одной математической модели плоского соединения трех волноводов. Часть I.  $E$ -плоскостная задача / Л. М. Онуфрієнко, В. П. Чумаченко, Я. В. Чумаченко // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – №3(34). – С. 7–14.
5. Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region / V. P. Chumachenko // Electronics Letters. – 2001. – Vol. 37, No. 19. – P. 1164–1165.
6. Шестопалов В. П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур / В. П. Шестопалов. – Киев : Наукова думка, 1987. – 288 с.
7. Chumachenko V. P. On linear independence of some function systems appearing in the theory of plane wave fields / V. P. Chumachenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, No. 4. – P. 281–296.

Статья поступила в редакцию 20.05.2015.  
После доработки 18.06.2015.

Онуфрієнко Л. М.<sup>1</sup>, Чумаченко В. П.<sup>2</sup>, Чумаченко Я. В.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>2</sup>Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

<sup>3</sup>Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математичних методів в інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

## ДО ОБГРУНТУВАННЯ ОДНІЄЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЛОСКОГО З'ЄДНАННЯ ТРЬОХ ХВИЛЕВОДІВ. ЧАСТИНА II. $H$ -ПЛОЩИННА ЗАДАЧА

В роботі запропонована і обґрунтована математична модель  $H$ -площинного з'єднання трьох хвилеводів з областю зв'язку довільної трикутної форми. Задача розсіювання хвилеводних мод формулюється у вигляді крайової задачі для рівняння Гельмгольца з однорідними межовими умовами Дирихле на контурі конфігурації, умовами випромінювання в хвилеводах та умовою на ребрі. Модель ґрунтується на зображенні шуканої компоненти поля всередині трикутної з'єднувальної порожнини в вигляді суми тригонометричних рядів, отриманих на основі методу добутку областей. Для покращення збіжності рядів, що використовуються, скорегований традиційний для цього методу вид розвинення по синусах. Вивчені характерні особливості нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь, яка виникає в ході розв'язування задачі. Показано, що після простої модифікації система приводиться до еквівалентної системи, яка має ті ж властивості, що і система, яка була досліджена в першій частині роботи при аналізі аналогічної  $E$ -площинної структури. Цей факт дозволив інтерпретувати систему перетворених рівнянь, як одне функціональне рівняння з фредгольмовим оператором в просторі

послідовностей  $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ , де  $l_1 \in$  простором абсолютно збіжних рядів, а також довести, що таке рівняння має єдиний розв'язок, який може бути знайдено методом редукції, збіжним за нормою  $l_1^{(3)}$ .

**Ключові слова:** хвилеводні неоднорідності, метод добуток областей, матрично-операторні рівняння.

Onufriyenko L. M.<sup>1</sup>, Chumachenko V. P.<sup>2</sup>, Chumachenko Ya. V.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Associate professor, Associate professor of department of higher mathematics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>2</sup>Dr.Sc., Professor, Head of department of higher mathematics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

<sup>3</sup>Ph.D., Associate professor, Associate professor of department of mathematical methods in engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

## ON JUSTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR A PLANAR JUNCTION OF THREE WAVEGUIDES. PART II.

### H-PLANE PROBLEM

In the paper, a mathematical model of an  $H$ -plane three-port waveguide junction with an arbitrary-triangular coupling cavity has been presented and justified. The problem of scattering of waveguide modes is formulated as a boundary-value problem for the Helmholtz equation with the homogeneous Dirichlet boundary conditions on the periphery of the unit, radiation conductions in the waveguides and with the edge condition. The model is based on a trigonometric-series representation of the sought-for field in the triangular connecting region, which is constructed using the domain-product technique. The conventional expansion is revised to improve convergence properties of the used sine series. Properties of the infinite set of linear algebraic equations, which arises in the course of solving the problem, are studied. After simple modification, the system of equations is turned into an equivalent system, which is of the same kind as the system examined in the first part of the paper in analyzing the similar  $E$ -plane structure. In the space  $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$  ( $l_1$  is the sequence space of absolutely convergent series), this fact allows to interpret the set of transformed equations as a single functional equation with the Fredholm operator and to prove that the derived equation has a unique solution, which can be found by means of the truncation method convergent in the norm of  $l_1^{(3)}$ .

**Keywords:** waveguide discontinuities, domain-product technique, matrix-operator equations.

### REFERENCES

1. Vashchenko V. V., Chumachenko V. P. O vy'bore predstavleniya polya dlya bazovoj treugol'noj oblasti v zadachax modelirovaniya  $H$ -ploskostny'x volnovodny'x uzlov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2010, No.1, pp. 5–9.
2. Chumachenko V. P., Vashchenko V. V. A GSM analysis of  $E$ -pane waveguide junctions filled with piecewise homogeneous dielectric, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2012, Vol. 25, No. 2, pp. 163–174.
3. Chumachenko V.P. Properties of some matrix operators appearing in the theory of planar waveguide junctions, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 6, pp. 469–484.
4. Onufriyenko L. M. Chumachenko V. P., Chumachenko Ya.V. K obosnovaniyu odnoj matematicheskoy modeli ploskogo soedineniya trex volnovodov. Chast' I.  $E$ -ploskostnaya zadacha, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, No. 3 (34), pp. 7–14
5. Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region, *Electronics Letters*, 2001, Vol. 37, No. 19, pp. 1164–1165.
6. Shestopalov V. P. Spektral'naya teoriya i vozbuzhdenie otkry'ty'x struktur. Kyiv, Naukova dumka, 1987, 288 p.
7. Chumachenko V. P. On linear independence of some function systems appearing in the theory of plane wave fields, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2015, Vol. 74, No. 4, pp. 281–296.

# МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 539.3

Мастиновский Ю. В.

*Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной математики, Запорожский национальный технический университет, г. Запорожье, Украина*

#### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕРМОУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ДЕМПФИРУЮЩИХ ПОКРЫТИЙ В РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЕ

Создание новых многослойных покрытий узлов и блоков радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), эффективно демпфирующих действие термомеханических нагрузок ударного типа, требует разработки новых удобных для инженерной практики математических моделей. Предлагаемая в данной работе математическая модель и методика расчета позволяет исследовать прохождение и отражение термоупругих волн в многослойном теле, возбуждаемых нестационарным магнитным полем на границе электропроводящего слоя. Также рассматривается задача оценки относительного влияния объемных сил, вызванных действием магнитного поля в электропроводящем неферромагнитном слое на процесс распространения термоупругих волн в полимерных компаундах. Принимается, что скорость распространения тепла конечна. Вводятся допущения, упрощающие полностью связанную систему магнитотермоупругих уравнений, которые позволяют для получения конкретных результатов применить численное решение с использованием метода характеристик. Указывается способ нахождения искомых величин в узловых точках границы раздела слоев. Предлагаемая математическая модель и методика расчета дает возможность, не внося существенных изменений в вычислительную схему, проводить численные эксперименты по исследованию демпфирующих свойств многослойных покрытий с различными геометрическими и механическими параметрами в условиях заданных термомеханических нагружений. Данная методика расчета многослойных разнородных термоупругих конструкций может быть использована для выявления областей, наиболее расположенных к повреждениям.

**Ключевые слова:** магнитное поле, термоупругость, демпфирующее покрытие, напряжения, метод характеристик.

#### НОМЕНКЛАТУРА

$a$  – коэффициент температуропроводности;  
 $c$  – скорость упругой волны;  
 $c_1, c_2$  – безразмерные скорости;  
 $c_v$  – удельная теплоемкость при постоянной деформации;  
 $E$  – модуль упругости;  
 $f$  – составляющая объемной силы;  
 $g$  – объемная плотность теплового потока;  
 $J$  – плотность электрического тока;  
 $p_0$  – интенсивность нормальной сжимающей силы;  
 $\bar{q}$  – плотность теплового потока;  
 $T$  – приращение температуры;  
 $T_0$  – начальная температура;  
 $u$  – осевое напряжение;  
 $W$  – удельная мощность источников тепла;

$x, t$  – осевая координата и время, соответственно;  
 $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения;  
 $\beta$  – безразмерная составляющая магнитного поля;  
 $\varepsilon$  – коэффициент связности;  
 $\Theta$  – безразмерная температура;  
 $\kappa$  – теплопроводность;  
 $\lambda, \mu$  – упругие постоянные Ляме;  
 $\mu_0$  – магнитная проницаемость;  
 $\nu$  – коэффициент Пуассона;  
 $\xi, \tau$  – безразмерные координата и время, соответственно;  
 $\rho$  – плотность;  
 $\sigma$  – безразмерное напряжение;  
 $\sigma_0$  – удельная электрическая проводимость;  
 $\sigma_x$  – напряжение;  
 $\tau_0$  – время релаксации теплового потока.

## ВВЕДЕНИЕ

Интенсивные механические воздействия при эксплуатации РЭА являются причиной нарушения контактов, коротких замыканий, механических и других видов поломок аппаратуры.

Одним из способов защиты РЭА от вибраций и ударов является заливка блоков или узлов различного рода демпфирующими полимерными компаундами. Демпфирующие свойства этих компаундов зависят от вида механических нагрузок и температуры. При проектировании демпфирующих покрытий возникает необходимость оценки относительного влияния объемных сил, вызванных вихревыми токами в элементах РЭА, на процесс образования и распространения термоупругих волн. Целью данной работы является разработка математической модели и методики расчета демпфирующей способности многослойных конструкций в зависимости от различных геометрических и механических параметров слоев при действии нестационарных нагрузок.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача магнитотермоупругости сформулирована для двухслойной конструкции, представляющей собою два линейно-упругих изотропных скрепленных между собой слоя толщины  $h_1$  и  $h_2$ , имеющих различные механические характеристики. В области  $x < 0$  создается нестационарное магнитное поле, параллельное плоскости  $x = 0$ , которая является внешней границей первого слоя, материал которого обладает конечной проводимостью без магнитной или электрической поляризации. Считаем, что магнитное поле известно при  $x = 0$ ,  $t > 0$ . Таким образом, все неизвестные величины будут зависеть только от  $x$  и  $t$ , и, соответственно, возникнут лишь напряжения  $\sigma_{xx} \equiv \sigma_x(x, t)$ , перемещения  $u_x \equiv u(x, t)$  и температура  $T \equiv T(x, t)$ . Составляющие магнитного и электрического полей при  $x > 0$  имеют проекции на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$ :  $\vec{B} = (0, 0, B(x, t))$  и  $\vec{E} = (0, E(x, t), 0)$ .

Второй слой не является электропроводящим, и поэтому составляющие магнитного и электрического полей полагаем равными нулю.

Если решается термоупругая задача, то к поверхности  $x = 0$  прикладываются нормальные сжимающие силы и (или) подводится тепловой поток. Предполагается, что поверхности двухслойной полосы ( $x = 0$  и  $x = h_1 + h_2$ ) теплоизолированы, с изменением температуры в рассматриваемых материалах упругие свойства сохраняются, и что скорость распространения тепла конечна.

Исходной системой уравнений [1, 2] являются уравнения Максвелла и обобщенного закона Ома для определения электромагнитного поля, закон Дюамеля-Неймана – для упругого поля и обобщенное уравнение теплопроводности Фурье для определения температурного поля. Эти уравнения образуют замкнутую систему и являются основными уравнениями магнитотермоупругости.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ публикаций по нестационарной магнитотермоупругости показывает, что при моделировании процесса «магнитной деформации» обычно пренебрегают

термоупругими напряжениями, а в задачах о деформациях при действии лазера рассматривают лишь эффекты термоупругости и абляции [3–5].

В задачах демпфирования колебаний РЭА необходимо учитывать влияние нестационарного магнитного поля на упругую деформацию, обусловленную нагревом тела. Магнитотермоупругие задачи рассматривались [5–7] при различных допущениях о связности упругого, электромагнитного и температурного полей, чаще всего для полубесконечных тел и тел со сферической и цилиндрической симметрией. Решения получены, в основном, с помощью интегральных преобразований. Известны [7, 8] несколько приближенных решений инженерных задач, касающихся термоупругих решений в пластинах и стержнях. В настоящее время наблюдается все возрастающее количество публикаций, в которых рассматриваются связанные задачи термоупругости для многослойных конструкций [7]. Это связано, в частности, с важными задачами разработки и создания демпфирующих композитных материалов с заданными характеристиками.

Имеющиеся в литературе аналитические решения динамических термоупругих задач часто настолько громоздки, что без числовых расчетов не представляется возможным провести оценку напряженного состояния конструкции. Обзор публикаций по обозначенной проблеме показывает, что связанные с ней вопросы разработаны еще недостаточно, в частности отсутствует удобная для инженерной практики модель и методика расчета прикладных магнитотермоупругих задач.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основные уравнения для поставленной задачи, а также соответствующие определяющие соотношения имеют вид [1, 5, 6]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} &= f, \\ c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} + \alpha T_0 (3\lambda + 2\mu) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} - \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} &= g, \\ \sigma_x &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} - \alpha (3\lambda + 2\mu) T, \\ \frac{\partial E}{\partial x} + \frac{\partial B}{\partial t} &= 0, \quad -\frac{\partial B}{\partial x} = \mu_0 J, \\ J &= \sigma_0 \left( E - B \frac{\partial u}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Проведем некоторые преобразования и упрощения системы (1). Обобщенное уравнение теплопроводности Фурье получено при неявном предположении, что скорость распространения теплоты является бесконечно большой. При исследованиях высокоскоростных нестационарных процессов, например, при тепловых ударах необходимо учитывать, что теплота распространяется хоть и с очень большой, но конечной скоростью  $V$  [9]:

$$V = (\kappa / (c_v \rho \tau_0))^{1/2},$$

где  $\tau_0$  – время релаксации теплового потока (постоянная времени).

Подставляя значение плотности теплового потока

$$q_x = -\kappa \frac{\partial T}{\partial x} - \tau_0 \frac{\partial q_x}{\partial x}$$

в уравнение баланса теплоты для одномерной задачи

$$c_v \rho \frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial q_x}{\partial x} + W, \quad (2)$$

получим гиперболическое уравнение переноса теплоты. Если удельная мощность источников тепла  $W = 0$ , то уравнение (2) запишется так

$$c_v \rho \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \tau_0 \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} \right) = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}.$$

Сравнивая с классическим законом теплопроводности Фурье, видим, что при конечной скорости распространения тепла в уравнении теплопроводности следует

заменить  $\frac{\partial T}{\partial t}$  на сумму  $\frac{\partial T}{\partial t} + \tau_0 \frac{\partial^2 T}{\partial t^2}$ .

В результате система уравнений (1), связывающая  $\sigma_x$ ,  $T$ ,  $B$ , принимает вид

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial t^2} = \alpha \rho \frac{1+v}{1-v} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} + \frac{1}{2\mu_0} \cdot \frac{\partial^2 B^2}{\partial x^2}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{1}{V^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial t^2} = \frac{1}{a} (1+\varepsilon) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\alpha T_0}{\kappa} \cdot \frac{1+v}{1-v} \cdot \frac{\partial \sigma_x}{\partial t} + \frac{1}{\kappa \mu_0 \sigma_0} \left( \frac{\partial B}{\partial x} \right)^2, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - \mu_0 \sigma_0 \frac{\partial}{\partial x} \left( B \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \mu_0 \sigma_0 \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (5)$$

Здесь  $c^2 = (\lambda + 2\mu)/\rho$ ;  $a = \kappa/c_v$ ;  $V^2 = a/(\rho\tau_0)$ ;

$$\varepsilon = \frac{\alpha^2 T_0 (3\lambda + 2\mu)^2}{c_v (\lambda + 2\mu)} = \frac{(1+v)\alpha^2 E T_0}{(1-v)(1-2\nu)c_v}.$$

Для упрощения системы связанных уравнений (3)–(5) опустим нелинейный член в уравнении Максвелла для магнитной индукции (5). Такое упрощение справедливо, если  $B$  не зависит от деформаций и температуры. Таким образом, магнитная индукция удовлетворяет уравнению диффузии

$$\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} = \sigma_0 \mu_0 \frac{\partial B}{\partial t}. \quad (6)$$

Решение уравнения (6) известно [5] и для случая ступенчатого задания на границе  $x = 0$

$$B(0, t) = \begin{cases} B_0, & t \geq 0, \\ 0, & t < 0, \end{cases}$$

магнитная индукция в полупространстве  $x \geq 0$  определяется выражением

$$B(x, t) = B_0 \operatorname{erfc}(mx), \quad (7)$$

где  $m = \frac{1}{2}(\mu_0 \sigma_0 / t)^{1/2}$ .

Используя известные соотношения для функции ошибок [8], найдем:

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\frac{2B_0 m}{\sqrt{\pi}} \cdot e^{-m^2 x^2}.$$

Таким образом, магнитная индукция в данной модели превращается в источник возмущений в связанных уравнениях термоупругости.

Вводя в уравнения (3), (4) безразмерные величины

$$\xi = \frac{cx}{a}; \quad \tau = \frac{c^2 t}{a}; \quad \Theta = \alpha T; \quad \sigma = \frac{(1-2\nu)\sigma_x}{E} = \frac{\sigma_x}{3\lambda + 2\mu};$$

$$\beta = \frac{B}{B_0}; \quad \gamma = \frac{B_0^2}{2\mu_0} \cdot \frac{1-2\nu}{E}; \quad \varphi = \frac{\alpha B_0^2}{\kappa c_v}, \quad k = a\mu_0\sigma_0; \quad c_1^2 = 1;$$

$$c_2^2 = \frac{V^2}{c^2}, \quad \text{получаем для рассматриваемой задачи следующую систему уравнений:}$$

ющую систему уравнений:

$$\frac{\partial^2 \sigma}{\partial \xi^2} - \frac{1}{c_1^2} \cdot \frac{\partial^2 \sigma}{\partial \tau^2} = \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \tau^2} + \gamma \frac{\partial^2 \beta^2}{\partial \xi^2}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial \xi^2} - \frac{1}{c_2^2} \cdot \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \tau^2} = (1+\varepsilon) \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} + \varepsilon \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} + \varphi \left( \frac{\partial \beta}{\partial \xi} \right)^2 \quad (9)$$

с начальными условиями

$$\sigma = \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} = \Theta = \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = 0 \quad \text{при } \tau = 0, \quad \xi > 0 \quad (10)$$

и граничными условиями

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = 0, \quad \beta = \begin{cases} 1, & \tau \geq 0, \\ 0, & \tau < 0 \end{cases} \quad \text{при } \xi = 0; \quad \sigma = 0 \quad \text{при } \xi = 1. \quad (11)$$

В общем случае температурное поле должно удовлетворять условиям конвекции. Однако в данной работе конвекция на поверхности  $\xi = 0$  принята равной нулю. Магнитная индукция, входящая в уравнения (8), (9) определяется с помощью выражений

$$\beta = \operatorname{erfc} \left( \frac{\xi}{2} \cdot \sqrt{\frac{k}{\tau}} \right), \quad \frac{\partial \beta}{\partial x} = -\sqrt{\frac{k}{\pi \tau}} \exp \left( -\frac{k}{4} \cdot \frac{\xi}{\tau} \right).$$

Неизвестные величины и параметры, соответствующие механическим свойствам определенного слоя 1 или 2, в дальнейшем при необходимости будут отмечены нижним индексом  $i$  ( $i = 1, 2$ ).

Если слой не является электропроводящим, то в системе (8), (9) полагаем  $\beta = 0$  и рассматриваем термодинамическую задачу с начальными условиями (10), граничными механическими

$$\sigma = -p_0 f(\tau) \quad \text{при } \xi = 0; \quad \sigma = 0 \quad \text{при } \xi = 1 \quad (12)$$

и граничными тепловыми условиями

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = q\varphi(\tau) \quad \text{при } \xi = 0; \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \xi} = 0 \quad \text{при } \xi = 1. \quad (13)$$

Здесь  $q = -\bar{q}$ ,  $\bar{q}$  – плотность теплового потока в направлении внешней нормали к поверхности  $\xi = 0$ ;  $f(\tau)$  и  $\varphi(\tau)$  – заданные законы изменения нагрузок.

Кроме того, учитываются условия согласования на границе сопряжения слоев, которые заключаются в равенстве напряжений и смещений, температур и потоков тепла.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Аналитические решения динамических задач термоупругости настолько громоздки [4, 7, 8], что без численных расчетов провести оценку напряженного состояния исследуемого объекта становится невозможно. В данной работе для решения системы гиперболических уравнений второго порядка (8)–(11) применяется прямое численное решение с использованием метода характеристик. В замкнутом виде получены уравнения характеристик и характеристические соотношения. Семейства характеристик системы (8), (9) и соотношения на них определяются следующими равенствами:

– вдоль  $\frac{d\xi}{d\tau} = \pm 1$ , выполняются соотношения

$$\pm d\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\xi}\right) \pm \gamma \frac{\partial^2\beta^2}{\partial\xi^2} d\xi - d\left(\frac{\partial\sigma}{\partial\tau}\right) = 0,$$

– вдоль  $\frac{d\xi}{d\tau} = \pm c_2$ , выполняются соотношения

$$d\left(\frac{\partial\Theta}{\partial\tau}\right) \mp c_2 d\left(\frac{\partial\Theta}{\partial\xi}\right) \pm c_2 \left( (1+\varepsilon) \frac{\partial\Theta}{\partial\tau} + \varepsilon \frac{\partial\sigma}{\partial\tau} + \varphi \left( \frac{\partial\beta}{\partial\xi} \right)^2 \right) d\xi = 0.$$

Для проведения расчетов в области слоев 1 и 2 строится сетка, образованная семейством характеристик  $d\xi/d\tau = \pm 1$  (принимается  $c = \max\{c_1, c_2\}$ ). Фактически это необходимо, поскольку другие характеристические линии имеют более крутой наклон. Для вычислений неизвестных во внутренних узлах сетки и на границе используется стандартная процедура [10, 11]. Решение в точках контакта различных слоев строится следующим образом [12]. Формально, точка, принадлежащая линии раздела слоев, рассматривается как бы состоящей из двух точек: одна из них принадлежит слою 1, другая – слою 2. Когда точка принадлежит слою 1, исключается интегрирование вдоль характеристик, проходящих вне слоя 1. С другой стороны, эта точка принадлежит слою 2, и с ней поступают аналогично, как в предыдущем случае. Полученные равенства дополняются условиями контакта. С подробностями численного интегрирования вдоль сетки характеристик можно ознакомиться в работах [10, 11].

#### 5 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проверки работы математической модели и вычислительной схемы проведены расчеты поставленной задачи для тела с механическими и теплофизическими свойствами, соответствующими алюминию:  $c = 6,32 \cdot 10^3$  м/с;  $\tau_0 = 10^{-11}$  с;  $\varepsilon = 3,56 \cdot 10^{-2}$ ;  $k = 4,13 \cdot 10^{-3}$ ;

$$n = 2\alpha(3\lambda + 2\mu)/(\sigma_0\mu_0\kappa) = 800.$$

## 6 РЕЗУЛЬТАТЫ

Расчеты показали, что вихревые токи в алюминии вызывают сжимающие напряжения, а термоупругие напряжения распространяются в виде волн растяжения-сжатия. Термоупругие волны вызывают скачок напряжений, связанный со скачком температуры на границе. Решения для полупространства по связанной и несвязанной теориям в начальные моменты времени мало отличаются друг от друга. Лишь с течением времени влияние термического взаимодействия становится заметным.

## 7 ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматривался также случай действия теплового удара. Результаты вычислений для слоя из стали и слоя из полимерного материала, механические и теплофизические свойства которых приводятся в книге [8], хорошо согласуются с результатами [6, 8]. Для двухслойной конструкции из рассматриваемых материалов нагрузки (12), (13) задавались в виде

$$f(\tau) = \tau/\exp(\tau), \text{ а } \varphi(\tau) = 0.$$

Безразмерная ширина первого слоя равна 0,5, а второго – 0,125. Коэффициенты  $\varepsilon_1 = 0,0114$ ,  $\varepsilon_2 = 0,482$ . Для  $\tau_0 = 10^{-9}$  [с] скорость  $c_2 = 0,03$ . Полученные распределения напряжений по толщине двухслойной конструкции для различных моментов времени показали, что головная часть волны сжатия при переходе через поверхность раздела  $\xi = 0,5$  частично отражается и распространяется при  $\tau > 0,5$  в первом слое как волна растяжения.

## ВЫВОДЫ

Как и следовало ожидать, область сопряжения составляющих разнородной полосы наиболее предрасположена к повреждениям, так как вблизи поверхности соединения составляющих конструкции термоупругие волны напряжения в процессе отражения дифракции испытывают конечный разрыв и становятся растягивающими.

Предложенная математическая модель и методика расчета термоупругого деформирования конструкций, вызванного действием нестационарного магнитного поля, позволяют, не меняя вычислительной схемы для внутренних узлов сетки, получить конкретные результаты для различных начальных и граничных условий, т.е. проводить численные эксперименты. Варьируя геометрические и механические параметры, можно в условиях заданных нагрузок на основе анализа проходящих и отраженных термоупругих волн подбирать материалы с необходимыми демпфирующими характеристиками.

Результаты численных расчетов для частных случаев согласуются с данными, полученными другими методами [5–7].

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в Запорожском национальном техническом университете в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы «Разработка математических моделей и методик исследования механических систем под действием сложных нагрузок» (НДР 04612 ДР 0112U5348).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Партон В. З. Методы математической теории упругости / В. З. Партон, П. И. Перлин. – М. : Наука. Главн. ред. физ.-матем. лит., 1981. – 588 с.



- Селезов И. Т. Нестационарные и нелинейные волны в электропроводящих средах / И. Т. Селезов, С. В. Корсунский. – Киев : Наукова думка, 1991. – 200 с.
- Шамровский А. Д. Термоупругие волны и скорость их распространения в динамической задаче взаимосвязанной термоупругости / А. Д. Шамровский, Г. В. Меркотян // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Выпуск № 7 (53), том 5. – С. 41–45.
- Bala Kiran. A Review of Two-Temperature Thermo-Elasticity / Kiran Bala // International Journal of Modern Engineering Research (IJMER). – 2012. – Vol. 2, Issue 6. – pp. 4224–4227.
- Moon F. C. Magnetically induced stress waves in a conducting solid – theory and experiment / F. C. Moon, S. Chattopadhyay // Transactions of the ASME. – 1974. – 41, Ser. E, № 3. – P. 641–646.
- El-Bary A. A. Numerical Solution of Electro-magneto-thermo-mechanic Shock Problem / A. A. El-Bary // Computational Methods in Science and Technology. – 2006. – Vol. 12 (2) – pp. 101–108.
- Ezzat M. Generalized magneto-thermo-elasticity in a perfectly conducting medium / M. Ezzat, H. Youssef // International Journal of Solids and Structures. – 2005. – Vol. 42. – pp. 6319–6334.
- Коваленко А. Д. Термоупругость. / А. Д. Коваленко // Киев : Вища школа, 1975. – 216 с.
- Беляев Н. М. Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. Ч. 1. – М. : Высш. школа, 1982. – 237 с.
- Сагамонян А. Я. Волны напряжений в сплошных средах / А. Я. Сагамонян // М.: Изд-во МГУ – 1985 – 416 с.
- Chou P. C. A Unified Approach One-Dimensional Elastic Waves by the Method of Characteristics / P. C. Chou, R. W. Mortimer // Journal of Applied Mechanics. – 1967. – Vol. 34, No. 3 – pp. 745–750.
- Данильченко Д. В. Нестационарные волны в составной цилиндрической оболочке / Д. В. Данильченко, Ю. В. Мاستиновский // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. – № 1. – С. 105–107.

Статья поступила в редакцию 20.10.2015.

После доработки 25.10.2015.

Мастиновський Ю. В.

Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри прикладної математики, Запорізький національний технічний університет, м. Запоріжжя, Україна

#### МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НЕСТАЦІОНАРНОГО ТЕРМОПРУЖНОГО ДЕФОРМУВАННЯ БАГАТОШАРОВИХ ДЕМПФУЮЧИХ ПОКРИТТІВ У РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

Створення нових багатошарових покриттів вузлів і блоків радіоелектронної апаратури (РЕА), що ефективно демпфують дію термомеханічних навантажень ударного типу, вимагає розробки нових зручних для інженерної практики математичних моделей. Запропонована в даній роботі математична модель і методика розрахунків дозволяє досліджувати проходження і відбиття термопружних хвиль у багатошаровому тілі, що збуджуються нестационарним магнітним полем на межі електропровідного шару. Також розглядається задача оцінки відносного впливу об'ємних сил, спричинених дією магнітного поля в електропровідному шарі на процес розповсюдження хвиль в полімерних компаундах. Швидкість розповсюдження тепла вважається скінченною. Вводяться припущення, що спрощують повністю зв'язану систему магнетотермопружних рівнянь, котрі дозволяють для отримання конкретних результатів застосувати числове розв'язання з використанням методу характеристик. Вказано спосіб знаходження шуканих величин у вузлових точках межі поділу шарів. Запропонована математична модель та методика розрахунку дає можливість, не вносячи суттєвих змін у розрахункову схему, проводити числові експерименти з дослідження демпфувальних якостей багатошарових покриттів з різними геометричними і механічними параметрами в умовах заданих термомеханічних навантажень. Дана методика розрахунку багатошарових покриттів різнірідних термопружних конструкцій може бути використана для виявлення ділянок, найбільш схильних до пошкодження.

**Ключові слова:** магнітне поле, термопружність, демпфувальні покриття, напруження, метод характеристик.

Mastinovsky Y. V.

PhD, Associate Professor, Head of Applied Mathematics Department, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine

#### MATHEMATICAL MODEL OF NON-STATIONARY THERMO-ELASTIC DEFORMATION OF MULTILAYER DAMPING COATINGS IN ELECTRONICS

Generation of new multilayer coatings of units and blocks in electronics for effective damping of thermo-mechanical impact loads requires the development of mathematical models suitable for engineering practice. Mathematical model and calculation method proposed in this paper allows investigate the passing and reflection of thermo-elastic waves in a multilayer body excited by non-stationary magnetic field at the conductive layer boundary. Also, the problem of estimating relative influence of volume forces induced by the magnetic field in the electrically conductive non-ferromagnetic layer on the wave propagation in thermo-elastic polymer compounds was considered. It is assumed that the velocity of heat propagation is finite. Assumptions are introduced to simplify the fully coupled system of magneto-thermo-elastic equations that allow applying the numerical solution based on the method of characteristics for obtaining concrete results. A method for finding required quantities at the nodal points of the boundary between the layers is indicated. The suggested mathematical model and calculation method makes it possible, without making any significant changes in the computing system, to carry out numerical experiments on researching the damping properties of multilayer coatings with different geometrical and mechanical parameters under the conditions of the thermo-mechanical loadings. This calculation method of heterogeneous multilayer thermo-elastic structures can be used to identify the areas most disposed to the damage.

**Keywords:** magnetic field, thermo-elasticity, damping coatings, stresses, method of characteristics.

#### REFERENCES

- Parton V. Z. Metody magnitnoy teoriiy uprugosty. Moscow, Nauka. Glavn. red. phys.- mat. lit., 1981, 588 p.
- Selezov I. T. Nestatsionarnyye i nelineynyye volny v elektroprovodyaschikh sredakh. Kiev, Naukova dumka, 1991, 200 p.
- Shamrovskiy A. D., Maekjtyan G. V. Termouprugyye volny i skorost ikh rasprostraneniya v dinamicheskoy zadache vzaimosvyazannoy termouprugosti, *Vostochno-yevropeiskiy zhurnal peredovykh technologiy*. 2011, Vypusk № 7 (53), Vol. 5, pp. 41–45.
- Bala Kiran A Review of Two-Temperature Thermoelasticity, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2012, Vol. 2, Issue 6, pp. 4224–4227.
- Moon F. C., Chattopadhyay S. Magnetically induced stress waves in a conducting solid – theory and experiment, *Transactions of the ASME*, 1974, 41, Ser. E, No. 3, pp. 641–646.
- El-Bary A. A. Numerical Solution of Electro-magneto-thermo-mechanic Shock Problem, *Computational Methods in Science and Technology*, Vol. 12 (2), 2006, pp. 101–108.
- Ezzat M., Youssef H. Generalized magneto-thermo-elasticity in a perfectly conducting medium, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, 2005, pp. 6319–6334.
- Kovalenko A. D. Termouprugost. Kiev, Vyscha shkola, 1975, 216 p.
- Belyayev N. M., Ryadno A. A. Metody teoriiy termouprugosty. V 2-kh chastyakh. Ch.1. Moscow, Vyssh. Shkola, 1982, 237 p.
- Sagamonyan A. Y. Volny napryazheniy v sploshnykh sredakh. Moscow, Izd-vo MGU, 1985, 416 p.
- Chou P. C., Mortimer R. W. A Unified Approach One-Dimensional Elastic Waves by the Method of Characteristics, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 34, No. 3, 1967, pp. 745–750.
- Danilchenko D. V., Mastinovsky Y. V. Nestatsionarnyye volny v sostavnoy tsilindricheskoy obolochke, *Novi materialy i technologiyi v metallurhiyi ta mashinobuduvanni*. Zaporizhzhya, ZNTU, 2004, No. 1, pp. 105–107.

## ФОРМАЛЬНА МОДЕЛЬ СЛОВОЗМІНИ ІМЕННИКІВ ПОЛЬСЬКОЇ МОВИ

При створенні електронних засобів навчання актуальним питанням є формалізація знань для їх наочного подання та спрощення їх обробки. Формальний опис граматики, зокрема словозміни, наявний у сучасних засобах обробки природної мови, лише фіксує існуючі граматичні форми слів, однак не аналізує процесу їх утворення, що необхідно для цілей вивчення мови.

У статті запропоновано підхід до формалізації словозміни польської мови (на прикладі іменників) шляхом виділення найпростіших перетворень у процесі словозміни. Проведено відбір слів згідно з частотним словником польської мови. Сформовано еталонну таблицю граматичних форм для визначеного набору слів. Описано окремі перетворення при словозміні іменників, і з їх допомогою проведено моделювання процесу утворення словоформ із еталонної таблиці. Одержані в результаті моделювання ланцюжки перетворень для кожного слова збережено в базі даних.

Отримані ланцюжки дозволяють крок за кроком описати утворення граматичних форм слів. За рахунок цього забезпечується наочність подання процесу словозміни для студентів, що вивчають мову. Крім того, можливий автоматичний підбір слів, у яких відбувається те чи інше граматичне явище, для формування навчальних вправ, прикладів і тестових завдань.

**Ключові слова:** граматика, електронні засоби навчання, комп'ютерна лінгвістика, модель мови, морфологія, обробка природної мови.

### НОМЕНКЛАТУРА

БД – база даних;

ГФ – граматична форма.

### ВСТУП

Сучасна інформатизація освіти вимагає розроблення нових підходів до процесу навчання. Аби повною мірою розкрити потенціал інформаційних технологій, змін має зазнати не лише форма подання, а й внутрішня структура навчального матеріалу. Знання в електронних засобах навчання повинні бути формалізовані таким чином, щоби зробити їх більш наочними, а побудову окремих елементів навчання – легкою. Це можна реалізувати за рахунок детальної декомпозиції предметної області, виділивши базові елементи знання та відношення між ними.

Для польської мови, вивчення якої набуває в Україні дедалі більшої популярності, досі бракує електронних засобів навчання, які б забезпечували набуття системних знань щодо застосування граматичних правил. Польська, як і інші флективні мови, має багату словозміну, а тому при її вивченні особливої ваги набуває граматика. Тож актуальним є питання, як краще формалізувати знання в цій предметній області. Розроблення навчальної системи, що базується на моделі мови, дозволило би зробити вивчення граматики простішим та наочнішим, а керування процесом навчання – гнучкішим і ефективнішим.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Метою розроблення моделі словозміни польської мови є покроковий опис цього процесу в зрозумілому та наочному вигляді. Також повинна забезпечуватись можливість автоматичного підбору слів, у яких при словозміні відбуваються ті чи інші явища, для генерації навчальних вправ, прикладів і тестових завдань із граматики.

### 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Проблему формалізації граматики природних мов досліджували А. Залізняка, А. Ранта [1], І. Шевченко, В. Широков [2] та ін. Питанням формалізації граматики

польської мови займалися зокрема М. Волінський [3], Р. Волош, В. Ґрушинський, І. Новак-Коморовська, З. Салоні [4], А. Сляський, Я. Токарський.

При моделюванні граматики флективних мов, до яких відноситься і польська, логічним є почати цей процес із формального опису морфології, або словозміни. Інформація про утворення різних ГФ слів на сьогоднішній день доступна для багатьох мов, для яких розроблено електронні граматичні словники та засоби морфологічного аналізу. Зокрема існує ряд моделей, які у формальному вигляді описують словозміну польської мови. Вони дозволяють ефективно розв'язувати задачі морфологічного аналізу та синтезу. Тим не менше, існуючі зараз моделі морфології польської мови, які використовуються у граматичних та орфографічних словниках і морфологічних аналізаторах, не пристосовані до цілей навчання мови. Для опанування граматики іноземної мови необхідно не просто завчити певну кількість словоформ, а й розуміти суть того, що відбувається при їх утворенні. Наявні ж моделі лише описують, а не пояснюють процес словозміни.

В електронних граматичних словниках для різних мов можна побачити опис морфології, формалізований відповідно до задач цих програмних засобів. У подібних лексикографічних системах інформація про словозміну традиційно зберігається у реляційних базах даних. В основу реляційної моделі покладено поділ слів на парадигматичні класи. Слова класифікуються та групуються за типами відмінювання, і в окремих таблицях (за частинами мови) зберігаються набори закінчень ГФ для кожного з типів. Реляційна модель була використана зокрема при створенні граматичного словника української мови [2], а також при створенні граматичного словника польської мови SGJP, автори якого прагнули до повного моделювання польської словозміни [4]. Реляційна модель дійсно дозволяє врахувати й описати всі тонкощі словозміни польської мови, будучи при цьому уніфікованою та відносно компактною [3], проте поділ слів на велику кількість парадигматичних класів утруднює роботу з моделлю, а також не дає можливості побачити законо-

мірності утворення тих чи інших ГФ. Співрозробники за-  
собу обробки природної мови PoliMorf, які при створенні  
свого ПЗ використовували SGJP в якості джерела даних,  
також відзначають як його ваду те, що внутрішня організа-  
ція даних у цьому словнику є досить складною [5]. Взагалі,  
за словами А. Ранга, у традиційній парадигматичній мо-  
делі немає точного визначення самої парадигми та її зас-  
тосування [1]. Таким чином, моделювання граматики з  
виділенням парадигматичних класів за зовнішніми озна-  
ками словозміни, на якому базуються сучасні електронні  
лексикографічні системи, не враховує специфіки, прита-  
манної процесу вивчення іноземної мови.

Засоби морфологічного аналізу для польської мови  
(наприклад, [6]) містять списки всіх словоформ для де-  
сятків і сотень тисяч слів разом із мітками їхніх грамати-  
чних значень (відмінок іменника, час дієслова тощо) і да-  
ють змогу працювати з великими обсягами слів та відпо-  
відних ГФ. Однак пояснення самого процесу їх утворення  
тут також відсутнє.

Словник для перевірки орфографії ispell містить файл  
із описом шаблонів словозміни та словотвору. З його  
допомогою можна згенерувати всі можливі ГФ для слів,  
що містяться у словнику. Кожне слово має один чи де-  
кілька «прапорців» – міток, яким у допоміжному файлі  
відповідають правила утворення цілої парадигми чи її  
частини. Через регулярні вирази описано формальні  
умови для автоматичної розмітки прапорцями початко-  
вих форм слів. Шаблони супроводжуються коментарями  
та прикладами слів, які підпадають під описані зразки.  
Проте в кожному шаблоні наводиться лише перелік усіх  
нетотожних ГФ без розмітки за граматицими значення-  
ми, які вони виражають.

Подібна ситуація спостерігається і при формалізації  
граматики інших флективних мов. Основними задачами  
при моделюванні словозміни є морфологічний аналіз і  
синтез для машинного перекладу, пошуку інформації в  
мережі Інтернет тощо. Для ефективного розв'язання цих  
завдань достатньо лише фіксації кінцевих ГФ слів без ана-  
лізу процесу їх утворення. Через це розглянуті моделі  
важко використовувати у процесі навчання у зв'язку з  
його специфікою.

### 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

З метою наочного подання та пояснення процесу сло-  
возміни польської мови нами було розпочато розроблен-  
ня нової моделі. При моделюванні словозміни було вирі-  
шено декомпонувати цей процес до якомога простіших  
елементів, виділивши так звані елементарні перетворення  
– окремі зміни в написанні слова при утворенні ГФ, такі  
як додання, вилучення або заміну літери чи послідовної  
групи літер. Комбінації цих перетворень повинні дозволя-  
ти утворити будь-яку ГФ слова від початкової.

Моделювання словозміни іменників польської мови  
через елементарні перетворення проводилось наступним

чином. Спершу було визначено початковий обсяг слів,  
словозміну яких моделюватиме наша система. З метою  
подальшої перевірки точності моделі, що розробляється,  
було створено еталонну таблицю (табл. 1), де для кожного  
слова мають зберігатися всі його ГФ. БД було наповнено  
словоформами іменників, витягнутими автоматично  
(з допомогою розробленого алгоритму) зі словника мор-  
фологічного аналізатора польської мови Morfologik [6].

Далі було досліджено процес утворення похідних ГФ  
іменників від початкових. На основі інформації з підруч-  
ників і граматицих довідників польської мови було про-  
ведено декомпозицію цього процесу з метою виділення  
елементарних перетворень.

Моделювання процесу словозміни проходило ітерац-  
ійно в напіваавтоматичному режимі. Спершу формально  
описувались окремі елементарні перетворення. Після цього  
через спеціально розроблений інтерфейс додання лан-  
цюжків перетворень проводилися спроби змоделювати  
утворення ГФ слова від початкової. Якщо введена вручну  
послідовність перетворень приводила до утворення ГФ,  
записаної в еталонній таблиці, такий успішний ланцюжок  
додавався до БД. Якщо ж перетворень, описаних досі, було  
недостатньо, описувались нові перетворення, після чого  
спроби моделювання повторювались. При наступних іте-  
раціях система спочатку перебирала вже наявні в БД лан-  
цюжки, і лише в разі неуспіху відбувалося введення по-  
слідовності перетворень вручну.

Таким чином було отримано ланцюжки перетворень  
для всіх ГФ визначеного набору слів. Ланцюжки було  
також записано в БД до окремої таблиці.

### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

При визначенні початкового набору іменників для  
моделювання словозміни було використано частотний  
словник [7], з якого вибрано 1000 найбільш частотних  
слів польської мови. Серед них виявилось 356 іменників.

Інформацію про явища, що відбуваються при утво-  
ренні ГФ, було взято з підручників польської мови, зок-  
рема [8] і [9]. Елементарні перетворення було описано як  
окремі методи мовою програмування C# із використан-  
ням регулярних виразів.

ГФ слів, інформацію про елементарні перетворення  
та їхні ланцюжки було збережено з допомогою СУБД  
SQLite.

### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

У підсумку для визначеного набору іменників було  
отримано 75 перетворень, які позначено та згруповано  
наступним чином (табл. 2).

У табл. 3 наведено збережені в БД ланцюжки пере-  
творень для слова «życie» при утворенні різних відмінків  
однини. Перетворення T002 відповідає відкиданню закін-  
чення *-e*, а T006, T012, T024 – доданню закінчень *-a*,  
*-em*, *-u* відповідно.

Таблиця 1 – Фрагмент еталонної таблиці ГФ іменників

ID	SgN	SgG	SgD	...	SgV	PIN	...	PIV
353	żal	żału	żałowi	...	żału	żale	...	żale
354	żołnierz	żołnierza	żołnierzowi	...	żołnierzu	żołnierze	...	żołnierze
355	żona	żony	żonie	...	żono	żony	...	żony
356	życie	życia	życiu	...	życie	życia	...	życia

Таблиця 2 – Елементарні перетворення для 356 найчастотніших іменників польської мови

Тип	Група	Елементарні перетворення
1	відкидання закінчення	-a, -e, -ę, -o, -um
2	додання закінчення	+a, +a, +ach, +ami, +e, +ego, +em, +emu, +e, +i, +im, +mi, +o, +om, +oma, +owi, +owie, +ów, +u, +y, +yma
3	додання суфіксу	+ci, +ni, +on
4	випадіння голосної	-(e-)
5	вставка голосної	+(-e-), +(-y-)
6	чергування звуку або послідовної групи звуків	a→e, a→ę, c→cz, ch→sz, czśc→czć, ćc→c, d→dź, dszcz→dźdź, dz→ż, dźń→dń, el→oł, e→a, e→e, g→dz, g→ż, k→c, k→cz, ł→l, o→e, o→ó, ó→o, r→rz, rz→r, s→ś, śl→śł, sn→śń, st→ść, t→ć, z→ż, zn→źń, -(i-), +(-i-)
7	зміна позначення звуку на письмі	ci→ć, ć→ci, i→j, ii→i, -(j-), ni→ń, ń→ni, ś→si, zi→ż, ź→zi
8	зміна основи слова	-

Таблиця 3 – Фрагмент таблиці ланцюжків елементарних перетворень для іменників

NounID	GM	Chain
356	SgG	T002T006
356	SgD	T002T024
356	SgI	T002T012
356	SgL	T002T024

## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані ланцюжки перетворень при утворенні ГФ іменників показують крок за кроком, як саме відбувається процес словозміни. Таке подання процесу словозміни є більш наочним і зрозумілим, ніж таблиці ГФ, що містяться в електронних граматичних словниках, і може бути використане при створенні електронних засобів навчання граматики.

По-перше, на основі наведеної моделі може бути створено довідник зі словозміни, де для кожної ГФ відображатиметься відповідний ланцюжок перетворень із необхідними коментарями.

По-друге, з таблиці ланцюжків елементарних перетворень через SQL-запити можна проводити вибірку саме тих слів, у яких відбувається конкретне чергування звуків, випадання голосних, додання певного закінчення тощо. При створенні навчального курсу це дасть змогу автоматично генерувати приклади, вправи і тестові завдання відповідно до теми заняття. Крім того, за умови використання в системі достатньо великого словника, розміченого за сферами використання лексики, слова можна буде підбирати залежно від потреб і зацікавлень конкретного студента. Це забезпечуватиме індивідуалізацію процесу навчання.

Вибірка всіх слів, до яких застосовуються певні перетворення, може бути корисною не лише при наповненні електронних курсів, а й при підготовці викладачами звичайних (паперових) контрольних завдань і прикладів, а також для подальшого аналізу процесів, що відбуваються в мові, фахівцями з філології.

## ВИСНОВКИ

Описаний підхід до формалізації словозміни польської мови, на відміну від існуючих, дозволяє не лише синтезувати ГФ слів, а й пояснювати цей процес крок за кро-

ком за рахунок його декомпозиції до найпростіших елементів. Це уможливило створення на основі поданої моделі електронних засобів навчання граматики, що надаватимуть системні знання про словозміну. Предметом подальшого дослідження є моделювання словозміни інших частин мови, аналіз і опис закономірностей застосування окремих перетворень, а також створення електронного засобу навчання на основі розробленої моделі.

## ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках наукових досліджень кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій на тему «Нові інформаційні технології в освіті».

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Ranta A. How Predictable is Finnish Morphology: An Experiment in Lexicon Construction : CLT Seminar, 25 September 2008 [Electronic resource] / Aarne Ranta, 2008. – 64 p. – Access mode: [www.cse.chalmers.se/~aarne/talks/finnish-2008.pdf](http://www.cse.chalmers.se/~aarne/talks/finnish-2008.pdf).
- Широков В. А. Елементи лексикографії: моногр / В. А. Широков; Укр. мов. інформ. фонд НАН України. – К.: Довіра, 2005. – 304 с.
- Woliński M. A Relational Model of Polish Inflection in Grammatical Dictionary of Polish / M. Woliński // Human Language Technology: Challenges of the Information Society. – Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2009. – P. 96–106.
- Słownik gramatyczny języka polskiego / [Z. Saloni, W. Gruszczycski, M. Woliński, R. Wołosz]. – Warszawa : Wiedza Powszechna, 2008. – 180 p.
- PoliMorf – otwarty słownik morfologiczny : prezentacja [Electronic resource] / M. Wolicki, M. Miłkowski, M. Ogrodniczuk [et al]. – Warszawa : IPI PAN, 2011. – 44 p. – Access mode : <http://nlp.ipipan.waw.pl/NLP-SEMINAR/111205.pdf>.
- Morfologik v. 2.0 [Electronic resource]. – 2013. – Access mode : <http://sourceforge.net/projects/morfologik/files/morfologik/2.0>.
- Kazojć J. Słownik frekwencyjny leksemów V.06.2009 [Electronic resource]. – 2009. – Access mode : <http://www.slowniki.org.pl/slownik-frekwencyjny-leksemow.pdf>.
- Василевская Д. Учебник польского языка / Данута Василевская, Станислав Кароляк. – СПб.: Лань, 2001. – 576 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
- Практический курс польского языка. Базовый учебник / [Я. А. Крогоская, Л. Г. Кашкуевич, Г. М. Лесная, Н. В. Селиванова]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: АСТ, 2005. – 559 с.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2015.

Після доробки 30.10.2015.

Костиков Н. П.

Ассистент кафедры информационных систем Национального университета пищевых технологий, Киев, Украина

### ФОРМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СЛОВОИЗМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВИТЕЛЬНЫХ ПОЛЬСКОГО ЯЗЫКА

При создании электронных средств обучения актуальным вопросом является формализация знаний для их наглядного представления и упрощения их обработки. Формальное описание грамматики, в частности словоизменения, существующее в современных

средствах обработки естественного языка, только фиксирует грамматические формы слов, однако не анализирует процесса их образования, что необходимо для целей изучения языка.

В статье предложен подход к формализации словоизменения польского языка (на примере существительных) путем выделения простейших преобразований в процессе словоизменения. Проведен отбор слов согласно с частотным словарем польского языка. Сформирована эталонная таблица грамматических форм для выделенного набора слов. Описаны отдельные преобразования при словоизменении существительных, и с их помощью проведено моделирование процесса образования словоформ из эталонной таблицы. Полученные в результате моделирования цепочки преобразований для каждого слова сохранены в базе данных.

Полученные цепочки позволяют шаг за шагом описать образование грамматических форм слов. За счет этого обеспечивается наглядность представления процесса словоизменения для студентов, изучающих язык. Кроме того, возможен автоматический подбор слов, в которых происходит то или иное грамматическое явление, для формирования учебных упражнений, примеров и тестовых заданий.

**Ключевые слова:** грамматика, компьютерная лингвистика, модель языка, морфология, обработка естественного языка, электронные средства обучения.

Kostikov M. P.

Teaching assistant, Information Systems department, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine

#### A FORMAL MODEL OF POLISH NOUNS INFLECTION

An urgent problem when creating e-learning software is knowledge formalization for its further processing and visual presentation. A formal description of grammar, in particular inflection, presented in modern means of natural language processing, only enumerates the existing grammatical forms without analyzing the process of their production, which is important for the purposes of language learning.

The approach to Polish inflection formalization (by the example of nouns) which consists in separating out the basic elements of inflection process is proposed in the presented paper. The selection of words according to the frequency dictionary of Polish is performed. The standard table of grammatical forms for the selected words is formed. Individual transformations in the process of nouns inflection are described. With the help of the described transformations, the modeling of word forms generation process is performed. The resulting chains of transformations for each word are saved into a database.

The obtained chains allow of describing the process of inflection step-by-step. It makes the knowledge presentation to the language students more clear and visual. Besides, the automatic selection of words which go through certain transformations is possible for the purposes of generating learning exercises, examples, and test questions.

**Keywords:** computational linguistics, computer-assisted language learning, grammar, language model, morphology, natural language processing.

#### REFERENCES

1. Ranta A. How Predictable is Finnish Morphology: An Experiment in Lexicon Construction : CLT Seminar, 25 September 2008 [Electronic resource], 2008, 64 p. Access mode : [www.cse.chalmers.se/~aarne/talks/finnish-2008.pdf](http://www.cse.chalmers.se/~aarne/talks/finnish-2008.pdf).
2. Shyrovkov V. A. Elementy leksykohrafi : monohr. Ukrainian Lingua-Information Fund, NAS of Ukraine. Kiev, Dovira, 2005, 304 p.
3. Woliński M. A Relational Model of Polish Inflection in Grammatical Dictionary of Polish, *Human Language Technology: Challenges of the Information Society*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2009, pp. 96–106.
4. Zygmunt Saloni, Włodzimierz Gruszczyński, Marcin Woliński, Robert Wołosz Siownik gramatyczny jkzyka polskiego. Warszawa, Wiedza Powszechna, 2008, 180 p.
5. Marcin Woliński, Marcin Miłkowski, Maciej Ogrodniczuk [et al.]. PoliMorf – otwarty siownik morfologiczny : prezentacja [Electronic resource]. Warszawa, IPI PAN, 2011, 44 p. Access mode : <http://nlp.ipipan.waw.pl/NLP-SEMINAR/111205.pdf>.
6. Morfologik v. 2.0 [Electronic resource], 2013, Access mode : <http://sourceforge.net/projects/morfologik/files/morfologik/2.0>.
7. Kazojć J. Słownik frekwencyjny leksemów V.06.2009 [Electronic resource], 2009, Access mode : <http://www.slowniki.org.pl/slownik-frekwencyjny-leksemow.pdf>.
8. Danuta Vasilevskaya, Stanislav Karolyak Uchebnik pol'skogo yazyka. Sankt-Peterburg, Lan', 2001, 576 p.
9. Krotovskaya Ya. A., Kashkurevich L. G., Lesnaya G. M., Selivanova N. V. Prakticheskij kurs pol'skogo yazyka. Bazovyy uchebnik. 2nd ed. Moscow, AST, 2005, 559 p.

## МЕЖСТАТЕЙНЫЕ МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ АНАЛИЗА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Установлено, что недостатком известных метрик качества на уровне статей является то, что они характеризуют свойства отдельных статей без учета их связи с другими публикациями, недостатком метрик на уровне авторов – то, что они не учитывают взаимосвязь публикаций разных авторов, а метрик на уровне журналов – то, что они неприменимы для отдельных статей и для отдельных ученых. Впервые предложен комплекс межстатейных метрик научных публикаций, позволяющих количественно оценивать свойства научных публикаций, содержащий метрики, учитывающие взаимосвязь статей и их лексику, метрики, учитывающие цитируемость и лексику статей, а также метрики на уровне авторов и метрики на уровне журналов, позволяющие устранить недостатки известных метрик. Использование предложенных метрик позволяет автоматизировать анализ и сравнение научных публикаций и периодических изданий.

**Ключевые слова:** автоматизация, наукометрия, библиометрия, качество, статья, научная публикация, метрика, анализ цитируемости, важность статьи.

### НОМЕНКЛАТУРА

$annot_p$  –  $p$ -е слово из словаря аннотации  $i$ -й публикации;  
 $aut(paper_j)$  – функция, возвращающая список кодов (номеров) авторов  $j$ -й публикации в базе публикаций  $Base$ ;

$Base$  – набор научных публикаций (статей, тезисов, диссертаций, авторефератов и т.п.);

$constr$  – ограничения на журналы и временные периоды их издания;

$d_j^{rev}$  – дата получения редакцией доработанной версии  $j$ -й публикации от автора;

$d_j^{rec}$  – дата получения редакцией исходной версии  $j$ -й публикации от автора;

$d_j^{pub}$  – дата публикации (выхода журнала) доработанной версии  $j$ -й публикации;

$el_{ji}$  – формальное обозначение  $i$ -го элемента  $j$ -й работы;

$f_{ji}$  – частота  $j$ -го слова из словаря  $V_i$  в тексте  $i$ -й публикации;

$h_{k \rightarrow i}$  – коэффициент, характеризующий наименьший уровень иерархии ссылок по которым от  $i$ -й публикации можно перейти к  $k$ -й публикации (т. е.  $i$ -я публикация содержит ссылку на  $k$ -ю публикацию непосредственно или через ссылки на другие публикации в базе  $Base$ );

$I_{i,j}^*$  – условное обозначение показателя влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию;

$is_k^b$  – функция, возвращающая значение “1”, если  $k$ -й журнал входит в  $b$ -ю базу, и “0” – в противном случае;

$I_j^q$  –  $q$ -й показатель качества  $j$ -й публикации;

$\hat{I}_p^t$  – максимальный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$ ;

$\check{I}^{qt}$  – минимальный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$ ;

$jrn_k$  – множество индексов (номеров) статей, опубликованных в  $k$ -м журнале за период времени  $t$ ;

$lat_i$  – широта места (города) издания (или написания)  $i$ -й публикации;

$lon_i$  – долгота места (города) издания (или написания)  $i$ -й публикации;

$N$  – число научных работ в базе;

$N'$  – число публикаций, удовлетворяющих ограничениям  $constr$ ;

$N_{aut}$  – общее число авторов в базе;

$N_{elj}$  – число элементов  $j$ -й работы;

$N_i$  – объем словаря  $i$ -й публикации – общее число слов (включая повторы) в тексте  $i$ -й публикации;

$N_{ij}$  – число раз, которое  $j$ -е слово из словаря  $V_i$  встречается в тексте  $i$ -й публикации в любой форме;

$N_{iss}$  – число статей, опубликованных в соответствующем номере журнала;

$N_{jrn}$  – общее число журналов в базе;

$N_{*k}^{pu}$  – общее число публикаций из  $k$ -го журнала за все годы;

$N_{jrn_k}^t$  – общее число статей, опубликованных в  $k$ -м журнале за период времени  $t$ ;

$N_{annot_i}$  – размер словаря аннотации  $i$ -й публикации;

$N_{text_i}$  – размер словаря аннотации  $i$ -й публикации;

$N_b^{pu}$  – число публикаций в  $b$ -й наукометрической базе;

$N_{b,k}^{pu}$  – число публикаций из  $k$ -го журнала в  $b$ -й наукометрической базе;

$N_b^{jr}$  – число наименований сериальных и продолжающихся изданий в  $b$ -й базе;

$N_{ref_j}$  – число ссылок в перечне ссылок  $j$ -й публикации;

$paper_j$  –  $j$ -я научная работа;

$Q$  – набора показателей качества, характеризующих свойства публикации  $paper_j$ ;

$q(p)$  – номер публикации в базе  $Base$  для  $p$ -й ссылки в перечне источников  $i$ -й публикации (т.е.  $i$ -я публикация содержит ссылку на  $k$ -ю публикацию);

$ref(j)$  – ссылка на  $j$ -ю публикацию;

$R_j$  – набор ссылок в перечне источников  $j$ -й публикации;  
 $syn(v_i)$  – функция, возвращающая список слов-синонимов для слова  $v_i$ , а также их переводы (с их синонимами) на все доступные языки публикаций в базе  $Base_2$ ;  
 $t$  – период времени;  
 $text_j$  – словарь текста  $j$ -й публикации;  
 $time$  – функция, возвращающая год, том, номер для публикации-аргумента;  
 $t_j$  – временная характеристика выхода  $j$ -й публикации;  
 $V_i$  – словарь  $i$ -й публикации;  
 $\rho$  – штрафной коэффициент.

## ВВЕДЕНИЕ

Для автоматизации анализа и сравнения научных публикаций необходимо использовать метрики качества – показатели, позволяющие количественно оценивать свойства публикаций.

Программная реализация метрик качества в интеграции с базой научных публикаций могут обеспечить автоматизацию анализа отдельных публикаций, их групп, периодических изданий, содержащих публикации, а также влияния авторов публикаций на другие работы.

Известные метрики качества научных публикаций [1–18], как правило, характеризуют свойства отдельных статей без учета их связи с другими публикациями и дают лишь внешнюю оценку использования материала публикации, не учитывают взаимосвязь публикаций разных авторов и неприменимы для отдельных статей и для отдельных ученых.

Целью данной статьи являлась разработка комплекса показателей, позволяющих устранить недостатки известных метрик на уровне статей, авторов и журналов.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем набор научных публикаций (статей, тезисов, диссертаций, авторефератов и т.п.)  $Base = \{paper_j\}, j = 1, 2, \dots, N, paper_j = \{el_{ji}\}, i = 1, 2, \dots, N_{elj}$ .

Тогда задача оценивания качества научной публикации  $paper_j$  по базе  $Base$  заключается в определении набора показателей  $Q = \{I_j^q\}$ , характеризующих свойства публикации  $paper_j$ .

Показатели качества публикации разделим на абсолютные – те, которые определены в исходных единицах измерения, а также относительные – те, которые соотносены со значениями соответствующих показателей других статей.

## 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Известные показатели [1–17], характеризующие научные публикации, можно классифицировать как метрики на уровне статей [1] (характеризуют свойства отдельных статей без учета их связи с другими публикациями и дают лишь внешнюю оценку использования материала статьи), метрики на уровне журналов [3, 8, 15–17] (характеризуют статьи, опубликованные за определенный период в одном журнале) и метрики на уровне авторов [9–17] (характеризуют влияние авторов на научные публикации, имеющиеся в базе).

Недостатки известных метрик на уровне статей [1] частично устраняются в предложенном автором комплексе индивидуальных метрик качества, дающих внут-

ренние оценки представления статьи, учитывающие их лексику и библиографию, соответствие их структуры международным стандартам [18]. Нерешенной задачей является разработка показателей, характеризующих свойства отдельных публикаций с учетом их связи с другими публикациями по библиографии, цитируемости, времени, пространству, лексике, а также создание групповых показателей качества для наборов публикаций.

Недостатком метрик на уровне авторов [9–17] является то, что они не учитывают взаимосвязь публикаций разных авторов, а метрик на уровне журналов [3, 8, 15–17] – то, что они неприменимы для отдельных статей и для отдельных ученых.

Поэтому актуальной является задача устранения данных недостатков известных групп метрик.

## 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе набора публикаций в базе  $Base$  определим межстатейные показатели, отражающие взаимосвязь публикаций и их влияние друг на друга.

Показатель цитируемости  $j$ -й публикации в базе  $Base$  за период времени  $t$  определим по формуле (1):

$$I_{cit_j} = \frac{\sum_{k=1}^N \{1 | t_j \in t, ref(j) \in R_k\}}{\max_{p=1,2,\dots,N} \left\{ \sum_{k=1}^N \{1 | ref(p) \in R_k\} \right\}}. \quad (1)$$

Показатель (1) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более цитируемой в базе является публикация по сравнению с другими публикациями в той же базе.

Показатель прямого влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию определим по формуле (2):

$$I_{infl}(i, j) = \begin{cases} 0, & ref(i) \notin R_j; \\ 1, & ref(i) \in R_j. \end{cases} \quad (2)$$

Показатель (2) будет принимать значение “1” если в перечне ссылок  $j$ -й публикации имеется ссылка на  $i$ -ю публикацию (если явно указана взаимосвязь публикаций), и “0” – в противном случае.

Определить рекурсивную функцию  $hierarchy$  с начальным значением уровня иерархии  $h_0=0$  для получения показателя  $h_{k \rightarrow i}$ .

Функция  $h_{k \rightarrow i} = hierarchy(k, i, h_0)$ : если  $\exists p, p=1, \dots, |R_i|$ :  $ref(q(p))=ref(k)$ , то вернуть:  $h_{k \rightarrow i} = h_0 + 1$ , в противном случае: если  $\neg \exists p, p=1, \dots, |R_i|$ :  $paper_{q(p)} \in Base$  (т.е. в базе  $Base$  отсутствуют публикации, на которые ссылается  $i$ -я публикация), тогда вернуть:  $h_{k \rightarrow i} = 0$ , в противном случае для каждого  $p$ -го элемента из набора ссылок  $i$ -й публикации,  $p=1, \dots, |R_i|$  определить кортеж  $h_{k \rightarrow q} = hierarchy(k, q(p), h_0+1)$ , после чего определить:  $z = \arg \min_{p=1,2,\dots,|R_i|} \{h_{k \rightarrow q(p)}\}$ , а затем вернуть  $h_{k \rightarrow i} = h_{k \rightarrow q(z)}$ .

На основе введенных коэффициентов определим показатель косвенного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю пуб-

ликацию по формуле (3):

$$I_{indifl}(i, j) = \begin{cases} 1, ref(i) \in R_j; \\ 0, h_{i \rightarrow j} = 0; \\ \frac{1}{h_{i \rightarrow j}}, ref(i) \notin R_j, h_{i \rightarrow j} > 0. \end{cases} \quad (3)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: значение показателя (3) будет тем больше, чем короче и прямее связь  $i$ -й и  $j$ -й публикаций в базе *Base*.

На практике многие публикации основываются на результатах предшествующих им работ. При этом авторы чаще склонны использовать публикации последних лет, содержащие более свежие результаты. Поэтому на конкретную публикацию большее воздействие имеют шанс оказывать непосредственно предшествующие ей по времени публикации.

Временной потенциал прямого возможного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию определим по формуле (4):

$$\Phi_{i,j}^t = \begin{cases} 0, t_i \geq t_j; \\ \frac{1}{t_j - t_i}, t_i < t_j. \end{cases} \quad (4)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: значение показателя (4) будет тем больше, чем более близкими по времени издания являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что  $i$ -я публикация опубликована раньше  $j$ -й публикации.

Объединив показатель прямого влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию (2) и временной потенциал прямого возможного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию (4), получим временной потенциал прямого влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию, определяемый по формуле (5):

$$I_{i,j}^{t,inf} = I_{infl}(i, j) \Phi_{i,j}^t. \quad (5)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более близкими по времени издания являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что  $i$ -я публикация опубликована раньше  $j$ -й публикации и в перечне ссылок  $j$ -й публикации имеется ссылка на  $i$ -ю публикацию (явно указана взаимосвязь публикаций).

Временной потенциал косвенного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию оценим как (6):

$$I_{i,j}^{t,indifl} = I_{indifl}(i, j) \Phi_{i,j}^t. \quad (6)$$

Показатель (6) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более близкими по времени издания являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что  $i$ -я публикация опубликована раньше  $j$ -й публикации и по ссылкам от  $j$ -й публикации можно перейти по базе *Base* к  $i$ -й публикации (неявная связь пуб-

ликаций). Причем чем меньше будет длина пути от  $j$ -й публикации к  $i$ -й, тем больше будет значение показателя.

Наряду со временем издания на публикации может оказывать влияние место их издания или написания. Очевидно, что на авторы некоторой публикации могут быть лучше знакомы с публикациями своих коллег, работающих в том же городе или стране, либо же публикующих публикации в одном с ними журнале.

Пространственный потенциал прямого возможного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию определим по формуле (7):

$$\Phi_{i,j}^g = e^{-6,372 \arccos(\sin(lat_i)\sin(lat_j) + \cos(lat_i)\cos(lat_j)\cos(lon_i - lon_j))}. \quad (7)$$

Заметим, что значения северной широты и восточной долготы считают положительными, а значения южной широты и западной долготы – отрицательными. Для определения координат мест издания можно руководствоваться данными [19].

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: значение показателя (7) будет тем больше, чем более близкими по расстоянию между местами издания (написания) являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации.

Объединив показатель прямого влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию (2) и пространственный потенциал прямого возможного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию (7), получим пространственный потенциал прямого влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию, определяемый по формуле (8):

$$I_{i,j}^{g,inf} = I_{infl}(i, j) \Phi_{i,j}^g. \quad (8)$$

Показатель (8) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более близкими по месту издания являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что в перечне ссылок  $j$ -й публикации имеется ссылка на  $i$ -ю публикацию (явно указана взаимосвязь публикаций).

Пространственный потенциал косвенного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию зададим как (9):

$$I_{i,j}^{g,indifl} = I_{indifl}(i, j) \Phi_{i,j}^g. \quad (9)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: значение показателя (9) будет тем больше, чем более близкими по расстоянию между местами издания (написания) являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что по ссылкам от  $j$ -й публикации можно перейти по базе *Base* к  $i$ -й публикации (неявная связь публикаций). Причем чем меньше будет длина пути от  $j$ -й публикации к  $i$ -й, тем больше будет значение показателя.

Пространственно-временной потенциал возможного влияния  $i$ -й публикации на  $j$ -ю публикацию определим по формуле (10):

$$\Phi_{i,j}^{tg} = \Phi_{i,j}^t \Phi_{i,j}^g. \quad (10)$$

Показатель (10) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более близкими по времени издания являются  $i$ -я и  $j$ -я публикации, при условии, что  $i$ -я публикация опубликована раньше



$j$ -й публікації, і чим більше близькими по відстані між місцями видання (написання) являються  $i$ -я і  $j$ -я публікації.

Просторово-часовий потенціал прямого впливу  $i$ -ї публікації на  $j$ -ю публікацію визначимо по формулі (11):

$$I_{i,j}^{tg,inf} = I_{inf}(i,j) \varphi_{i,j}^{tg}. \quad (11)$$

Показатель (11) буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : його значення буде тим більше, чим більше близькими по часу видання являються  $i$ -я і  $j$ -я публікації, при умові, що  $i$ -я публікація опублікована раніше  $j$ -ї публікації, і чим більше близькими по відстані між місцями видання (написання) являються  $i$ -я і  $j$ -я публікації, при умові, що  $i$ -я публікація опублікована раніше  $j$ -ї публікації і в переліку посилань  $j$ -ї публікації існує посилання на  $i$ -ю публікацію (явно вказана взаємозв'язок публікацій).

Просторово-часовий потенціал косвенного впливу  $i$ -ї публікації на  $j$ -ю публікацію визначимо по формулі (12):

$$I_{i,j}^{tg,indifl} = I_{indifl}(i,j) \varphi_{i,j}^{tg}. \quad (12)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : значення показника (12) буде тим більше, чим більше близькими по часу видання, а також по відстані між місцями видання (написання) являються  $i$ -я і  $j$ -я публікації, при умові, що по посиланню від  $j$ -ї публікації можна перейти по базі *Base* до  $i$ -ї публікації (неявна зв'язок публікацій). Причому чим менше буде довжина шляху від  $j$ -ї публікації до  $i$ -ї, тим більше буде значення показника (12).

Аналіз взаємозв'язку публікацій і їх подоби по тематичності, очевидно, передбачає врахування їх лексики. При цьому слід врахувати варіативність лексики (синоніми), а також можливість написання публікацій на різних мовах.

Під словником тексту будемо розуміти набір слів, що містяться в тексті, представлених в нормалізованій формі (наприклад, іменнік і прикметники в однині числі і іменічному відмінку, дієсласи – в неопределенній формі і однині числі і т.п.) без повторень.

Показник точного співпадіння словників  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій визначимо по формулі (13):

$$I_{eq}(V_i, V_k) = \frac{\sum_{j=1}^{|V_i|} \sum_{p=1}^{|V_k|} \{1 | v_{ij} = v_{kp}\}}{|V_i| |V_k|}. \quad (13)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення даного показника, тим сильніше співпадають словники, чим менше – тим слабше.

Показник приблизного співпадіння словників  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій визначимо як (14):

$$I_{sim}(V_i, V_k) = \frac{\sum_{j=1}^{|V_i|} \sum_{p=1}^{|V_k|} \{1 | v_{ij} \in \text{syn}(v_{kp})\}}{|V_i| |V_k|}. \quad (14)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (14), тим сильніше співпадають словники з врахуванням синонімів і перекладів слів, чим менше – тим слабше.

Показник різниці частот (частотного точного неспівпадіння) лексики  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій визначимо по формулі (15):

$$I_{dfr}(V_i, V_k) = \frac{\sum_{j=1}^{|V_i|} \sum_{p=1}^{|V_k|} \{|f_{r_{ij}} - f_{r_{kp}}| | v_{ij} = v_{kp}\}}{\max\{|V_i|, |V_k|\}}. \quad (15)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (15), тим сильніше не співпадають частоти однакових слів в словниках, чим менше – тим слабше.

Сотверствено, визначимо показник частотного точного співпадіння лексики  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій, написаних на одній мові, як (16):

$$I_{fr}(V_i, V_k) = 1 - I_{dfr}(V_i, V_k). \quad (16)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (16), тим слабше не співпадають частоти однакових слів в словниках, чим менше – тим сильніше.

Показник приблизного частотного неспівпадіння лексики  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій з врахуванням синонімів і різних мов визначимо по формулі (17):

$$I_{dsfr}(V_i, V_k) = \frac{\sum_{j=1}^{|V_i|} \sum_{p=1}^{|V_k|} \{|f_{r_{ij}} - f_{r_{kp}}| | v_{ij} \in \text{syn}(v_{kp})\}}{\max\{|V_i|, |V_k|\}}. \quad (17)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (17), тим сильніше не співпадають частоти семантично еквівалентних слів (з врахуванням синонімів і перекладів) в словниках, чим менше – тим слабше.

Сотверствено, визначимо показник абсолютного частотного співпадіння лексики  $i$ -ї і  $k$ -ї публікацій з врахуванням синонімів і перекладів по формулі (18):

$$I_{sfr}(V_i, V_k) = 1 - I_{dsfr}(V_i, V_k). \quad (18)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (18), тим слабше не співпадають частоти семантично еквівалентних слів (з врахуванням синонімів і перекладів) в словниках, чим менше – тим сильніше.

Для більш комплексного аналізу взаємозв'язку публікацій і їх подоби цілорозумно врахувати їх взаємозв'язок через бібліографічні посилання, а також подоби їх лексики.

Обобщенний показник відповідності лексики анотацій літературних джерел лексиці тексту цитуємої їх публікації визначимо по формулі (19):

$$I_{artj} = \frac{1}{N_{refj}} \sum_{i=1}^{N_{refj}} \left( \frac{1}{N_{annoti}} \sum_{p=1}^{N_{annoti}} \{1 | \text{syn}(\text{annot}_{q(i)p}) \cap \text{text}_j \neq \emptyset\} \right). \quad (19)$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні  $[0, 1]$ : чим більше буде значення показника (19),

тем сильнее совпадает лексика текста  $j$ -й публикации и лексика аннотаций цитируемых ею публикаций.

Обобщенный показатель соответствия лексики текста литературных источников лексике текста цитирующей их публикации определим по формуле (20):

$$I_{irtj} = \frac{1}{N_{ref}} \sum_{i=1}^{N_{refj}} \left( \frac{1}{N_{texti}} \sum_{p=1}^{N_{texti}} \{1 | \text{syn}(\text{text}_{q(i)p}) \cap \text{text}_j \neq \emptyset\} \right). \quad (20)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : чем больше будет значение показателя (20), тем сильнее совпадает лексика текста  $j$ -й публикации и лексика аннотаций цитируемых ею публикаций.

Рассмотрим метрики на уровне авторов.

Число публикаций  $i$ -го автора в базе публикаций за период времени  $t$  определим как (21):

$$N_{Ai}^t = \sum_{j=1}^N \{1 | i \in \text{aut}(\text{paper}_j), t_j \in t\}. \quad (21)$$

Число ссылок на публикации  $i$ -го автора в базе публикаций за период времени  $t$  определим по формуле (22):

$$N_{Ai}^{cit,t} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \{1 | \text{ref}(k) \in R_j, i \in \text{aut}(\text{paper}_k), t_j \in t\}. \quad (22)$$

Число цитирований  $i$ -м автором собственных публикаций за период времени  $t$  в базе публикаций определим по формуле (23):

$$N_{Ai}^{sc,t} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \{1 | \text{ref}(k) \in R_j, i \in \text{aut}(\text{paper}_k), i \in \text{aut}(\text{paper}_j), t_j \in t\}. \quad (23)$$

На основе введенных показателей определим относительный показатель цитируемости публикаций  $i$ -го автора в базе публикаций за период времени  $t$  по формуле (24):

$$I_{citAi}^{rel,t} = \frac{N_{Ai}^{cit,t} - N_{Ai}^{sc,t}}{\max_{j=1,2,\dots,N_{aut}} \{N_{Aj}^{cit,t} - N_{Aj}^{sc,t}\}}. \quad (24)$$

Показатель (24) будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : его значение будет тем больше, чем большим автором цитат в базе.

Показатель прямого влияния публикаций  $i$ -го автора на публикации  $j$ -го автора за период времени  $t$  оценим по формуле (25):

$$I_{Ai \rightarrow Aj}^t = \frac{1}{\max\{N_{Ai}^t, N_{Aj}^t\}^2} \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \{1 | i \in \text{aut}(\text{paper}_k), j \in \text{aut}(\text{paper}_p), t_k \in t, t_p \in t, k \neq p, \text{ref}(k) \in R_p\}. \quad (25)$$

Показатель (25) будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : его значение будет тем больше, чем больше публикаций  $j$ -го автора ссылается на большее число публикаций  $i$ -го автора.

Показатель косвенного влияния публикаций  $i$ -го автора на публикации  $j$ -го автора за период времени  $t$  оценим по формуле (26):

$$I_{Ai \rightarrow Aj}^{indifl,t} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \{I_{indifl}(k,p) | i \in \text{aut}(\text{paper}_k), j \in \text{aut}(\text{paper}_p), t_k \in t, t_p \in t, k \neq p\}. \quad (26)$$

Показатель (26) будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : его значение будет тем больше, чем больше публикаций  $j$ -го автора ссылается на большее число публикаций  $i$ -го автора, либо чем к большему числу публикаций  $i$ -го автора можно перейти от публикаций  $j$ -го автора по цитируемым публикациям в базе.

Рассмотрим метрики на уровне журналов.

На основе каждого абсолютного показателя качества публикаций, опубликованных за определенный период (определяется годом, томом, номером / выпуском) в журнале, определим, соответственно:

– относительный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$  (27):

$$I_j^q = \frac{I_j^q}{\bar{I}^q}, \quad (27)$$

где средний показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$  оценим из (28):

$$\bar{I}^q = \frac{1}{N_{iss}} \sum_{j=1}^{N_{iss}} \{(I_j^q) | \text{time}(I_j^q) \in t\}; \quad (28)$$

– нормированный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$  (29):

$$\tilde{I}^{qt} = \frac{I^{qt} - \bar{I}^{qt}}{\bar{I}^{qt} - \tilde{I}^{qt}}. \quad (29)$$

где  $\tilde{I}^{qt}$  – минимальный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$  (30):

$$\tilde{I}^{qt} = \min_{j=1,2,\dots,N_{iss}} \{I_j^q | \text{time}(I_j^q) \in t\}, \quad (30)$$

$\hat{I}_p^t$  – максимальный показатель качества номеров (выпусков) журнала за период  $t$  (31):

$$\hat{I}_p^t = \max_{j=1,2,\dots,N_{iss}} \{I_j^q | \text{time}(I_j^q) \in t\}. \quad (31)$$

Общий показатель индексируемости  $k$ -го журнала по набору баз  $B$  определим по формуле (32):

$$I_B(k) = \frac{1}{N_B} \sum_{b=1}^{N_B} \omega_b \Psi_k^b, \quad (32)$$

$$\omega_b = \begin{cases} 0, N_b^{jr} = 0, N_b^{pu} = 0; \\ \frac{N_b^{jr}}{\max_{p=1,\dots,N_B} \{N_p^{jr}\}}, N_b^{jr} > 0, N_b^{pu} = 0; \\ \frac{N_b^{pu}}{\max_{p=1,\dots,N_B} \{N_p^{pu}\}}, N_b^{pu} > 0, \end{cases}$$

$$\Psi_k^b = \begin{cases} \frac{N_{b,k}^{pu}}{N_{*k}^{pu}}, is_k^b = 1, N_{b,k}^{pu} > 0; \\ is_k^b, N_{b,k}^{pu} = 0. \end{cases}$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]. Его значение будет тем больше, чем в большем числе баз представлен журнал и чем больше публикаций из журнала представлено в базах.

Показатель оперативности рецензирования и доработки публикаций в  $k$ -м журнале определим как (33):

$$I_o^{rew} = \frac{1}{N^r} \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{d_j^{rev} - d_j^{rec}} \mid j \in constr, d_j^{rev} > d_j^{rec}, paper_j \in jrn_k \right\}. \quad (33)$$

Данный показатель принимает значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет его значение, тем оперативнее рецензенты рассматривают публикации и быстрее авторы дорабатывают публикации в  $k$ -м журнале.

Показатель длительности рецензирования и доработки публикаций в  $k$ -м журнале определим из (34):

$$I_t^{rew} = 1 - I_o^{rew}. \quad (34)$$

Данный показатель принимает значения в диапазоне [0, 1]: чем меньше будет его значение, тем оперативнее рецензенты рассматривают публикации и быстрее авторы дорабатывают публикации в  $k$ -м журнале.

Показатель оперативности рассмотрения и обработки публикаций редакцией в  $k$ -м журнале оценим из (35):

$$I_o^{pub} = \frac{1}{N^r} \sum_{j=1}^N \left\{ \frac{1}{d_j^{pub} - d_j^{rec}} \mid j \in constr, d_j^{pub} > d_j^{rec}, paper_j \in jrn_k \right\}. \quad (35)$$

Показатель (35) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет его значение, тем оперативнее публикуются публикации в  $k$ -м журнале.

Показатель длительности рассмотрения и обработки публикаций редакцией определим как (36):

$$I_t^{pub} = 1 - I_o^{pub}. \quad (36)$$

Показатель (36) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем меньше будет его значение, тем оперативнее публикуются публикации в  $k$ -м журнале.

Обобщенно влияние  $i$ -й публикации на публикации в  $k$ -м журнале по некоторой категории показателей “\*\*\*” за определенный период времени  $t$  оценим по формуле (37):

$$I_{i,(k)}^* = \frac{1}{N_{jrn_k}^t} \sum_{j=1}^N \{I_{i,j}^* \mid paper_j \in jrn_k, t_j \in t\}, \quad (37)$$

где  $N_{jrn_k}^t$  определяется по формуле (38):

$$N_{jrn_k}^t = \sum_{j=1}^N \{1 \mid paper_j \in jrn_k, t_j \in t\}, \quad (38)$$

а в качестве  $I_{i,j}^*$  могут выступать  $I_{infl}(i, j)$ ,  $I_{indifl}(i, j)$ ,  $\Phi_{i,j}^t$ ,  $I_{i,j}^{t,infl}$ ,  $I_{i,j}^{t,indifl}$ ,  $\Phi_{i,j}^g$ ,  $I_{i,j}^{g,infl}$ ,  $I_{i,j}^{g,indifl}$ ,  $\Phi_{i,j}^{tg}$ ,  $I_{i,j}^{tg,infl}$ ,  $I_{i,j}^{tg,indifl}$ .

Показатель (37) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем больше в среднем значение показателей влияния публикаций на публикации в  $k$ -м журнале по заданной категории показателей за определенное время.

Обобщенно влияние  $k$ -го журнала на  $p$ -й журнал по некоторой категории показателей “\*\*\*” за определенный период времени  $t$  оценим по формуле (39):

$$I_{(k)(p)}^* = \frac{1}{N_{jrn_k}^t N_{jrn_p}^t} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \{I_{i,j}^* \mid paper_i \in jrn_k, paper_j \in jrn_p, t_i \in t, t_j \in t\}. \quad (39)$$

Показатель (39) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем больше в среднем значение показателей влияния публикаций, опубликованных в  $k$ -м журнале, по заданной категории показателей за определенное время на публикации, опубликованные в  $p$ -м журнале.

Показатель значимости  $k$ -го журнала в базе научных публикаций *Base* определим по формуле (40):

$$I_{jrn_k} = \frac{N_{jrn_k}^t \left( \sum_{j=1}^N \{I_{cit_j} \mid t_j \in t, paper_j \in jrn_k\} - N_{scj_k} \right)}{\max_{p=1,2,\dots,N_{jrn}} \left\{ N_{jrn_p}^t \right\} \max_{p=1,2,\dots,N_{jrn}} \left\{ \sum_{j=1}^N \{I_{cit_j} \mid t_j \in t, paper_j \in jrn_p\} - N_{scj_p} \right\}}. \quad (40)$$

Показатель (40) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем больше общее число статей, опубликованных в  $k$ -м журнале за период времени  $t$ , чем больше в базе имеется цитирований статей из  $k$ -го журнала и чем меньше имеется самоцитирований статей в  $k$ -м журнале.

Влияние публикаций автора на журнал охарактеризуем с помощью следующих показателей.

Число статей  $i$ -го автора, опубликованных в  $k$ -м журнале за период времени  $t$ , определим по формуле (41):

$$N_{A_i}^{jrn_k} = \sum_{j=1}^N \{1 \mid i \in aut(paper_j), t_j \in t, paper_j \in jrn_k\}. \quad (41)$$

Число цитирований статей  $i$ -го автора в  $k$ -м журнале за период времени  $t$  определим по формуле (42):

$$N_{A_i}^{cjk} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 \mid i \in aut(paper_q), ref(q) \in R_j, t_j \in t, paper_j \in jrn_k\}. \quad (42)$$

Число самоцитирования статей  $i$ -м автором в  $k$ -м журнале за период времени  $t$  оценим по формуле (43):

$$N_{scj_k} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 \mid ref(q) \in R_j, t_j \in t, paper_q \in jrn_k, paper_j \in jrn_k\}. \quad (43)$$

Число цитирований  $i$ -м автором в  $k$ -м журнале собственных статей из того же журнала за период времени  $t$  определим по формуле (44):

$$N_{A_i}^{sc_k} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 \mid \text{ref}(q) \in R_j, i \in \text{aut}(\text{paper}_q), i \in \text{aut}(\text{paper}_j), t_j \in t, \text{paper}_q \in \text{jrn}_k, \text{paper}_j \in \text{jrn}_k\}. \quad (44)$$

Число самоцитирований  $i$ -го автора в  $k$ -м журнале за период времени  $t$  определим по формуле (45):

$$N_{A_i}^{scjk} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 \mid \text{ref}(q) \in R_j, i \in \text{aut}(\text{paper}_q), i \in \text{aut}(\text{paper}_j), t_j \in t, \text{paper}_j \in \text{jrn}_k\}. \quad (45)$$

Показатель влияния (ценности)  $i$ -го автора на  $k$ -й журнал за период времени  $t$  оценим по формуле (46):

$$I_{A_i}^{jrn_k} = \left(1 - e^{-N_{A_i}^{jrn_k}}\right) \left(1 - e^{-\left(N_{A_i}^{cj_k} - \rho N_{A_i}^{scjk}\right)}\right), \quad (46)$$

где  $0 < \rho \leq 1$ . Значение  $\rho$  следует выбирать, исходя из того, что авторы с большой долей самоцитирования менее ценны для журнала. Например, можно рекомендовать принять  $\rho = 0,5$ .

Показатель (46) будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : его значение будет тем больше, чем больше число статей  $i$ -го автора, опубликованных в  $k$ -м журнале, чем больше цитирований статей  $i$ -го автора в  $k$ -м журнале, чем меньше самоцитирований  $i$ -го автора в  $k$ -м журнале.

Показатель значимости публикаций  $i$ -го автора в базе *Base* оценим по формуле (47):

$$I_{A_i} = \frac{I_{cit_{A_i}} \left( \sum_{j=1}^{N_{aut}} I_{A_i \rightarrow A_j} \right) \sum_{k=1}^{N_{jrn}} I_{A_i}^{jrn_k}}{\max_{j=1,2,\dots,N_{aut}} \left\{ \sum_{k=1}^{N_{aut}} I_{A_i \rightarrow A_j} \right\} \max_{j=1,2,\dots,N_{aut}} \left\{ \sum_{k=1}^{N_{jrn}} I_{A_j}^{jrn_k} \right\}}. \quad (47)$$

Показатель (47) будет принимать значения в диапазоне  $[0, 1]$ : его значение будет тем больше, чем цитирований статей  $i$ -го автора в базе, чем больше влияние  $i$ -го автора на публикации и журналы в базе.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Рассмотрим пример расчета чести предложенных показателей для искусственной базы, характеристики статей которых приведены в табл. 1–2. В табл. 1–2 коды цитируемых статей приведены относительно содержащихся в базе статей (остальные цитируемые источники опущены). Примем период времени  $t = 1990 - 1995$ .

Таблица 1 – Характеристики работ из экспериментальной базы публикаций

Код публикации	Коды авторов	Код журнала	Коды цитируемых статей	$d_j^{rev}$	$d_j^{rec}$	$d_j^{pub}$
P1	A1	J1	–	10.02.1990	19.10.1989	12.04.1990
P2	A2	J2	P1	27.11.1994	03.07.1994	28.01.1995
P3	A3	J1	P1, P2	12.03.1992	14.10.1991	23.05.1992
P4	A2, A4	J3	P3	06.12.2011	23.05.2011	16.02.2012

Таблица 2 – Характеристики журналов экспериментальной базы публикаций

Код журнала	Место издания	
	Широта	Долгота
J1	55°45'07" с.ш.	37°36'56" в.д.
J2	50°27'16" с.ш.	30°31'25" в.д.
J3	47°49'22" с.ш.	35°11'25" в.д.

#### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчета характеристик базы публикаций приведены в табл. 3, метрик качества уровня статей – в табл. 4, метрик уровня авторов – в табл. 5, уровня журналов – в табл. 6.

#### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных расчетов подтверждают работоспособность и практическую применимость предложенного комплекса метрик качества статей.

В отличие от известных известных метрик на уровне статей [1], предложенные метрики позволяют характеризовать свойства отдельных публикаций с учётом их связи с другими публикациям по библиографии, цитируемости, времени, пространству и лексике.

Таблица 3 – Общие характеристики экспериментальной базы публикаций

Метрика	Значение
$N$	4
$N_{aut}$	4
$N_{jrn}$	3
$N_{jrn_k}^t$	3

Таблица 4 – Метрики уровня статей

Метрика	Код публикации в базе			
	P1	P2	P3	P4
$I_{cit_j}$	1	0,5	0,5	0
$h_{k \rightarrow i} (i=1)$	0	1	1	2
$I_{infl}(i, j) (i=1)$	0	1	1	0
$I_{indifl}(i, j) (i=1)$	0	1	1	0,5
$\phi_{i,j}^t (i=1)$	0	0,000579374	0,00131406	0,000127162
$I_{i,j}^{t,infl} (i=1)$	0	0,000579374	0,00131406	0
$I_{i,j}^{t,indifl} (i=1)$	0	0,000579374	0,00131406	0,000063581
$\phi_{i,j}^g (i=1)$	1	0,469667632	1	0,408003307
$I_{i,j}^{g,infl} (i=1)$	0	0,469667632	1	0
$I_{i,j}^{g,indifl} (i=1)$	0	0,469667632	1	0,204002
$\phi_{i,j}^{tg} (i=1)$	0	0,00027211	0,00131406	0,00005188
$I_{i,j}^{tg,infl} (i=1)$	0	0,00027211	0,00131406	0
$I_{i,j}^{tg,indifl} (i=1)$	0	0,00027211	0,00131406	0,102001

Таблица 5 – Метрики уровня авторов

Метрика	Код автора в базе			
	A1	A2	A3	A4
$N_{A_i}^t$	1	1	1	0
$N_{A_i}^{cit,t}$	2	1	0	0
$N_{A_i}^{sc,t}$	1	0	0	0
$I_{A_i}^{rel,t}$	1	1	0	0
$I_{A_i \rightarrow A_j}^t (i=1)$	0	1	1	0

Таблица 6 – Метрики уровня журналов

Метрика	Код журнала в базе		
	J1	J2	J3
$I_O^{rew}$	0,007883	0,006944	0,005181
$I_t^{rew}$	0,992117	0,993056	0,994819
$I_O^{pub}$	0,005173	0,004878	0,003802
$I_t^{pub}$	0,994827	0,995122	0,996198
$N_{jrn_k}^t$	2	1	0
$I_{jrn_k}$	0,75	0,125	0
$N_{A_i}^{jrn_k} (i=1)$	1	0	0
$N_{A_i}^{cj_k} (i=1)$	0	1	0
$N_{scj_k} (i=1)$	0	0	0
$N_{A_i}^{sc_k} (i=1)$	0	0	0
$N_{A_i}^{scj_k} (i=1)$	0	0	0
$I_{A_i}^{jrn_k} (i=1)$	0	0	0
$I_{A_i} (i=1)$	0	0	0

В отличие от известных метрик на уровне авторов [9–17], предложенные метрики позволяют учитывать взаимосвязь публикаций разных авторов, а в отличие от известных метрик на уровне журналов [3, 8, 15–17], предложенные метрики могут применяться для отдельных статей и для отдельных ученых.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе решена задача разработки показателей для автоматизации анализа научных публикаций.

Впервые предложен комплекс межстатейных метрик научных публикаций, позволяющих количественно оценивать свойства научных публикаций, содержащий метрики, учитывающие взаимосвязь статей и их лексику, метрики, учитывающие цитируемость и лексику статей, а также метрики на уровне авторов и метрики на уровне журналов, позволяющие устранить недостатки известных метрик.

Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию предложенных показателей в математи-

ческое обеспечение наукометрических и реферативных баз научных публикаций, программное обеспечение, автоматизирующее процессы аттестации научных кадров и оценивание научных исследований, а также на экспериментальное исследование предложенных показателей в задачах анализа важности научных публикаций и изданий, оценивании трудов авторов, экспертизе научных и квалификационных работ.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке международного проекта «Centers of Excellence for young REsearchers» программы «Темпус» Европейской Комиссии (№ 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES) в рамках госбюджетных научно-исследовательских тем Запорожского национального технического университета «Интеллектуальные информационные технологии диагностирования и автоматической классификации» и «Интеллектуальные методы диагностирования систем управления удаленными техническими объектами».

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Article-Level Metrics. A SPARC Primer. [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.sparc.arl.org>
2. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web [Electronic resource] / Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. – Stanford : Stanford InfoLab, 1999. – Access mode: <http://ilpubs.stanford.edu:8090/422/1/1999-66.pdf>
3. Moed H. F. Measuring contextual citation impact of scientific journals / H. F. Moed // Journal of Informetrics. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 265–277.
4. González-Pereira B. A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator / B. González-Pereira, V. P. Guerrero-Bote, F. Moya-Anegón // Journal of informetrics. – 2010. – Vol. 4, № 3. – P. 379–391.
5. Guerrero-Bote V. P. A further step forward in measuring journals' scientific prestige: The SJR2 indicator / V. P. Guerrero-Bote, F. Moya-Anegón // Journal of Informetrics. – 2012. – Vol. 6, № 4. – P. 674–688.
6. Butler D. Free journal-ranking tool enters citation market / D. Butler // Nature. – 2008. – Vol. 451, № 6. – P. 6.
7. Falagas M. E. Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor / M. E. Falagas, V. D. Kouranos, R. Arencibia-Jorge, D. E. Karageorgopoulos // The FASEB Journal. – 2008. – Vol. 22, № 8. – P. 2623–2628.
8. Bergstrom C. T. The Eigenfactor Metrics / C. T. Bergstrom, J. D. West, M. A. Wiseman // Journal of Neuroscience. – 2008. – Vol. 28, № 45. – P. 11433–11434.
9. Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output / J. E. Hirsch // Proceedings of The National Academy of Sciences. 2005. – Vol. 102, № 46. – P. 16569–16572.
10. Egghe L. Theory and practise of the g-index / L. Egghe // Scientometrics. – 2006. – Vol. 69, № 1. – P. 131–152.
11. Woeginger G. J. An axiomatic analysis of Egghe's g-index / G. J. Woeginger // Journal of Informetrics. – 2008. – Vol. 2, № 4. – P. 364–368.
12. Tol R. S. J. A rational, successive g-index applied to economics departments in Ireland / R. S. J. Tol // Journal of Informetrics. – 2008. – Vol. 2, № 2. – P. 149–155.
13. Kosmulski M. I – a bibliometric index / M. Kosmulski // Forum Akademickie. – 2006. – Vol. 11. – P. 31.
14. Prathap G. Hirsch-type indices for ranking institutions' scientific research output / G. Prathap // Current Science. – 2006. – Vol. 91, № 11. – P. 1439.
15. Игра в цифирь, или как теперь оценивают труд ученого (сборник статей о библиометрике). – М. : МЦНМО, 2011. – 72 с.

16. Цыганов А. В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости / А. В. Цыганов // Управление большими системами : сб. тр. Спец. вып. 44 – Наукометрия и экспертиза в управлении наукой. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С.248–261.
17. Штовба С. Д. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого / С. Д. Штовба, Е. В. Штовба // Управление большими системами : сб. тр. Спец. вып. 44 – Наукометрия и экспертиза в управлении наукой. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С. 262–278.
18. Субботин С. О. Модель та індивідуальні метрики якості наукових публікацій / С. О. Субботин // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – № 3. – С. 30–39.
19. Global Gazetteer [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.fallingrain.com/world/>

Стаття надійшла до редакції 29.07.2015.

Після доробки 18.08.2015.

Субботин С. О.

Д-р техн. наук, професор, професор кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

#### МІЖСТАТЕЙНІ МЕТРИКИ ЯКОСТІ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ АНАЛІЗУ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ

Встановлено, що недоліком відомих метрик якості на рівні статей є те, що вони характеризують властивості окремих статей без урахування їхнього зв'язку з іншими публікаціям, недоліком метрик на рівні авторів – те, що вони не враховують взаємозв'язки публікацій різних авторів, а метрик на рівні журналів – те, що вони незастосовні для окремих статей і для окремих учених. Уперше запропонований комплекс міжстатейних метрик наукових публікацій, які дозволяють кількісно оцінювати властивості наукових публікацій, що містить метрики, які враховують взаємозв'язок статей і їхню лексику, метрики, що враховують цитованість і лексику статей, а також метрики на рівні авторів і метрики на рівні журналів, що дозволяють усунути недоліки відомих метрик. Використання запропонованих метрик дозволяє автоматизувати аналіз і порівняння наукових публікацій і періодичних видань.

**Ключові слова:** автоматизація, наукометрія, бібліометрія, якість, стаття, наукова публікація, метрика, аналіз цитованості, важливість статті.

Subbotin S. A.

Dr.Sc., Professor, Professor of department of software tools, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

#### INTER-PAPER QUALITY METRICS FOR SCIENTIFIC PUBLICATION ANALYSIS AUTOMATION

The disadvantages of known publication quality metrics are found: the metric level papers characterize the properties of individual articles without regard to their connection with other publications, the author level metrics did not take into account the relationship of publications of different authors, and journal level metrics are not applicable to individual articles and for individual scientists. The complex of scientific publications inter-paper metrics is proposed firstly. It allow to quantify the properties of scientific publications. The complex contains metrics that take into account the relationship of articles and their vocabulary, metrics taking into account the citation and vocabulary items, as well as at the author and journal level metrics allowing to obviate the disadvantages of the known metrics. The use of the proposed metrics allows to automate the analysis and comparison of scientific publications and periodicals.

**Keywords:** automation, scientometrics, bibliometrics, quality, article, scientific publication, metric, citation analysis, article importance.

#### REFERENCES

- Article-Level Metrics. A SPARC Primer. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.sparc.arl.org>
- Page L., Brin S., Motwani R., Winograd T. The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web [Electronic resource]. Stanford, Stanford InfoLab, 1999. Access mode: <http://ilpubs.stanford.edu:8090/422/1/1999-66.pdf>
- Moed H. F. Measuring contextual citation impact of scientific journals, *Journal of Informetrics*, 2010, Vol. 4, No. 3, pp. 265–277.
- González-Pereira B., Guerrero-Bote V. P., Moya-Anegón F. A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator, *Journal of Informetrics*, 2010, Vol. 4, No. 3, pp. 379–391.
- Guerrero-Bote V. P., Moya-Anegón F. A further step forward in measuring journals' scientific prestige: The SJR2 indicator, *Journal of Informetrics*, 2012, Vol. 6, No. 4, pp. 674–688.
- Butler D. Free journal-ranking tool enters citation market, *Nature*, 2008, Vol. 451, No. 6, P. 6.
- Falagas M. E., Kouranos V. D., Arencibia-Jorge R., Karageorgopoulos D. E. Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor, *The FASEB Journal*, 2008, Vol. 22, No. 8, pp. 2623–2628.
- Bergstrom C. T., West J. D., Wiseman M. A. The Eigenfactor Metrics, *Journal of Neuroscience*, 2008, Vol. 28, No. 45, pp. 11433–11434.
- Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output, *Proceedings of The National Academy of Sciences*. 2005, Vol. 102, No. 46, pp. 16569–16572.
- Egghe L. Theory and practise of the g-index, *Scientometrics*, 2006, Vol. 69, No. 1, pp. 131–152.
- Woeginger G. J. An axiomatic analysis of Egghe's g-index, *Journal of Informetrics*, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 364–368.
- Tol R. S. J. A rational, successive g-index applied to economics departments in Ireland, *Journal of Informetrics*, 2008, Vol. 2, No. 2, pp. 149–155.
- Kosmulski M. I – a bibliometric index, *Forum Akademickie*, 2006, Vol. 11, pp. 31.
- Prathap G. Hirsch-type indices for ranking institutions' scientific research output, *Current Science*, 2006, Vol. 91, No. 11, pp. 1439.
- Igra v cyfir', ili kak teper' ocenivayut trud uchenogo (cbornik statej o bibliometrike). – Moscow, MCNMO, 2011, 72 p.
- Cyganov A. V. Kраткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости, *Управление большими системами : сб. тр. Спец. вып. 44, Наукометрия и экспертиза в управлении наукой*. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 248–261.
- Shtovba S. D., Shtovba E. V. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого, *Управление большими системами : сб. тр. Спец. вып. 44, Наукометрия и экспертиза в управлении наукой*. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 262–278.
- Subbotin S. O. Model' ta indyvidual'ni metryky jakosti naukovykh publikacij, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnja*, 2015, No. 3, pp. 30–39.
- Global Gazetteer [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.fallingrain.com/world/>

## МЕТОД ФОНОВОЙ СЕТКИ ДЛЯ ТРИАНГУЛЯЦИИ ДВУМЕРНЫХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ФУНКЦИОНАЛЬНОМ ПОДХОДЕ

В статье рассмотрена проблема построения дискретных моделей на базе треугольных элементов для геометрических областей сложной формы. Для представления геометрических областей используется функциональный подход на базе теории  $R$ -функций В. Л. Рвачева. В основе функционального подхода лежит использование неявных функций и логических операций над ними. Использование функционального подхода требует учета его особенностей при построении дискретных моделей. При таком подходе для определения принадлежности точки области необходимо вычислить значение функции в этой точке. Поэтому использование классических методов триангуляции, основанных на использовании множества опорных узлов, менее эффективно. При использовании методов на основе фоновой сетки элементы строятся непосредственно в геометрической области. Внутренние элементы фоновой сетки формируют начальную сетку, затем производится адаптация к границам области. Полученные сетки после сглаживания будут близкими к равномерным при использовании структурированных сеток в качестве фоновых.

**Ключевые слова:** дискретная модель, сетка, треугольник,  $R$ -функция, фоновая сетка.

### НОМЕНКЛАТУРА

$\Omega$  – некоторая двумерная область;

$F(x, y)$  – неявная функция, представляющая двумерную область;

$x$  – абсцисса точки;

$y$  – ордината точки;

$x_i$  – значение  $i$ -й неявной функции;

$r_i$  – внутренний радиус кольцевой области;

$r_o$  – внешний радиус кольцевой области;

$m$  – количество элементов в дискретной модели;

$t_i = (p_{i,0}, p_{i,1}, p_{i,2})$  – вершины  $i$ -го треугольного элемента;

$p_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j})$  – координаты  $j$ -го узла  $i$ -го элемента;

$e_{k,l}$  –  $k$ -е ребро, инцидентное узлу  $p_l$ ;

$\vec{n}(e)$  – операция вычисления нормали к ребру с учетом направления обхода; узлов треугольника, которому принадлежит ребро;

$h_x$  – шаг фоновой сетки вдоль оси абсцисс;

$h_y$  – шаг фоновой сетки вдоль оси ординат;

$\text{deledge}(A, B)$  – операция удаления из сетки ребра, образованного вершинами  $A$  и  $B$ ;

$w$  – ширина прямоугольной области;

$h$  – высота прямоугольной области;

$r$  – радиус круговой области;

$ng$  – количество полос в модели зубчатого колеса.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной частью проектирования сложных инженерных объектов и систем является исследование их эксплуатационных характеристик (например, прочности, устойчивости). Для исследования сложных объектов зачастую на практике используют численные методы, в основе которых лежит идея перехода от аналитической модели к ее дискретному аналогу – дискретной модели. Для моделирования объектов постоянной толщины (балок, плит, платин – объектов, объемными эффектами в которых

можно пренебречь) используются двумерные дискретные модели. Одной из наиболее распространенных форм двумерных элементов являются треугольники. При этом для автоматической генерации дискретных моделей необходимо представить информацию о геометрической структуре объекта в «понятной» компьютеру форме. Одним из распространенных здесь является функциональный подход с использованием неявных математических функций и аппарата теории  $R$ -функций Рвачева В. Л. для логического конструирования моделей сложных геометрических объектов.

Объектом исследования является процесс построения моделей сложных геометрических объектов.

Предмет исследования составляют методы построения дискретных моделей.

Целью данной работы являлась разработка метода, позволяющего строить дискретные модели двумерных геометрических объектов, представленных функционально.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть исходная область  $\Omega$  представлена неявной действительной функцией  $F(x, y)$ . Причем  $F(x, y) < 0$  во внутренних точках  $\Omega$ ,  $F(x, y) > 0$  во внешних для  $\Omega$  точках и, соответственно,  $F(x, y) = 0$  на границе области. Задача состоит в разработке способа построения покрытия треугольниками области  $\Omega$ .

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Сегодня достаточно развиты методы построения триангуляции Делоне для исходного множества точек, детальный анализ которых проведен в работах А. В. Скворцова [1–2]. Эти методы получили свое применение в задачах компьютерной графики и геоинформационных системах. Однако их применение при функциональном подходе требует построения множества опорных точек, что является самостоятельной сложной задачей.

Также разработаны способы и методы построения триангуляции Делоне для областей, представленных многоугольниками или планарными графами [3–6]. В этой

группе методов наибольшее распространение получили модификации метода Рапперта [5], которые по сути являются способами повышения качества сетки, сгенерированной для исходной области.

Методы подвижного фронта [7–8] основаны на идее послойного заполнения исходной области элементами треугольной формы. Исходной информацией для них является дискретная модель границы области. Данные методы весьма универсальны, однако необходимо отметить их высокую ресурсоемкость и относительно низкую скорость работы.

Другая группа методов генерации сеток базируется на использовании базовой или фоновой сетки с адаптацией приграничных узлов к границам области [9–11]. Фоновая сетка может быть относительно просто сгенерирована (например, структурированная сетка), при этом накладывается единственное требование: размер ячеек на границе должен быть меньше минимальной геометрической особенности области. Для построения неравномерных фоновых сеток используется метод Quadtree [12]. На этапе адаптации здесь распространено использование граничной коррекции узлов [9]. Основным недостатком является возможность получения «плохих» или вырожденных элементов около границы области.

Исследования в области построения  $R$ -функций для представления сложных геометрических объектов проведены академиком В. Л. Рвачевым и его учениками [13–15]. Существующие работы [16–17] по решению задачи построения триангуляций геометрических объектов, представленных функционально, основаны на последовательном построении опорного множества точек на границе области и триангуляции Делоне на базе существующих методов.

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Функциональный подход предполагает использование неявных математических функций для представления геометрических объектов. Простейшие формы (примитивы) представляются элементарными функциями. Например, функция

$$\text{circle}(x, y, r) \equiv r^2 - x^2 - y^2 \quad (1)$$

соответствует области, ограниченной окружностью радиуса  $r$  с центром в начале координат.

Для логического конструирования неявных функций, соответствующим более сложным областям, используются системы  $R$ -функций [13–15]. Наиболее распространенная в практике моделирования геометрических объектов система  $R$ -функций  $\mathfrak{R}_0$  имеет вид

$$\begin{aligned} \neg x &\equiv -x; \\ x_1 \wedge x_2 &\equiv x_1 + x_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2}; \\ x_1 \vee x_2 &\equiv x_1 + x_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Например, функция

$$\text{annular}(x, y, r_i, r_o) \equiv \text{circle}(x, y, r_o) \wedge \neg \text{circle}(x, y, r_i).$$

соответствует кольцевой области (рис. 1а). Аналогично моделируются трехмерные геометрические объекты.

Неявное представление дает правило для проверки принадлежности точки телу, но не позволяет явно перечислить внутренние и граничные узлы. Для получения граничных узлов, как правило, сканируют область с некоторым шагом и затем в ячейках, содержащих и внутренние и внешние точки, использует методы поиска корней функции. Следовательно, с вычислительной точки зрения перспективным представляется разработка методов на базе фоновой сетки, что позволит строить элементы уже на этапе сканирования области.

Общая идея метода заключается в использовании некоторой фоновой сетки, полностью покрывающей исходную область. Фоновая сетка может быть сгенерирована достаточно просто (например, равномерная сетка), но размер ячеек должен быть меньше соответствующих им геометрических особенностей. Затем все внешние ячейки удаляются, а оставшиеся ячейки формируют начальную сетку (рис. 1б). Заключительным этапом является построение элементов в приграничном слое (адаптация к границам, рис. 1в). Этот этап является наиболее сложным. Здесь с учетом особенностей функционального подхода к моделированию перспективным видится техника изоморфизма, предложенная в работе [18] для построения четырехугольников и шестигранников на основе метода суперпозиции.

Пусть фоновая сетка треугольных элементов представлена множеством

$$M_f = \{t_i\}, i = \overline{1, m}.$$

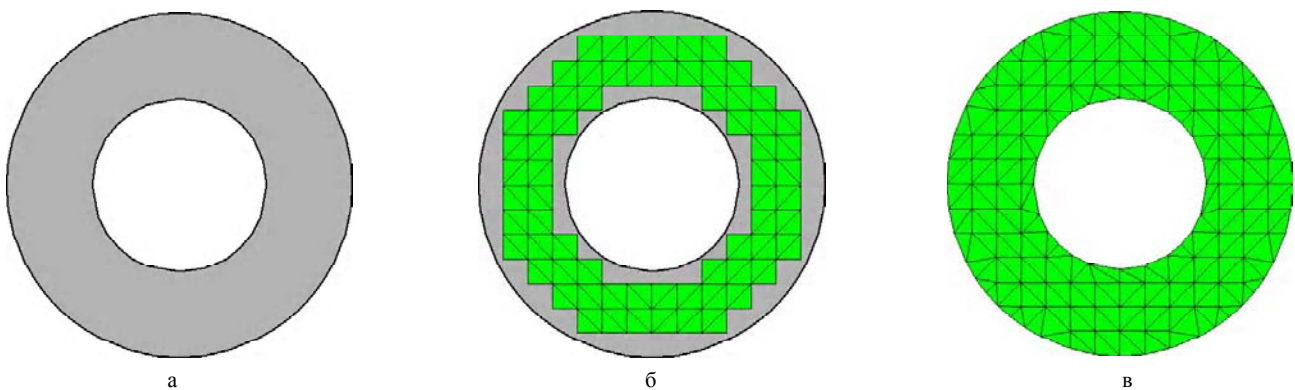


Рисунок 1 – Исходная область, начальная сетка и адаптированная сетка при  $r_i = 0,5$  и  $r_o = 1$ : а – схема области, б – начальная сетка, в – триангуляция



Первым шагом является формирование начальной сетки. Начальную сетку  $M_{initial}$  образуют внутренние элементы:

$$M_{initial} = \{i: F(p_{i,j}) > 0, \forall j\}.$$

На втором шаге для каждого узла начальной сетки строится нормаль. Нормаль к узлу начальной сетки определим, как среднее арифметическое нормалей к ребрам (рис. 2), инцидентных в этом узле:

$$n(p_l) = \frac{1}{k} \sum_{p_l \in e_{k,l}} \bar{n}(e_{k,l}).$$

На третьем шаге путем нахождения проекции нормали на границу области строится множество изоморфных точек. Необходимо отметить, что при функциональном представлении для нахождения изоморфных точек могут использоваться методы двоичного поиска, золотого сечения и т. п., осуществляя поиск на отрезке длины  $\sqrt{h_x^2 + h_y^2}$ . На этом этапе учитываются характерные точки: если на расстоянии  $\Delta$  от изоморфной находится характерная точка, то в качестве изоморфной используется соответствующая характерная точка.

Четвертым шагом является построение элементов в приграничном слое. В результате третьего шага каждому узлу на границе начальной сетки соответствует изоморфный на границе области, каждому граничному ребру начальной сетки соответствует ребро на границе области. Следовательно, для каждого граничного ребра начальной сетки можно двумя способами построить элементы (меняя направление диагонали, в четырехугольнике, который образуют смежные вершины и изоморфные к ним). Из двух возможных способов формирования треугольников (рис. 3) выберем тот, при котором в треугольниках отношение значений минимального угла к максимальному будет наибольшим.

На четвертом шаге могут появляться вырожденные или «плохие» элементы обусловленные возможностью

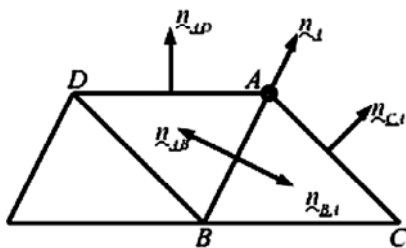


Рисунок 2 – Построение нормали в узле начальной сетки

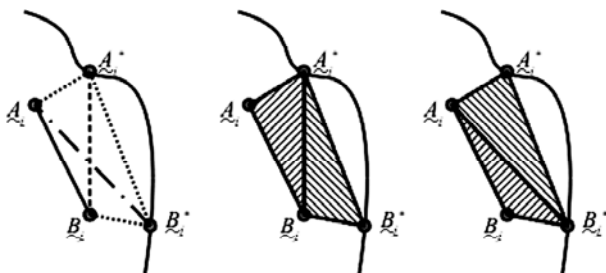


Рисунок 3 – Способы формирования треугольников в приграничном слое

совпадения или близкого (относительно размеров области) расположения изоморфных узлов. Для решения задачи устранения «плохих» элементов в приграничном слое для соседних узлов  $A$  и  $B$  определим операцию

$$\text{join}(A, B) = \{\text{deledge}(A, B), A = B\},$$

В результате операции  $\text{join}(A, B)$  будут удалены треугольники, для которых ребро  $AB$  является общим, узел  $A$  будет совмещен с узлом  $B$  (схема-пример на рис. 4).

С учетом того, что вырожденные или «плохие» элементы при таком подходе могут возникать только в приграничном слое, операция  $\text{join}(A, B)$  может применяться только к элементам этого слоя, если расстояние между двумя соседними узлами меньше  $\Delta$ .

Параметр  $\Delta$  на третьем и четвертом шагах является ограничением на минимальный размер ребра. Данную величину можно интерпретировать как параметр качества сетки. В общем случае его значение может быть произвольной зависимостью от координат или размеров соседних элементов. Например, в случае, если в качестве фоновой использована равномерная сетка, то можно принять  $\Delta = \delta \sqrt{h_x^2 + h_y^2}$ , где значение  $\delta$  в зависимости от задачи изменяется от 0,2 до 0,5.

В случае, если узлы  $A$  и  $B$  одновременно принадлежат границе, то операция  $\text{join}(A, B)$  может быть модифицирована следующим способом: оба узла  $A$  и  $B$  переносятся в точку пересечения нормали к середине  $AB$  с границей области, осуществляя таким образом местное сглаживание.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для тестирования предложенного метода разработан соответствующий модуль в системе автоматизированного проектирования на базе функционального подхода (Свидетельство о регистрации авторского права на произведение № 53829 от 24.02.2014). Разработка выполнена с использованием языка программирования C++ (компилятор GCC) и библиотеки Qt для программирования интерфейса пользователя. В тестовых примерах принято значение параметра метода  $\delta = 0,4$ .

Для анализа результатов работы предложенного подхода рассмотрим сетки, сгенерированные для чертежей некоторых объектов. Для количественного анализа качества дискретной модели используем две метрики: 1) значение минимального угла элемента; 2) отношение минимального к максимальному углу на элементе. Обе эти метрики взаимосвязаны: наличие острых углов (меньше

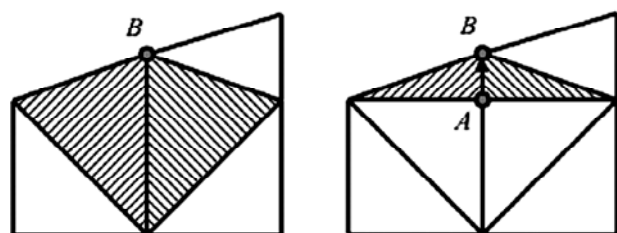


Рисунок 4 – Пример операции  $\text{join}(A, B)$

15° отрицательно влияет на вычислительный процесс в методе конечных элементов; при этом чем ближе отношение углов треугольника к единице, тем ближе он к геометрически правильной форме.

1. L-область

Рассмотрим L-область, изображенную на рис. 5а. Эта область может быть представлена функцией

$$lshape(x, y, w, h, a) = \text{rect}\left(x - \frac{w}{2}, y - \frac{a}{2}, w, a\right) \vee \text{rect}\left(x - \frac{a}{2}, y - \frac{h}{2}, a, h\right),$$

где функция

$$\text{rect}(x, y, w, h) = \left(\frac{w^2}{4} - x^2\right) \wedge \left(\frac{h^2}{4} - y^2\right) \quad (3)$$

соответствует прямоугольной области, центр масс которой совпадает с началом координат.

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов 9×12 для прямоугольника [0;30]×[0;40] получено, что минимальный угол принимает значения от 27,81° до 45,00° (рис. 5б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,28 до 0,63 (рис. 5в).

2. Квадратная пластина с треугольным отверстием в центре

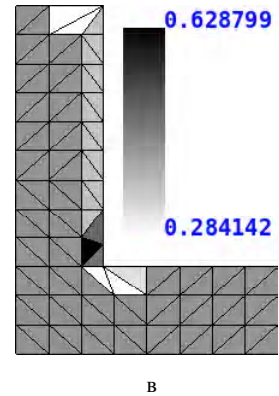
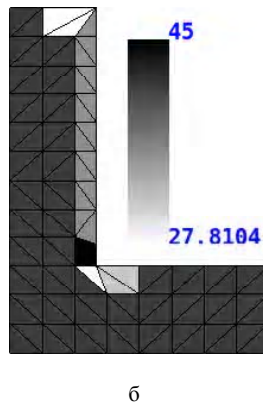
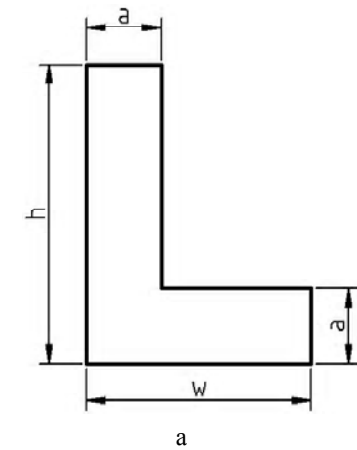


Рисунок 5 – L-область:  $w = 30, h = 40, a = 10$ : а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

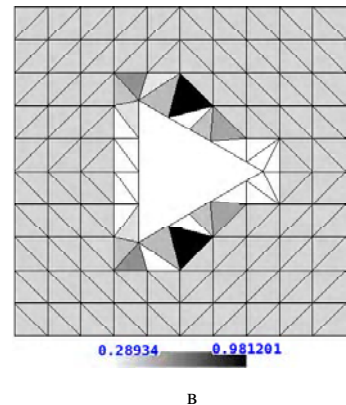
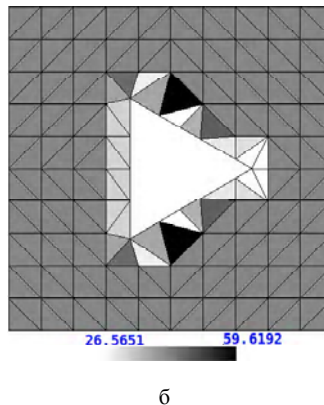
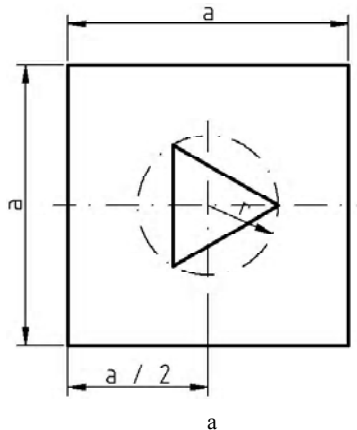


Рисунок 6 – Квадратная пластина:  $a = 40, r = 10$ : а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

Квадратная пластина с треугольным отверстием в центре (рис. 6а) может быть представлена функцией

$$qplate(x, y, a, r) = \text{rect}(x, y, a, a) \wedge \neg \text{regular}(x, y, r, 3),$$

где функция

$$\begin{aligned} \text{regular}(x, y, r, n) = & [(y - y_1)(x_2 - x_1) - (x - x_1)(y_2 - y_1)] \wedge \\ & \wedge [(y - y_2)(x_3 - x_2) - (x - x_2)(y_3 - y_2)] \wedge \dots \wedge \\ & \wedge [(y - y_n)(x_n - x_{n-1}) - (x - x_n)(y_n - y_{n-1})], \\ x_i = & r \cos(\alpha_i), \quad y_i = r \sin(\alpha_i), \quad \alpha_i = \frac{2\pi}{n}(i-1), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4) \end{aligned}$$

соответствует правильному n-угольнику с центром в начале координат.

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов 10×10 для квадрата [-20;20]×[-20;20] получено, что минимальный угол принимает значения от 26,57° до 59,62° (рис. 6б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,29 до 0,98 (рис. 6в).

3. Гайка

Двумерную область, подобную гайке (рис. 7а), также можно представить при помощи формулы (4):

$$\text{nut}(x, y, r_1, r_2) = \text{regular}(x, y, r_1, 6) \wedge \neg \text{circle}(x, y, r_2).$$

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов  $16 \times 16$  для квадрата  $[-40;40] \times [-40;40]$  получено, что минимальный угол принимает значения от  $30,00^\circ$  до  $56,93^\circ$  (рис. 7б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,29 до 0,86 (рис. 7в).

4. Планка

Контур специальной планки (рис. 8а), может быть представлен формулой

$$\text{planch}(x, y, w, h, R, r) = \left\{ \left[ \left( \frac{w}{2} - x^2 \right) \wedge \left[ \left[ \frac{h}{2} + \left( R - \frac{h}{2} \right) \left( x + \frac{w}{2} \right) \frac{1}{w} \right]^2 - y^2 \right] \vee \text{circle} \left( x - \frac{w}{2}, y, R \right) \right\} \wedge \text{circle} \left( x - \frac{w}{2}, y, r \right).$$

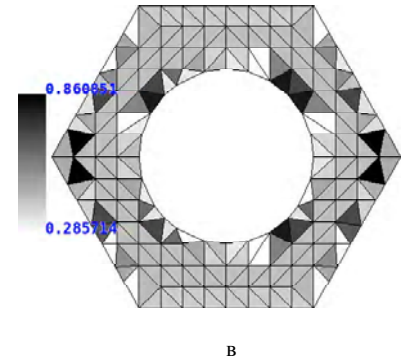
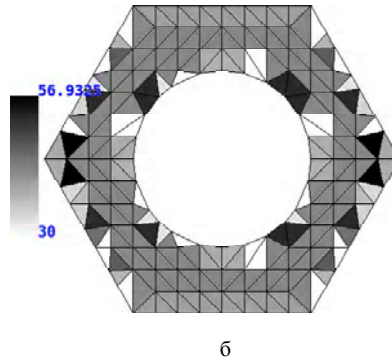
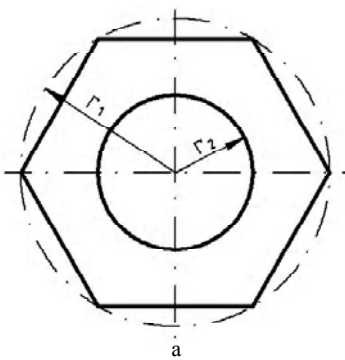


Рисунок 7 – Гайка:  $r_1 = 40$ ,  $r_2 = 20$  :

а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

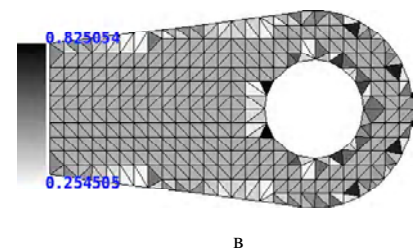
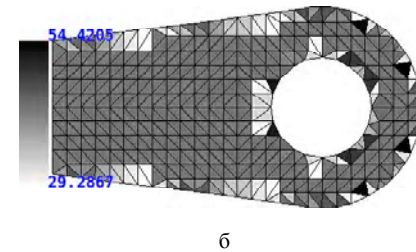
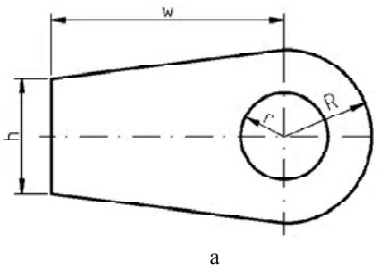


Рисунок 8 – Контур специальной планки при  $h = 20$ ,  $w = 40$ ,  $R = 15$  и  $r = 7,5$ :

а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

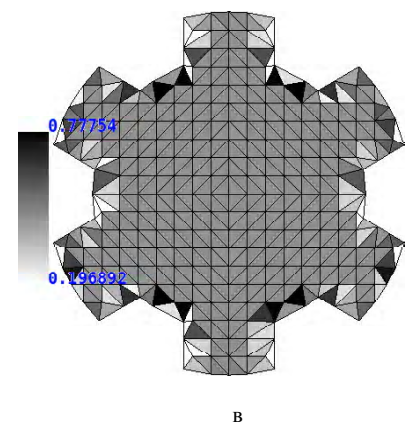
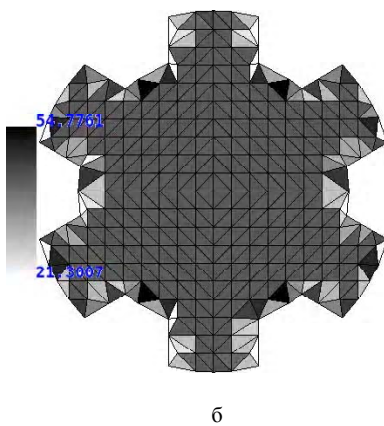
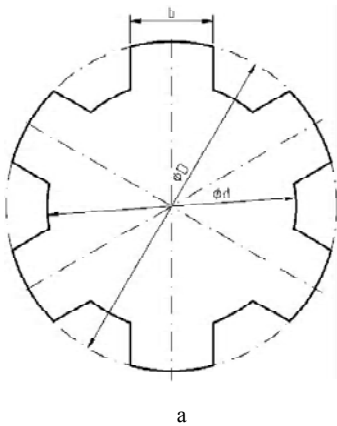


Рисунок 9 – Зубчатое колесо при  $D = 80$ ,  $d = 60$ ,  $b = 20$  и  $ng = 3$ :

а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов  $27 \times 15$  для прямоугольника  $[-20;35] \times [-15;15]$  получено, что минимальный угол принимает значения от  $29,29^\circ$  до  $54,42^\circ$  (рис. 8б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,26 до 0,83 (рис. 8в).

5. Зубчатое колесо

Примитивная модель зубчатого колеса (рис. 9), может быть представлена выражением

$$\text{gear}(x, y, D, d, b, ng) = \left\{ \left[ \left[ \frac{b^2}{4} - (x \cos \alpha_1 + y \sin \alpha_1) \right] \vee \left[ \frac{b^2}{4} - (x \cos \alpha_2 + y \sin \alpha_2) \right] \vee \dots \vee \left[ \frac{b^2}{4} - (x \cos \alpha_n + y \sin \alpha_{ng}) \right] \right\} \wedge \text{circle} \left( x, y, \frac{D}{2} \right) \vee \text{circle} \left( x, y, \frac{d}{2} \right).$$

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов  $20 \times 20$  для квадрата  $[-40;40] \times [-40;40]$  получено, что минимальный угол принимает значения от  $21,30^\circ$  до  $54,78^\circ$  (рис. 9б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,20 до 0,78 (рис. 9в).

6. Прокладка

Модель прокладки (рис. 10а) может быть представлена на базе формул (1) и (3):

$$\text{layer}(x, y) = \left[ \text{circle}(x, y, r_1) \vee \text{circle}(x, y + h_2, r_5) \vee \text{rect}\left(x, y + \frac{h_2}{2}, w_2, h_2\right) \right] \wedge \\ \wedge \neg \text{circle}(x, y, r_2) \wedge \neg \text{rect}(x, y - r_2, w_1, 2h_1) \wedge \\ \wedge \neg \text{circle}(x - c_{1,x}, y - c_{1,y}, r_4) \wedge \neg \text{circle}(x - c_{2,x}, y - c_{2,y}, r_4) \wedge \\ \wedge \neg \text{circle}(x - c_{3,x}, y - c_{3,y}, r_4) \wedge \neg \text{circle}(x - c_{4,x}, y - c_{4,y}, r_4) \wedge \\ \neg \text{rect}\left(x, y + h_2 - \frac{h_3}{2}, 2r_6, h_3\right) \wedge \neg \text{circle}(x, y + h_2, r_6) \wedge \neg \text{circle}(x, y + h_2 - h_3, r_6),$$

где параметры  $r_1 = \frac{80}{2} = 40$ ,  $r_2 = \frac{40}{2} = 20$ ,  $r_3 = \frac{60}{2} = 30$ ,  
 $r_4 = \frac{10}{2} = 5$ ,  $r_5 = 24$ ,  $r_6 = 14$ ,  $w_1 = 14$ ,  $h_1 = 5$ ,  $w_2 = 2r_5$ ,

$h_2 = 100$ ,  $h_3 = 48$  соответствуют размерам на чертеже; параметры  $c_{1,x} = r_3 \cos(-\pi/4)$ ,  $c_{1,y} = r_3 \sin(-\pi/4)$ ,  
 $c_{2,x} = r_3 \cos(\pi/4)$ ,  $c_{2,y} = r_3 \sin(\pi/4)$ ,  $c_{3,x} = r_3 \cos(3\pi/4)$ ,  
 $c_{3,y} = r_3 \sin(3\pi/4)$ ,  $c_{4,x} = r_3 \cos(5\pi/4)$ ,  $c_{4,y} = r_3 \sin(5\pi/4)$  – центры четырех отверстий.

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов  $49 \times 102$  для прямоугольника  $[-40;40] \times [-124;40]$  получено, что минимальный угол принимает значения от  $23,74^\circ$  до  $58,75^\circ$  (рис. 10б) при этом соотношение углов находится в диапазоне от 0,24 до 0,95 (рис. 10в).

На примере кольцевой области, изображенной на рис. 1, исследуем влияние параметров сетки на ее качество. Рассмотрим влияние количества элементов равномерной фоновой сетки (шага сетки) на распределение значений метрик, описанных выше. На рис. 1а показано распределение значений минимального угла элемента, соответственно на рис. 1б показано распределение значений соотношений углов. Из графиков видно, что значения минимального угла для сеток кольцевой области мало зависят от шага (густоты сетки) и колеблются около  $30^\circ$ . Аналогичная ситуация со значениями метрики отношения углов.

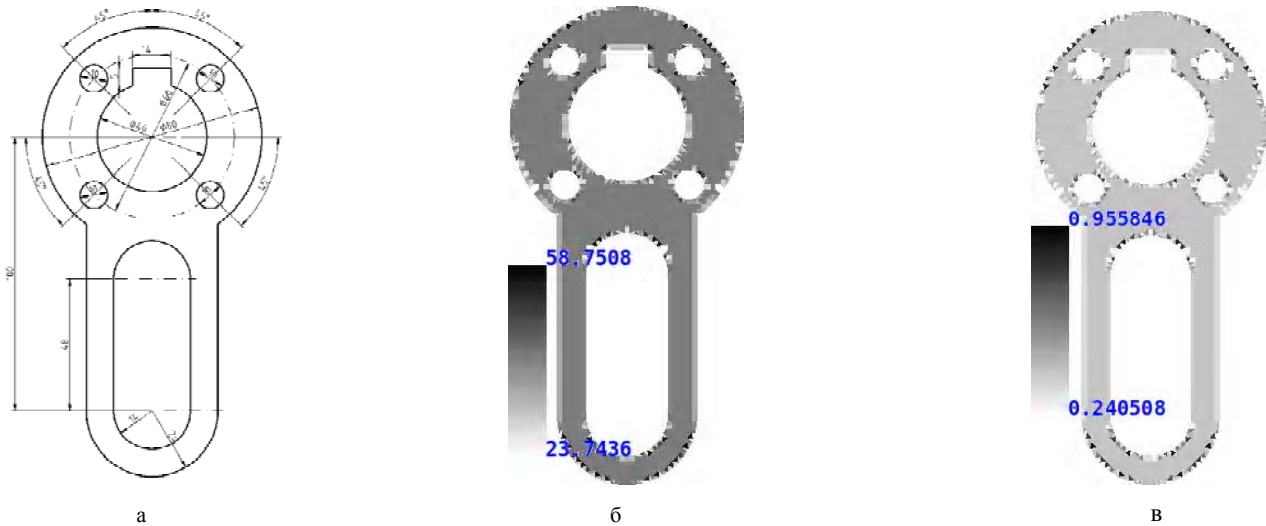


Рисунок 10 – Прокладка:

а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов

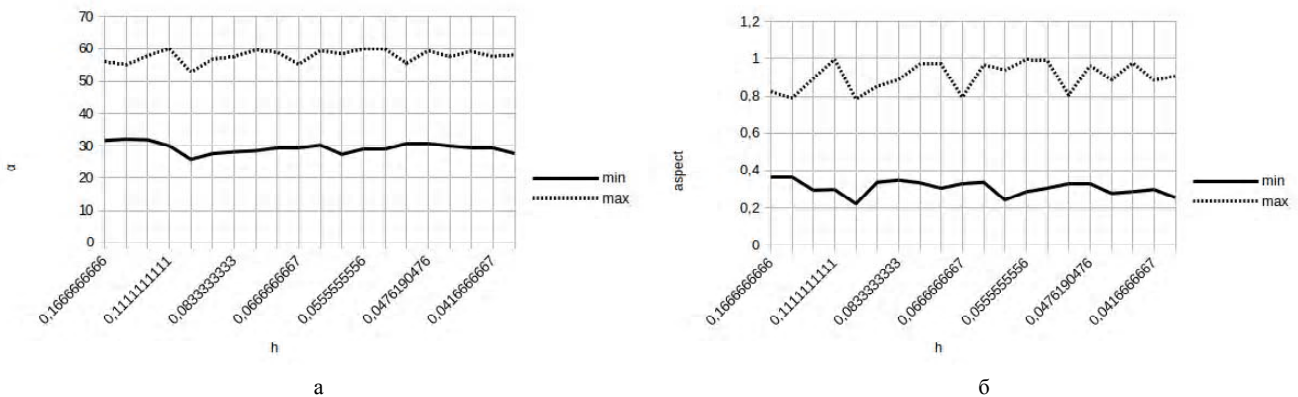


Рисунок 11 – Зависимость распределения метрик от шага сетки:

а – распределение значений минимального угла, б – распределение соотношения углов

Теперь рассмотрим влияния параметра  $\delta$  на значения метрики. Варьируем значения  $\delta$ , считая, что используется равномерная фоновая сетка  $16 \times 16$  элементов для квадрата  $[-1; 1] \times [-1; 1]$ . Из рисунка 12 видно, что при  $\delta = 0$  возможно появления вырожденных элементов, наибольшее значение минимального угла сетки получается при  $0,4 \leq \delta \leq 0,5$ , при  $\delta > 0,5$  качество сетки ухудшается (при этом визуально выявлены вырожденные элементы).

Для других тестовых примеров получены аналогичные изображенным на рис. 11–12 зависимости метрик от параметров.

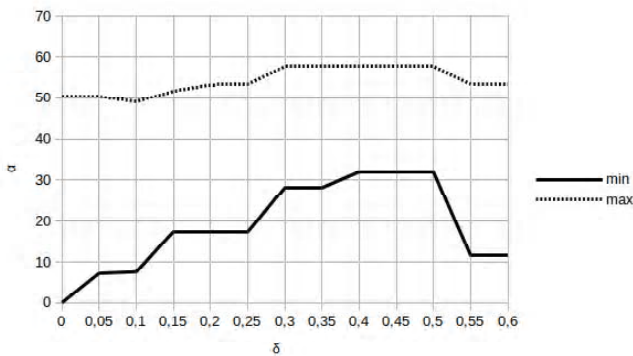


Рисунок 12 – Зависимость распределения значений минимального угла от значения параметра  $\delta$

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видно из рис. 5–10 полученные сетки по качеству близки к сеткам (наименьшее значение минимального угла в элементе сетки превышает 20 градусов), сгенерированным алгоритмами на основе метода Рапперта. Разработанный метод не требует предварительного анализа исходной области и строит сетку непосредственно на этапе сканирования, что позволяет снизить затраты вычислительных ресурсов.

## 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод в отличие от существующих работ [16–17] для решения задачи построения триангуляций геометрических объектов, представленных функционально, не требует построения опорного множества точек на границе области.

Недостатком предложенного метода является генерация сеток, близких к равномерным при использовании равномерных фоновых сеток. Однако, для генерации неравномерных сеток могут быть использованы неравномерные фоновые сетки, сгенерированные на основе метода Quadtree [12].

## ВЫВОДЫ

В работе решена задача автоматического построения двумерных дискретных моделей для геометрических объектов, представленных функционально.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые предложен метод для построения триангуляции двумерных областей, представленных функционально, используя непосредственное построение элементов при сканировании исходной области, что позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, на основе которого решены задачи исследования устойчивости пластин и пологих оболочек с отверстиями нестандартной формы.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы определить более точно оптимальные значения параметров метода. Также перспективной исследований является обобщение предложенного метода для моделирования трехмерных объектов.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской темы Запорожского национального университета №3/15 «Математическое моделирование конструкций неоднородной структуры на базе современных информационных технологий» (номер гос. регистрации 0115U000761).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скворцов А. В. Обзор алгоритмов построения триангуляции Делоне / А. В. Скворцов // Вычислительные методы и программирование. – 2002. – № 3. – С. 14–39.
2. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и ее применение / А. В. Скворцов. – Томск : Издательство Томского университета, 2002. – 128 с.
3. Bern M. Mesh generation and optimal triangulation / M. Bern, D. Eppstein // Computing in Euclidean Geometry. – 1992. – No. 1. – P. 23–90.
4. Bern M. Triangulating polygons without large angles / M. Bern, D. Dobkin, D. Eppstein // International Journal of Computational Geometry & Applications. – 1995. – Vol. 5. – P. 171–192. DOI: 10.1142/S0218195995000106
5. Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation / J. Ruppert // Journal of Algorithms. – 1995. – Vol. 18, Issue 3. – P. 548–585. DOI: 10.1006/jagm.1995.1021
6. Tournois J. Interleaving Delaunay Refinement and Optimization for 2D Triangle Mesh Generation / J. Tournois, P. Alliez, O. Devillers // The 16th International Meshing Roundtable : International Conference, Washington, 14–17 October 2007 : proceedings. – Washington : Springer, 2008. – P. 83–101. DOI: 10.1.1.94.6288
7. Mavriplis D. J. An advancing front Delaunay triangulation algorithm designed for robustness / D. J. Mavriplis // Journal of Computational Physics. – 1995. – Vol. 117, Issue 1. – P. 90–101. DOI: 10.1.1.136.8268
8. Silva C. T. Greedy Cuts: An Advancing Front Terrain Triangulation Algorithm / C. T. Silva, J. S. B. Mitchell // The 6th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : International Conference, Washington, 2–7 November 1998 : proceedings. – Washington : ACM, 1998. – P. 137–144. DOI: 10.1145/288692.288717
9. Галанин М. П. Разработка и реализация алгоритмов трехмерной триангуляции сложных пространственных областей : итерационные методы / М. П. Галанин, И. А. Щеглов. – М. : ИПМ им М. В. Келдыша РАН, 2006. – № 9. – 32 с. – (Препринт / РАН, ИПМ им. М. В. Келдыша ; 06-01-00421).
10. Naumann U. Combinatorial Scientific Computing / [edited by] U. Naumann, O. Schenk. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2012. – 600 p.
11. Cheng S.-W. Delaunay Mesh Generation / S.-W. Cheng, T. K. Dey, J. R. Shewchuk. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2012. – 387 p. ISBN: 9781584887300
12. Samet H. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures / H. Samet // ACM Computing Surveys. – 1984. – Vol. 16, Issue 2. – P. 187–260. DOI: 10.1145/356924.356930
13. Рвачев В. Л. Введение в теорию R-функций / В. Л. Рвачев, Т. И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 46–58.
14. R-функции и обратная задача аналитической геометрии в трехмерном пространстве / [К. В. Максименко-Шейко, А. М. Мачевитый, А. В. Толок, Т. И. Шейко] // Информационные технологии. – 2007. – № 10. – С. 23–32.

15. Максименко-Шейко К. В. R-функції в математическом моделюванні геометрических об'єктів в 3D по інформації в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. І. Шейко // Вісник Запорізького національного університету : Збірник наукових праць. Фізико-математичні науки. – 2010. – № 1. – С. 98–104.
16. Лисняк А. А. Спосіб побудови дискретних математических геометрических об'єктів, заданих с помощью R-функцій / А. А. Лисняк // Вісник Запорізького національного університету : Збірник наукових статей. Фізико-математичні науки. – 2013. – № 1. – С. 59–69.
17. Лисняк А. А. Дискретизация границы трехмерных моделей геометрических об'єктів, заданных с помощью R-функцій / А. А. Лисняк // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2014. – № 1. – С. 82–88. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-1-12
18. Schneiders R. A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes / R. Schneiders // Engineering with Computers. – 1996. – № 12. – P. 168 177. DOI: 10.1007/BF01198732

Статья поступила в редакцию 14.05.2015.

После доработки 19.05.2015.

Чопоров С. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри математичного моделювання Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна

#### МЕТОД ФОНОВОЇ СІТКИ ДЛЯ ТРИАНГУЛЯЦІЇ ДВОВИМІРНИХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ПІДХОДІ

У статті розглянуто проблема побудови дискретних моделей на базі трикутних елементів для областей геометричних областей складної форми. Для подання геометричних областей використовується функціональний підхід на базі теорії R-функцій В. Л. Рвачова. В основу функціонального підходу покладено ідею використання неявних функцій та логічних операцій над ними. Використання функціонального підходу потребує врахування його особливостей при побудові дискретних моделей. При такому підході для визначення належності точки необхідно обчислити значення функції у цій точці. Тому використання класичних методів триангуляції, основаних на використанні множини опорних вузлів, менш ефективне. При використанні методів на основі фонові сітки елементи будуються безпосередньо в геометричній області. Внутрішні елементи фонові сітки формують початкову сітку, після чого відбувається її адаптація до границь області. Отримані сітки близькі до рівномірних – скінченні елементи приблизно однакового розміру.

**Ключові слова:** дискретна модель, сітка, трикутник, R-функція, фонові сітка.

Choporov S. V.

PhD, Associate Professor of Mathematical Modelling Department, Zaporizhzhya National University, Zaporizhzhya, Ukraine

#### BACKGROUND GRID METHOD FOR PLANE SHAPES TRIANGULATION IN FUNCTIONAL APPROACH

In herein paper is described the problem of triangular mesh generation for complex geometrical domain. Functional approach is used for a geometrical object representation. Vladimir Rvachev's R functions are used also. Functional approach is based on implicit functions and logical operations (negation, conjunction and disjunction) over these functions. Logical operation is a special real-value function that at inner point is greater than zero and at outer point is less than zero. Thus standard triangulations techniques, which based on predefined boundary discret model, is less efficient. During background grid method for triangulation, triangles are built in domain directly. Presented method starts with a mesh that can be relatively easy generated (e.g. uniform mesh). Next, initial mesh is defined as a set of all inner elements. The last one generates a layer of elements near boundary (adaptation step). Adaptive method generates meshes that are close to uniform for structured background grids.

**Keywords:** discret model, mesh, triangle, R-function, background grid.

#### REFERENCES

- Skvorcov A. V. Obzor algoritmov postroeniya triangulyacii Delone, *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2002, No. 3, pp. 14–39.
- Skvorcov A. V. Triangulyaciya Delone i eyo primeneniye. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2002, 128 p.
- Bern M., Eppstein D. Mesh generation and optimal triangulation, *Computing in Euclidean Geometry*, 1992, No. 1, pp. 23–90.
- Bern M., Dobkin D., Eppstein D. Triangulating polygons without large angles, *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 1995, Volume 5, pp. 171–192. DOI: 10.1142/S0218195995000106
- Ruppert J. A Delaunay refinement algorithm for quality 2-dimensional mesh generation, *Journal of Algorithms*, 1995, Volume 18, Issue 3, pp. 548–585. DOI:10.1006/jagm.1995.1021
- Tournois J., Alliez P., Devillers O. Interleaving Delaunay Refinement and Optimization for 2D Triangle Mesh Generation, *The 16th International Meshing Roundtable : International Conference, Washington, 14–17 October 2007 : proceedings*. Washington, Springer, 2008, pp. 83–101. DOI: 10.1.1.94.6288
- Mavriplis D. J. An advancing front Delaunay triangulation algorithm designed for robustness, *Journal of Computational Physics*, 1995, Volume 117, Issue 1, pp. 90–101. DOI: 10.1.1.136.8268
- Silva C. T., Mitchell J. S. B. Greedy Cuts: An Advancing Front Terrain Triangulation Algorithm, *The 6th ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : International Conference, Washington, 2–7 November 1998 : proceedings*. Washington, ACM, 1998, pp. 137–144. DOI: 10.1145/288692.288717
- Galanin M. P., Shheglov I. A. Razrabotka i realizaciya algoritmov trexmernoj triangulyacii slozhnyx prostranstvennyx oblastej: iteracionnye metody. Moscow, IPM im M. V. Keldysha RAN, 2006, No. 9, 32 p. (Preprint / RAN, IPM im. M. V. Keldysha ; 06 01 00421).
- Naumann U., Schenk O. [edited by] Combinatorial Scientific Computing. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2012, 600 p.
- Cheng S.-W., Dey T. K., Shewchuk J. R. Delaunay Mesh Generation. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2012, 387 p. ISBN: 9781584887300
- Samet H. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures, *ACM Computing Surveys*, 1984, Volume 16, Issue, pp. 187–260. DOI: 10.1145/356924.356930
- Rvachev V. L., Shejko T. I. Vvedenie v teoriyu R-funkcij, *Problemy mashinostroeniya*, 2001, Vol. 4, No 1–2, pp. 46–58.
- Maksimenko-Shejko K. V., Macevityj A. M., Tolok A. V., Shejko T. I. R-funkcii i obratnaya zadacha analiticheskoy geometrii v trexmernom prostranstve, *Informacionnye texnologii*, 2007, No. 10, pp. 23–32.
- Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskom modelirovanii geometricheskix ob'ektov v 3D po informacii v 2D, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovykh prac'. Fyzyko-matematychni nauky*, 2010, No. 1, pp. 98–104.
- Lisnyak A. A. Sposob postroeniya diskretnyx matematicheskix geometricheskix obektov, zadannyx s pomoshh'yu R-funkcij, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovykh statej. Fyzyko-matematychni nauky*, 2013, No. 1, pp. 59–69.
- Lisnyak A. A. Diskretizaciya granicy trexmernyx modelej geometricheskix ob'ektov, zadannyx s pomoshh'yu R-funkcij, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnja*, 2014, No.1, pp. 82–88. DOI: 10.15588/1607-3274-2014-1-12
- Schneiders R. A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes, *Engineering with Computers*, 1996, No. 12, pp. 168–177. DOI: 10.1007/BF01198732

# НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ИНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

## НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

### NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.932 12; 004.932; 004.932.75

Жихаревич В. В.<sup>1</sup>, Миронів І. В.<sup>2</sup>, Остапов С. Е.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

<sup>2</sup>Асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

<sup>3</sup>Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

## АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ ТЕКСТУ НА ОСНОВІ КОНКУРУЮЧИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

В роботі запропоновано новий метод розпізнавання символів тексту, який ґрунтується на концепції конкуруючих клітинних автоматів. Розроблено новий тип клітинних автоматів, траєкторії руху яких співпадають з формою символу, що його представляє автомат. Перевагами такого методу є нечутливість до розміру символів, товщини їх ліній та пропорцій фрагментів, до часткової деформації та перекриття символів за винятком утворення спільних ліній. Для оптимізації ефективності та швидкості розпізнавання запропоновано процес конкуренції клітинних автоматів, розроблено її алгоритми та методи їх взаємодії. Для реалізації запропонованих алгоритмів створено моделюючу програму, яка дозволила оцінити ефективність клітинно-автоматних методів та провести експерименти з розпізнавання символів англійського алфавіту. Продемонстровано успішне розпізнавання частково деформованих символів та таких, що накладаються, не утворюючи спільних ліній. На основі проведених досліджень авторами робиться висновок про перспективність використання запропонованих методів в системах розпізнавання рукописного тексту. Для створення реальної системи необхідно розробити підсистеми взаємодії зі сканувальним обладнанням, принципи сегментації тексту, очищення його від шумів, створення клітинно-автоматного поля та виведення результатів розпізнавання.

**Ключові слова:** розпізнавання тексту, розпізнавання символів, клітинний автомат, ймовірнісний автомат Мура.

### НОМЕНКЛАТУРА

$A$  – скінченний автомат;

$KA$  – клітинний автомат;

$OCR$  – optical Character Recognition (Оптичне розпізнавання символів);

$S$  – множина станів автомата Мура;

$SI$  – стани автомата Мура ( $I=1 \div 7$  для автомата типу «С»);

$X$  – вхідний алфавіт автомата Мура;

$Y$  – вихідний алфавіт автомата Мура;

$\delta$  – функція переходів автомата Мура;

$\mu$  – функція виходів автомата Мура;

$\rightarrow$  – напрям руху автомату  $A$  вправо;

$\leftarrow$  – напрям руху автомату  $A$  вліво;

$\downarrow$  – напрям руху автомату  $A$  вниз;

$\uparrow$  – напрям руху автомату  $A$  вгору.

### ВСТУП

Роботи з розробки та впровадженню у повсякденне життя систем розпізнавання символів провадяться вже

досить давно. Як правило, такі системи розбивають процес перекладу на окремі частини: отримання графічного зображення тексту, його очищення від шумів, сегментацію зображення, власне, розпізнавання символів та збереження отриманих результатів. Вважається, що на цьому шляху досягнуто значних успіхів, оскільки діючі комерційні системи розпізнавання дають досить точні результати [1, 2]. Такі системи використовують для розпізнавання різні алгоритми. Це й патентовані перетворення, деталі яких досі не оприлюднено, й штучні нейронні мережі, різні методи виділення ознак символів тощо. Тим не менше, більшість існуючих алгоритмів розпізнавання недостатньо впевнено працюють в умовах різних трансформацій символів, зокрема, при їх деформації, накладанні, не кажучи вже про розпізнавання рукописного тексту. Тому дослідники продовжують пошук альтернативних алгоритмів розпізнавання тексту, позбавлених вказаних недоліків.

Метою цієї роботи є розробка та дослідження ефективності нового методу розпізнавання символів тексту

на основі клітинних автоматів, які, як це показано, наприклад, в [3], мають беззаперечні переваги. Це і можливість паралельного обчислення, легкість і простота правил, на яких вони побудовані, проста реалізація, в тому числі й багатьох складних алгоритмів обробки зображень. Поширення цих переваг на методи розпізнавання символів дозволить розробити систему, яка ефективно працює у складних випадках, в тому числі й при роботі з рукописним текстом.

## 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо рис. 1, на якому зображено деякі латинські символи. Тут ми бачимо деформовані символи EP, вкладені символи N та O, накладені символи VZ. Людина легко ідентифікує ці символи, тоді як системи розпізнавання в цьому випадку будуть зазнавати значних проблем. Безперечно, аналогічні проблеми будуть виникати й при розпізнаванні рукописного тексту.

Задача полягає в тому, щоби з використанням клітинних автоматів розробити алгоритм розпізнавання символів, який ефективно працював би як в простих, так і у складних випадках розпізнавання [4].

Вимоги, що ставляться до розробки такого методу, наступні:

- необхідно використати КА та їх основні переваги (прості правила опису примітивів та взаємодії, легкість розпаралелювання);
- метод повинен підвищувати ймовірність розпізнавання деформованих або накладених символів;
- метод повинен легко розширюватися на випадок розпізнавання рукописних символів.

Для того, щоби задовольнити вказані вимоги, нами було запропоновано новий тип рухомих КА, які отримали назву конкуруючих клітинних автоматів.



Рисунок 1 – Деформовані символи англійського алфавіту

## 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Вперше ідею про автомати, що вирішують задачу логічного нетривіального самовідтворення висловив у своїх працях Джон фон Нейман [5]. Він використовував математичний пристрій, що складався з множини взаємопов'язаних паралельно працюючих однакових скінчених автоматів. Сьогодні такі пристрої називають, як правило, клітинними автоматами. Вони можуть розглядатися як однорідні структуровані моделі масових паралельних обчислювальних систем. Глобальна поведінка КА досягається лише локальними правилами взаємодії, які, як правило, досить прості. При цьому глобальна поведінка таких автоматів може бути досить складною. Детальніше принципи теорії КА описано в роботах С.Вольфрама (див., наприклад, [2]). Складна глобальна поведінка дозволяє моделювати за допомогою КА комплексні динамічні об'єкти, фізичні та технологічні явища, процеси самоорганізації та інше (див., наприклад, [6–7]).

Були спроби застосувати КА для цілей розпізнавання. Наприклад, в роботах [8–9] було досліджено мож-

ливість розв'язання формальної задачі розпізнавання за допомогою одновимірних клітинних автоматів, а також доведено, що використання детермінованих КА у формалізованих задачах розпізнавання в режимі реального часу приводять до експоненціального зростання швидкості роботи таких систем.

В роботі [10] клітинні автомати з мітками використовуються для виділення структурних ознак зображення літер з подальшою побудовою алгоритму розпізнавання символів тексту, причому КА використовуються лише на етапі попередньої обробки тексту.

Дослідження [11] присвячене використанню КА у задачах обробки та розпізнавання зображень у реальному часі. Тут розв'язуються задачі виділення інформаційних елементів при розпізнаванні зображень фігур, обробці лазерних трас та ідентифікації особи за рукописним текстом. В цьому випадку використовується багатоканальна клітинна система, яка значно розширює можливості систем розпізнавання.

В роботі [12] розглянуто підхід до побудови сімейств базисів ортогональних перетворень за допомогою динаміки клітинних автоматів. Автор пропонує для побудови таких базисів застосовувати КА з алфавітом внутрішніх станів довільної потужності. Для формалізації запропонованого підходу вводиться удосконалення моделі КА – клітинний автомат з кодовою множиною. Відмінністю цього підходу є також побудова сімейств ортогональних базисів з подальшим вибором найкращих з них в контексті задачі, що розв'язується.

Тим не менше, реальні застосування та розробки робочих систем розпізнавання символів на основі КА авторам невідомі. Однак, можливості, які обіцяють КА, їх природний паралелізм та перспективи, що відкриваються перед розробниками систем розпізнавання, спонукають науковців звертатися до цієї теми досліджень.

Що стосується комерційних OCR-систем, тут безсумнівним лідером є Fine Reader, який вже став стандартом цієї галузі. Однак, висока вартість ліцензування, закритість алгоритму розпізнавання та вимогливість до апаратних ресурсів призводять до того, що розвиваються альтернативні проекти, метою яких є розробка простих, швидкодіючих систем розпізнавання з відкритим кодом. До таких проектів можна віднести Image Text Editor [13], OpenOCR (Tesseract) [14], Kognition – OCR-системи для KDE-Linux [15] та деяких інших альтернативних Open Source проектах розпізнавання символів. Жоден з цих проектів не використовує КА для реалізації процесу розпізнавання.

## 3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для реалізації поставлених в попередніх розділах завдань нами було запропоновано використати рухомі КА, траєкторії руху яких співпадають з символами, що ними описуються. Разом з тим, задаються такі правила функціонування та взаємодії КА, які переводять систему до стаціонарного стану, коли на кожному символі накопичуються автомати певного типу. Отже, задача розпізнавання зводиться до аналізу типів множин автоматів в тій чи іншій області клітинно-автоматного поля. Досить зручно це виконувати співставленням певного кольору тому чи іншому типу КА. Тоді окремі символи в процесі розпізнавання набуватимуть характерного кольору.



Розглянемо алгоритми функціонування КА у вигляді графу переходів ймовірнісного автомата Мура (рис. 2).

Формально такий автомат можна описати звичайною мовою абстрактних автоматів: скінченний автомат  $A$  описується кортежем  $A = \{S, X, Y, \delta, \mu\}$ , причому відображення  $\delta$  описує функцію переходів автомата  $\delta: S \times X \rightarrow S$ , а відображення  $\mu$  – традиційну функцію виходів автомата Мура  $\mu: S \rightarrow Y$ .

Тут вхідним сигналом (умовою переходу до іншого стану автомата) є або досягнення ним кінця лінії символу (наприклад, станів  $S1$  та  $S7$  на рис. 2), або перебування КА в точці розгалуження, яке має місце в символах:  $A, B, E, F$  та ін. При цьому автомат переходить в один з набору рівноймовірних станів (згідно графу переходів).

Вихідною реакцією КА є сигнал про напрямок руху в даний момент часу (зображено стрілками біля станів на графі переходів:  $\rightarrow$  – рух вправо,  $\leftarrow$  – рух вліво,  $\downarrow$  – рух вниз,  $\uparrow$  – рух вгору), та перевірки кута між станами переходу КА. При цьому пересуватися вони можуть лише в межах, що відповідають символам.

Цілком очевидно, що КА, заданий графом, зображеним на рис. 2, буде описувати символ «С». Аналогічним чином можна побудувати графи переходів КА, які будуть описувати інші символи. При такому описанні неважливими стають ні розміри символів, ні їх розміщення, оскільки інваріантним залишається взаємне розташування одних частин символу відносно інших.

З іншого боку, задача розпізнавання не передбачає апріорних відомостей щодо відношення тих чи інших символів до відповідного класу. Тому, як вже було зазначено, слід забезпечити такий алгоритм функціонування та взаємодії КА, щоб в процесі роботи алгоритму автомата конкретного типу накопичувалися на тих символах, яким ці типи найбільш відповідають.

Процес розпізнавання починається з того, що на клітинно-автоматному полі з символами, які необхідно розпізнати (див. рис. 3), у випадковому порядку розсіюються КА усіх можливих типів, тобто які відповідають різним символам. КА, які не потрапили на жоден символ, одразу вилучаються з поля. Решта КА залишаються на літерах (див. рис. 4).

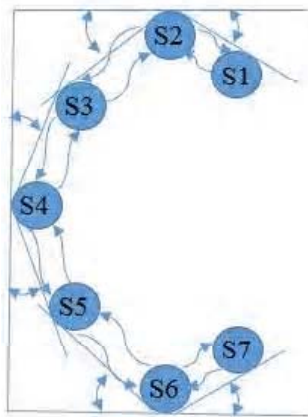


Рисунок 2 – Приклади графів переходів ймовірнісних автоматів Мура для символу «С»

Власне процес розпізнавання складається з двох етапів: руху КА по символах, на які вони потрапили, та процесу так званої «конкуренції» КА, суть якої буде пояснено нижче.

Алгоритм руху КА передбачає статистичний аналіз станів, в яких він перебуває. У випадку, якщо є недосяжні стани, відповідний автомат вилучається з поля, оскільки рухається не на «своєму» символі. Ця ситуація має місце у випадках, коли КА описує фрагмент символу, який не відноситься до його типу. Наприклад, якщо автомат типу «С» перебуває у верхній лівій частині символу «Н», він ніколи не зможе реалізувати усі свої стани, наприклад, ніколи не досягне станів  $S6$  та  $S7$  (див. рис. 2). Крім того, якщо автомат перебуває у початковому стані, який відповідає напрямку руху, перпендикулярному до фрагменту символу, він також не зрушить з місця (наприклад, автомат типу «С» на перетинці символу «Н»), отже всі стани, окрім початкового, будуть недосяжні, і такий автомат буде також вилучений з поля.

Після певної кількості взаємодій, автомати з недосяжними станами будуть вилучені з клітинно-автоматного поля, але існує ймовірність, коли КА одного символу зможе реалізувати усі свої стани, перебуваючи на клітинно-автоматному полі, яке належить іншому символу. Наприклад, КА типу «С» будуть реалізовувати всі свої стани, перебуваючи на літері «Г», а отже не будуть вилучатися. Таким чином, на літері «Г» зможуть реалізувати усі свої стани два типи КА: «С» та «Г». Аналогічна ситуація може реалізуватися з символами «I» та «D», «a» та «e» тощо.

Для виходу з такої ситуації нами запропоновано новий принцип взаємодії КА, який ми назвали «конкуренцією». Суть цього процесу полягає в тому, що під час зустрічі двох автоматів, які реалізують при русі по певній літері усі свої стани, той з них, який має більшу кількість станів (тобто повністю описує даний символ) переносить свої властивості на автомат з меншою кількістю станів. Наприклад, КА типу «С», який рухається по літері «Г», перетвориться в КА типу «Г», КА типу «I» перетвориться в КА типу «D», якщо вони дійсно рухаються по літері «D» і так далі.

Алгоритмом також передбачається своєрідне «розмноження» КА, які вдало описують відповідний символ. «Розмноження» триває доти, поки символ повністю не заповнюється КА цього типу. На цьому процес розпізнавання завершується. Тепер нам залишається зчитати з властивостей кожного КА його тип (який на рис. 5 позначається певним кольором) та ідентифікувати розпізнаний символ.

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для реалізації запропонованого алгоритму нами було розроблено моделюючу програму. Використовувалася мова програмування Java, середовище розробки – IntelliJ IDEA. На клітинно-автоматному полі сформовано образи літер англійського алфавіту, як це показано на рис. 3.

Поле заповнюється КА у випадковому порядку. Автомати, що відповідають різним символам, позначаються різними кольорами, наприклад, КА типу «a» має червоний колір; «b» – синій; «c» – зелений і так далі.

З рис. 4 видно, що на кожному символі знаходяться автомати різного кольору. Після запуску механізму розпізнавання, вони починають рухатися по зображеннях символів, намагаючись поступово реалізувати усі свої дозволені стани. В разі неможливості такої реалізації, КА вилучаються з клітинно-автоматного поля. Одночасно підключаються механізми «конкуренції» та «розмноження», які призводять до того, що на кожному символі накопичуються автомати певного кольору. Коли вони повністю заповнюють символ і не здатні продовжувати рух, процес розпізнавання завершується, а символи розрізняються своїми кольорами, як це показано на рис. 5.

Тепер лишається замінити графічні зображення символів їх текстовими еквівалентами, тобто сформувати текстовий файл.

Розроблена програма повністю реалізує алгоритм розпізнавання символів тексту на основі конкуруючих клітинних автоматів.

Для дослідження розпізнавання спотворених та накладених символів було застосовано відповідні вхідні зображення (див. рис. 6–7).



Рисунок 3 – Образи символів на клітинно-автоматному полі



Рисунок 4 – Стартовий стан клітинно-автоматного поля, заповненого клітинами у випадковому порядку



Рисунок 5 – Процес розпізнавання завершено

### 5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати роботи моделюючої програми дозволили стверджувати, що розроблений алгоритм розпізнавання символів тексту на основі конкуруючих клітинних автоматів працює досить ефективно. Було проведено успішне розпізнавання набору символів англійського алфавіту.

Аналогічні результати продемонстровано при розпізнаванні символів, що накладаються без утворення спільних ліній або мають деякі спотворені елементи.

Скріншоти з розпізнавання символів, що перекриваються, подано на рис. 6. Ліворуч подано стартовий стан системи, праворуч – розпізнані символи. Видно, що розпізнавання виконано успішно.

На рис. 7 показано результати розпізнавання частково деформованих символів.

Як бачимо, і в цьому випадку розпізнавання пройшло успішно, деформовані символи були нормально розпізнані.

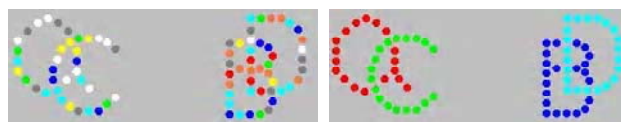


Рисунок 6 – Приклад розпізнавання символів, які частково накладаються. Ліворуч – стартовий стан системи, праворуч – розпізнані символи

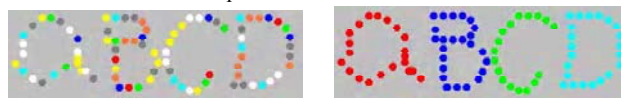


Рисунок 7 – Приклад розпізнавання символів, які мають певний ступінь деформації. Ліворуч – стартовий стан системи, праворуч – результат розпізнавання

### 6 ОБГОВОРЕННЯ

Успішне розпізнавання символів моделюючою програмою, демонструє ефективність запропонованого алгоритму на основі рухомих конкуруючих клітинних автоматів. Особливість його полягає в тому, що КА можуть рухатися лише по траєкторіях, які визначаються сукупністю їх станів та переходів. За межами вказаних траєкторій КА пересуватися не можуть (в деякій мірі, звичайно, яка визначається можливими відхиленнями, що задаються налаштуваннями). З одного боку, це може призводити до хибного розпізнавання близьких за конфігурацією символів, з другого, надає можливість розпізнавати символи, що накладаються без утворення спільних ліній. Що стосується символів зі спільними лініями, то, як відомо, із завданням їхнього розпізнавання іноді не може впоратися навіть людина. Тим не менше, вирішення такого завдання не вважається зовсім нездійсненним із використанням саме запропонованого алгоритму.

Розпізнавання спотворених символів вже не становить великої проблеми для розробленого алгоритму в разі невеликих змін у профіль символу (див. рис. 7). Саме такий тип спотворень, а саме, зсуви та нахили найчастіше зустрічаються у відсканованих документах. Як бачимо, такі типи спотворень успішно долає моделююча програма. Метод конкуруючих клітинних автоматів, запропонований нами, може бути розвинений і на рукописні тести. Проблема полягає лише у правильно розроблених правилах переходів та їх налаштуванні.

Подальші задачі авторів полягають у використанні запропонованого алгоритму для створення реальної конкурентної системи розпізнавання символів. Для цього потрібно вирішити такі завдання:

- взаємодію з пристроями сканування (стаціонарний сканер, смартфон або фотоапарат);
- сегментацію отриманих зображень, виділення окремих рядків та символів;
- створення клітинно-автоматного поля на базі сегментованого зображення;
- розпізнавання символів тексту в текстових полях та збереження результатів у текстовий файл.

Без сумніву, більшість цих завдань є окремими науково-технічними задачами, однак, запропонований метод розпізнавання має складати основу усього проекту, ос-

скільки він вирішує основну, принципово важливу задачу, – виділення потрібних ознак символів з їх зображення, без якої взагалі неможливе існування систем розпізнавання.

## ВИСНОВКИ

Таким чином, поставлені перед авторами завдання виконано повністю. З проведених досліджень можна зробити наступні висновки.

Розроблено новий метод розпізнавання символів тексту на основі конкуруючих клітинних автоматів та доведено його дієвість та адекватність. Особливістю цього метода є нечутливість до розміру символів, товщини їх ліній та пропорцій фрагментів.

Для реалізації переваг методу розпізнавання запропоновано процес конкуренції клітинних автоматів, який збільшує його ефективність та швидкість.

Запропоновані методи реалізовано у програмному коді та продемонстровано їх ефективність при роботі зі спотвореними символами та символами, що частково перекриваються. Усе це робить перспективними подальші роботи для створення системи розпізнавання рукописних символів. Для цього слід розробити підсистему роботи зі сканувальним обладнанням, принципи сегментації зображення, допоміжні засоби редагування та виведення розпізаного тексту.

## ПОДЯКИ

Це дослідження проводиться в рамках науково-дослідної тематики кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича: «Динамічні системи: математичне моделювання та розробка програмних засобів» (номер державної реєстрації: 0110U005858).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шапиро Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
2. Forsyth D. A. Computer Vision: A Modern Approach / D. A. Forsyth, J. Ponce. – Pearson Education, Inc., 2011. – 792 p.
3. Wolfram S. A New Kind of Science / S. Wolfram. – Wolfram Media, Inc., 2002. – 1197 p.
4. Zhikharevich V. V. Development and research of algorithm of characters recognition of text on the basis of competitive cellular automats // V. V. Zhikharevich, I. V. Myroniv, S. E. Ostapov //

Collection of Scientific papers of IInd Int. Conf. «Cluster Computing – 2013», Lviv, 2013, June 3–5. – P. 149–156.

5. von Neumann J. Theory of Self Reproducing Automata / J. von Neumann. – University of Illinois Press, Champaign, 1966. – 388 p.
6. Жихаревич В. В. Моделирование процессов самоорганизации и эволюции систем методом непрерывных асинхронных клеточных автоматов / В. В. Жихаревич, С. Э. Остапов // Компьютинг. – 2009. – Т. 8, № 3. – С. 61–71.
7. Жихаревич В. В. Построение и исследование непрерывной клеточно-автоматной модели процессов теплопроводности с фазовыми переходами первого рода / [В. В. Жихаревич, Л. М. Шумиляк, Л. Т. Струтинская и др.] // Компьютерные исследования и моделирование, 2013. – Т. 5, № 2. – С. 141–152.
8. Smith R. A. Real-Time Language Recognition by One-Dimensional Cellular Automata / R.A. Smith // Journal of Computer and System Sciences, 1972 – V.6, No 3. – P. 233–253.
9. Buchholz T. Real-Time Language Recognition by Alternating Cellular Automata [Electronic resource] / T. Buchholz, A. Klein, M. Kutrib // Theoretical Computer Science, 2000. – Vol. 1872. – P. 213–225. – Access mode: <http://cage.ugent.be/~klein/papers/ACA.pdf>
10. Суясов Д. И. Выделение структурных признаков изображений символов на основе клеточных автоматов с метками [Электронный ресурс] / Д. И. Суясов // Информационно-управляющие системы, 2010. – № 4. – С. 39–45. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-strukturnykh-priznakov-izobrazheniy-simvolov-na-osnove-kletochnykh-avtomatov-s-metkami>
11. Белан С. Н. Использование клеточных технологий в системах обработки и распознавания изображений [Электронный ресурс] / С. Н. Белан // Штучний інтелект, 2008. – № 3. – С. 244–253. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/6952>.
12. Евсютин О. О. Исследование дискретных ортогональных преобразований, получаемых с помощью динамики клеточных автоматов [Электронный ресурс] / О. О. Евсютин // Компьютерная оптика, 2014. – Т. 38, № 2. – С. 314–321. – Режим доступа: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO38-2/380221.pdf>
13. ImageTextEditor [Electronic resource]. – Access mode: <http://imated.sourceforge.net>
14. Tesseract OCR [Electronic resource]. – Access mode: <http://sourceforge.net/projects/tesseract-ocr/>
15. Kognition [Electronic resource]. – Access mode: <http://sourceforge.net/projects/kognition/>

Стаття надійшла до редакції 27.07.2015.

Після доробки 02.08.2015.

Жихаревич В. В.<sup>1</sup>, Миронив И. В.<sup>2</sup>, Остапов С. Э.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

<sup>2</sup>Ассистент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

<sup>3</sup>Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

## АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАНИЯ СИМВОЛОВ ТЕКСТА НА ОСНОВЕ КОНКУРИРУЮЩИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В данной работе предложен новый метод распознавания символов текста, основанный на концепции конкурирующих клеточных автоматов. Разработан новый тип клеточных автоматов, траектории движения которых совпадают с формой представляемого символа. Преимуществами такого метода является его нечувствительность к размерам символов, толщине линий и пропорциям их фрагментов, к частичной деформации и наложениям символов без образования общих линий. Для оптимизации эффективности и скорости распознавания предложен процесс конкуренции клеточных автоматов, разработаны его алгоритмы и методы взаимодействия клеток. В качестве реализации предложенных алгоритмов создана моделирующая программа, позволяющая оценить эффективность клеточно-автоматных методов и провести эксперименты по распознаванию символов английского алфавита. Продемонстрировано успешное распознавание частично деформированных, а также перекрывающихся символов без образования общих линий. На основании проведенных исследований сделан вывод о перспективности использования данных методов в системах распознавания рукописного текста.

Для создания реальной системы на основе данных методов необходимо разработать подсистемы взаимодействия со сканирующим оборудованием, принципы сегментации текста, очистки его от шумов, создания клеточно-автоматного поля и вывода результатов распознавания.

**Ключевые слова:** распознавание текста, распознавание символов, клеточный автомат; вероятностный автомат Мура.

Zhikharevich V. V.<sup>1</sup>, Myroniv I. V.<sup>2</sup>, Ostapov S. E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>PhD, Associate Professor, software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine

<sup>2</sup>Assistant Professor, software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine

<sup>3</sup>Dr. of Science, Professor, Head of the software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine

#### CHARACTER RECOGNITION ALGORITHM ON THE BASE OF COMPETITIVE CELLULAR AUTOMATA

This paper presents a new method for character recognition that is based on the concept of competing cellular automata. A new type of cellular automata, which move trajectory coincides with the character shape is represents. The advantage of this method is the insensitivity to the character size, lines thickness and proportion of fragments, distortion and partial overlapping symbols except the formation of joint lines. To optimize the recognition efficiency and speed offered the cellular automata competitive process; developed its algorithms and methods of interaction. To implement the proposed algorithms the modeling program was created. This software allowed to evaluate the effectiveness of cellular automata techniques and conduct experiments on English alphabet character recognition. It was demonstrated the successful recognition partly distorted characters and such imposed without forming joint lines. On the basis of these experiments authors concluded the prospects of using the proposed method in handwriting recognition. To create a real system it's need to develop subsystem of interaction with scanning equipment, text segmentation principles, clearing it from the noise and automatic creation of cellular fields and output the recognition results.

**Keywords:** text recognition, character recognition, cellular automaton, Moore probabilistic automaton.

#### REFERENCES

- Shapiro L., Stokman Dzh. Komp'yuternoe zrenie. Moscow, Binom, Laboratorija znanij, 2006, 752 p.
- Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Pearson Education, Inc., 2011, 792 p.
- Wolfram S. A New Kind of Science. Wolfram Media, Inc., 2002, 1197 p.
- Zhikharevich V. V., Myroniv I. V., Ostapov S. E. Development and research of algorithm of characters recognition of text on the basis of competitive cellular automats, *Collection of Scientific papers of I<sup>nd</sup> Int. Conf. «Cluster Computing-2013»*. Lviv, 2013, June 3–5, pp. 149–156.
- von Neumann J. Theory of Self Reproducing Automata. University of Illinois Press, Champaign, 1966, 388 p.
- Zhikharevich V. V., Ostapov S. Je. Modelirovanie processov samoorganizacii i jevoljucii sistem metodom nepreryvnyh asinhronnih kletochnyh avtomatov. Komp'yuting, 2009, vol. 8, No. 3, pp. 61–71.
- Zhikharevich V. V., Shumiljak L. M., Strutinskaja L. T. i dr. Postroenie i issledovanie nepreryvnoj kletочно-автоматной модели процессов теплопроводности с fazovimi perehodami pervogo roda, *Komp'yuternye issledovanija i modelirovanie*, 2013, vol. 5, No. 2, pp. 141–152.
- Smith R. A. Real-Time Language Recognition by One-Dimensional Cellular Automata, *J. of Computer and System Sciences*, 1972, Vol. 6, No. 3, pp. 233–253.
- Buchholz T., Klein A., Kutrib M. Real-Time Language Recognition by Alternating Cellular Automata [Electronic resource], *Theoretical Computer Science*, 2000, Vol. 1872, pp. 213–225. Access mode: <http://cage.ugent.be/~klein/papers/ACA.pdf>
- Sujasov D. I. Vydelenie strukturnyh priznakov izobrazhenij simvolov na osnove kletochnyh avtomatov s metkami [Jelektronnyj resurs], *Informacionno-upravljajushhie sistemy*, 2010, No. 4, pp. 39–45. Rezhim dostupa: <http://cyberleninka.ru/article/n/vydelenie-strukturnyh-priznakov-izobrazheniy-simvolov-na-osnove-kletochnyh-avtomatov-s-metkami>
- Belan S. N. Ispol'zovanie kletochnyh tehnologij v sistemah obrabotki i raspoznavanija zobrazhenij [Jelektronnyj resurs], *Shtuchnij intelekt*, 2008, No. 3, pp. 244–253. Rezhim dostupa: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/6952>.
- Evsjutin O. O. Issledovanie diskretnyh ortogonal'nyh preobrazovanij, poluchaemyh s pomoshh'ju dinamiki kletochnyh avtomatov [Jelektronnyj resurs], *Komp'yuternaja optika*, 2014, vol. 38, No. 2, pp. 314–321. Rezhim dostupa: <http://www.computeroptics.smr.ru/KO/PDF/KO38-2/380221.pdf>
- ImageTextEditor [Electronic resource]. Access mode: <http://imaged.sourceforge.net>
- Tesseract OCR [Electronic resource]. Access mode: <http://sourceforge.net/projects/tesseract-ocr/>
- Kognition [Electronic resource]. Access mode: <http://sourceforge.net/projects/kognition/>

## ЗНАНИЕ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Рассмотрены проблемы глобального доступа к данным и знаниям компании. Наличие автоматизированных объектов потребовало реализации интеллектуальных технологий, методов и моделей оценки качества их функционирования.

Предложен метод оптимизации доступа к данным, который ориентирован на интеграцию уже существующих локальных данных и предусматривает независимую поддержку и администрирование каждого из них. Метод ориентирован на детерминированные процессы, что ограничивает его применение.

Сформулированы особенности методов обработки данных, предложен расширенный знание-ориентированный метод нечеткого вывода TSK. Нечеткий метод TSK, который в отличие от существующих, дополнительно включает в систему уравнений функцию полезности и позволяет осуществлять интеграцию знаний в процедурах нечеткого логического вывода с учетом значимости правил. Экспериментом подтверждена эффективность подхода в знание-ориентированных технологиях.

**Ключевые слова:** федеративная база данных, распределенный запрос, неоднородные системы, локальные данные, база правил.

### НОМЕНКЛАТУРА

EAI – enterprise application integration;  
ECM – enterprise content management;  
EDR – enterprise data replication;  
EII – enterprise information integration;  
ETL – extract transform loading;  
TSK – метод Такаги-Сугэно-Канга;  
БД – база данных;  
СУБД – система управления базами данных;  
ФД – федерализация данных;  
 $\tilde{F}$  – нечеткое пространство данных и знаний;  
 $R^{(k)}$  – база правил;  
 $f(x)$  – полином  $n$ -го порядка;  
 $\mu_\alpha$  – функция полезности;  
 $\mu_{x_i}$  – функция принадлежности;  
 $\bar{x}_i$  – исходные данные;  
 $\bar{y}_i$  – параметр логического вывода;  
 $\bar{y}_k$  – значения управленческого воздействия;  
 $\bar{y}$  – выходной сигнал;  
 $x'$  – некоторый известный вектор;  
 $y'$  – искомый вектор;  
 $\mu(x, y)$  – оператор нечеткого отношения Мамдани;  
 $y_0$  – искомый четкий вектор;  
 $y_{0_i}$  – центр масс частного образа;  
 $S_i$  – площадь частного образа;  
 $U$  – множество узлов;  
 $S$  – каналы передачи данных;  
 $P$  – выполнение запросов;  
 $Q$  – множество запросов;  
 $W$  – множество обновлений;  
 $T_1$  – время выполнения запроса;  
 $q_i$  – время обновления;  
 $D$  – детерминированный процесс;  
 $D_j$  – дисковое пространство  $j$ -го узла;  
 $F$  – нечеткое пространство состояний;  
 $L_i$  – объем  $i$ -го фрагмента данных;

$n$  – количество фрагментов;  
 $P_m$  – вероятностный процесс;  
 $P$  – процессы;  
 $S_n$  – интеграция знаний;  
 $V$  – множество ограничений;  
 $A$  – интеграция данных;  
 $T$  – максимальное время выполнения запросов.

### ВВЕДЕНИЕ

С каждым днем появляются новые технологии, что влечет за собой реорганизацию структур, неоднородных приложений и систем, оптимизацию их применения. Чтобы суметь обеспечить комфортный доступ к данным, требуются применение сложное знание – ориентированных технологий и технологии интеграции информации. Необходимо обеспечить также оптимизированный доступ к этой информации независимо от ее физического местоположения.

Интеграция информации должна происходить во всей распределенной среде. Чаще всего, проводить такого рода оптимизацию затратно для предприятий, поэтому применяют оптимизацию запросов по локальным местам. Сегодня в компаниях, приобретает все большую актуальность задачи с использованием информационных технологий.

Основной информацией, которая используется в небольших компаниях, является документооборот. Данные сохраняются в локальных базах и доступны лишь пользователям данной системы. Это приводит к тому, что доступ к данным и формирование отчетности может проводиться только в локальных системах учета или в бухгалтерском виде.

Работа направлена не только на выявления ошибок в автоматизированной системе микропроцессорной централизации, но также их последующая обработка, классификация и прогнозирование с помощью метода TSK. Целью исследования является интеграция знаний и данных, их совместное использование в системах, что позволит использовать интеллектуальное управление сложных систем и повысить качество управления.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть существует множество процессов, для которых сформированы отчеты:

$$\{Pr_j\}, j \in J, \tag{1}$$

$$\{I_{jk}\}, k \in K. \tag{2}$$

Отчеты (2) характеризуется множеством показателей  $B$ , на процессах (1). Процессы (1) формируются в детерминированном, вероятностном, нечетком пространствах состояний. Процессы (1) характеризуются интеграцией динамических данных  $A$  и знаний  $S_i$ :

$$\forall Pr_j(\tau), Pr_j \in \{Pr_j\} A \cup Sh. \tag{3}$$

Структура предметной области предложена на рис. 1. В работе необходимо:

- выполнить содержательный анализ предметной области;
- рассмотреть существующие методы обработки информации;
- предложить алгоритмы формирования запросов;
- предложить знание-ориентированный расширенный метод нечеткой модели представления знаний на основе подходов TSK [5].

### 2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Существуют различные методы оптимизации и распределения данных в системе [1–4]. Организованный доступ к данным осуществляется несколькими подходами [1]:

- способ консолидации;
- способ федерализации;
- сервисный способ;
- способ распространения данных.

Среди предложенных выше способов более глобальным является способ федерализации. Для реализации данного способа доступа в систему следует оптимизировать запрос [2]. Преимуществом применения такого доступа будет удобный доступ и поиск необходимой информации во всей системе [3, 4].

Знание – ориентированные методы [5–7] на основе правил продукций имеют такие свойства как, снижение уровня неопределенности процессов и объектов, это позволяет повысить скорость в задачах логического вывода [6]. Также существует недостаток это настройка функций принадлежности нечетких процессов, сложность приобретения знаний, интерпретация полученных знаний [7].

В данной работе предложен знание-ориентированный расширенный метод нечеткой модели представления знаний на основе TSK [5], а также сравнительный анализ расширенного метода TSK с методом Мамдани [6].

### 3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для реализации доступа к неоднородным данным автоматизированных систем, используют следующие

методы [1]: консолидация, федерализация, распространение данных, сервисный подход.

Консолидация [1] – однонаправленный процесс, то есть данные из нескольких источников сливаются в Хранилище, но не распространяются из него обратно в распределенную систему. Процесс заполнения хранилища состоит из трех фаз – извлечение, преобразование, загрузка ETL (extract transformation loading). Во многих случаях именно ETL понимают под термином «интеграция данных». Технологией консолидации данных является управление содержанием корпорации ECM (enterprise content management). Большинство решений ECM направлены на консолидацию и управление неструктурированными данными, такими как документы, отчеты и web-страницы.

Федерализация: в федеративных БД физического перемещения данных не происходит: данные остаются у владельцев, доступ к ним осуществляется при необходимости (при выполнении запроса). Изначально федеративные БД предполагали создание в каждом из  $n$  узлов  $n-1$  фрагментов кода, позволяющего обращаться к любому другому узлу [1].

При использовании медиатора создается общая модель данных. Медиатор – посредник, поддерживающий единый пользовательский интерфейс на основе глобального представления данных, содержащихся в источниках, а также поддержку отображения между глобальным и локальным представлениями данных. Пользовательский запрос, сформулированный в терминах единого интерфейса, декомпозируется на множество подзапросов, адресованных к нужным локальным источникам данных. На основе результатов их обработки синтезируется полный ответ на запрос. Используются две разновидности архитектуры с посредником – globalas view и localas view.

Интеграция корпоративной информации ЕИ (enterprise information integration) – это пример технологии, которая поддерживает федеративный подход к интеграции данных. Изучение и профилирование первичных данных необходимые для федерализации, несильно отличаются от аналогичных процедур, требуемых для консолидации.

Распространение данных: приложения распространения данных осуществляют копирование данных из одного места в другое. Примерами технологий, поддерживающих распространение данных, являются интеграция корпоративных приложений EAI (enterprise application integration) и тиражирование корпоративных данных EDR (enterprise data replication). От федеративных БД этот способ отличает двустороннее распространение данных [1].

Сервисный подход: сервисно-ориентированная архитектура SOA (service oriented architecture), успешно применяемая при интеграции приложений, применима и при интеграции данных. Данные также остаются у владельцев и даже местонахождение данных неизвестно. При запро-

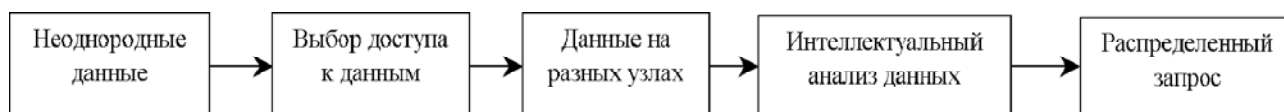


Рисунок 1 – Структура анализа предметной области

се происходит обращение к определенным сервисам, которые связаны с источниками, где находится информация и ее конкретный адрес. Интеграция данных объединяет информацию из нескольких источников таким образом, чтобы ее можно было показать клиенту в виде сервиса.

В базовой модели [2] оптимизация производится путем формирования самого запроса. В нашем случае оптимизация происходит на самих узлах. Для разрешения изменяющихся данных существующих воспользуемся методом федерализации информации [1], путем объединения всех имеющихся данных в единую виртуальную базу данных, хотя фактически местоположение данных не меняется.

Достоинства данного метода в том, что независимость данных приводит к минимальным изменениям, данных. Рассмотрим подходы к расширению существующих методов.

#### 4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Существующие методы реализации доступа [8, 9] не всегда реализуют требуемые временные ресурсы и оптимизацию требуемых вычислительных ресурсов. В основе данного метода лежит ФД. Под неоднородными системами следует понимать системы, реализованные в реляционной модели данных, но имеющие различные наборы объектов с отличными семантическими связями (рис. 2) [4].

Метод ориентирован на интеграцию уже существующих локальных данных и предусматривает независимую поддержку и администрирование каждого из них. Такая независимость хранилищ позволяет работать с системой даже при выходе из строя отдельных узлов сети или линий связи и не требует наличия знания об операциях, выполняющихся в других узлах сети.

Основой метода является также работа с метаданными каждого из существующих в сети хранилищ данных. Реализация метода сводится к формированию распределенной транзакции к множеству доступных на момент поступления запроса удаленных серверов БД, на основе анализа метаданных узлов сети.

Утверждение 1. Если система реализует функции доступа к данным за минимальное время, то осуществляем оптимизацию поиска методом половинного деления (дихотомии).

Справедливость утверждения 1 очевидна, что и определяет применение методов оптимизации.

В общем виде метод доступа к данным может быть представлен следующим образом:

Этап 1. Формирование неоднородных данных в системе.

Этап 2. Используя метод федерализации, инициируем доступ к неоднородным данным.

Этап 3. Оптимизация данных на основе метода дихотомии, формирование распределенного запроса  $\{C_i\}, i \in I$ .

Этап 4. Выполнение запросов  $\{C_i\}, i \in I$ .

Этап 5. Если  $C_i = \text{false}$ , то выполняются модификация БД и реализация этапов 1–4;

Этап 6. Для этапов 1–5 осуществляем минимизацию временных ресурсов  $\{Pr_j(\tau)\} \rightarrow \min$ ;

Этап 7. Останов.

Так как в решаемой задаче на каждом узле системы хранятся эквивалентные по смыслу данные, то при выполнении транзакции будет происходить запрос данных со всех доступных интегрируемых системах с последующим объединением собранных данных в единое представление.

Учитывая что перспективные решения в задачах управления ориентированы на знание-ориентированные технологии, применим метод Такаги-Сугено-Канга. Для дальнейшего анализа и прогнозирования ошибок в системе следует применить расширение метода нечеткого управления TSK [5].

В рассмотренном модуле нечеткого управления используется база правил  $R^{(k)}, k=1,2,\dots,n$ . Модель представлена в виде:

$$\text{if } x_i \text{ is } A \text{ then } y = f(x), \quad (4)$$

применяемые в нем правила нечеткие только в части IF, тогда как в THEN неизвестные представлены полиномом:

$$R^{(1)}: \text{IF}(x_1 \text{ is } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2^N \dots \text{AND } x_n \text{ is } A_n^N) \text{ THEN } y_N = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n);$$

$$R^{(l)}: \text{IF}(x_1 \text{ is } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2^N \dots \text{AND } x_n \text{ is } A_n^N) \text{ THEN } y_N = f^{(l)}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

– правила (25), (4) характеризуется дополнительно зависимостями [7]:

$$\mu_\alpha \left\{ \text{if } x_i \text{ is } A_i \text{ then } y = f(x_i) \right\}, \alpha \in A. \quad (6)$$

Недостатком существующего метода TSK [5] является отсутствие влияния значимости правил в виде нечет-

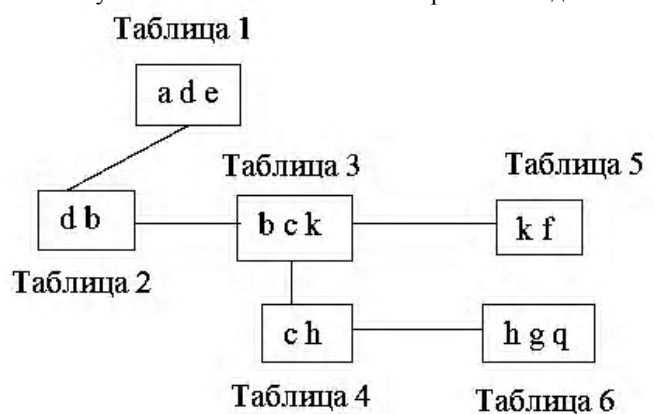
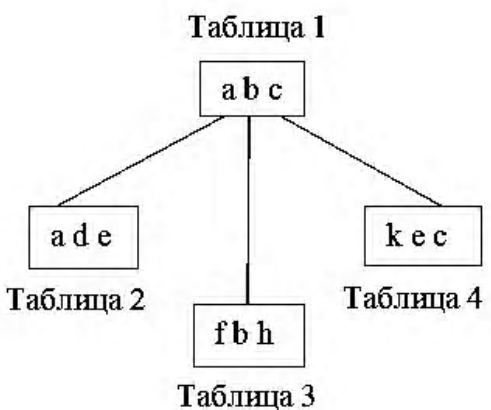


Рисунок 2 – Пример структурной схемы неоднородных БД

кой функции полезности правил (4)–(6) [6]. Предлагается метод, этапы которого представлены:

Этап 1. Формирование правил продукций TSK.

Этап 2. Формирование функции принадлежности  $\mu_{x_i}$ .

Этап 3. Формирование функций полезности  $\{\mu_{\alpha}\}, \mu_{\alpha} = [0,1]$ .

Этап 4. Задание исходных данных об системе  $\bar{x}_i, i \in I$ .

Этап 5. Вычисление параметров логического вывода  $\Omega, \bar{y}_j, j \in J$ .

Этап 6. Вычисление значений управленческих воздействий  $\{\bar{y}_k\}, k \in K$ .

Этап 7. Прогон на тестовой выборке соответствия  $\bar{x} \rightarrow \bar{y}$ .

Этап 8. Если  $\bar{x} \rightarrow \bar{y} = \text{true}$ , то else  $\bar{x} \rightarrow \bar{y} = \text{false}$  и выполнить этапы 1–7;

Этап 9. Останов.

Вычислительная сложность данного метода близка к квадратичной, что определяет перспективность подхода.

Функционирование системы в условиях неопределенности компонент предлагает применение знаний эксперта. Существующие методы и модели [6] Мамдани и TSK обладают достоинствами и недостатками, что ограничивает их реализацию на практике.

Рассмотрим пример модуля управления TSK при условии, что  $\mu_{\alpha} = \mu_{\beta} = 1$ :

$$R^{(1)}: \text{IF}(x_1 \text{ это малое AND } x_2 \text{ это среднее}) \text{ THEN } y_1 = 2 + 3x_1 - x_2,$$

$$R^{(2)}: \text{IF}(x_1 \text{ это малое AND } x_2 \text{ это среднее}) \text{ THEN } y_2 = -x_1 + 4x_2. \quad (7)$$

Определим его выходной сигнал  $\bar{y}$  для  $\bar{x}_1 = 2$  и  $\bar{x}_2 = 3$  при функции принадлежности (рис. 3)

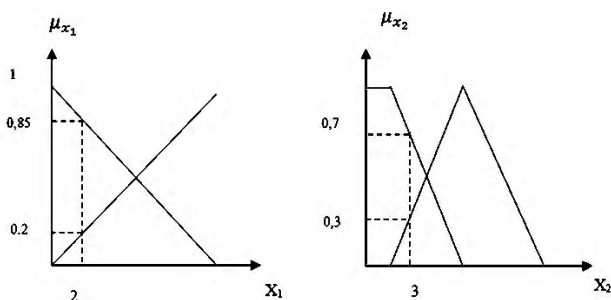
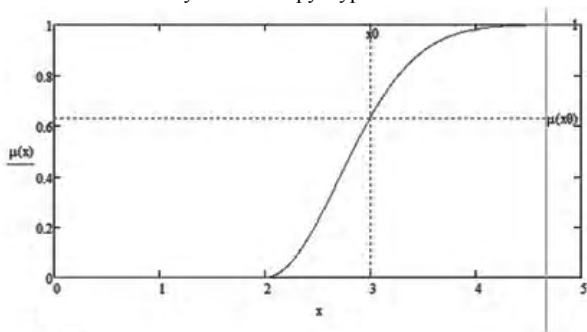
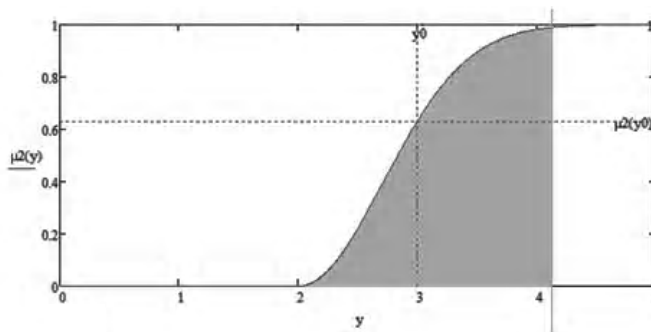


Рисунок 3 – Структура вычислений



а



б

Рисунок 4 – Графический метод: а – метод TSK, б – метод Мамдани

Выполнив вычисления значения  $\bar{y}$  на выходе модуля нечеткого управления по формуле (8):

$$\bar{y} = \frac{w^1 \bar{y}_1 + w^2 \bar{y}_2}{w^1 + w^2}, \quad (8)$$

получим  $\bar{y} = 7,6$ , что является удовлетворительным.

Выполним сравнительный анализ нечетких расширенных методом TSK и методов Мамдани [6].

Тогда метод Мамдани представлен в виде:

$$\left\{ \text{if } x_i \text{ is } \mu(x_i) \text{ then } y \text{ is } \mu(y) \right\}. \quad (9)$$

Решение (9) находим как

$$y' = \vee x' \wedge \mu(x, y), \quad (10)$$

$$\mu(x, y) = \wedge(\mu(x_i), \mu(y)). \quad (11)$$

Построим правила продукций вида (11) для задачи выявления, локализации и устранения рисков при движении мобильного объекта:  $x$  – скорость объекта

$$\text{if } x_1 \text{ is "малое"} = \text{then } y \text{ is "малое"},$$

$$\text{if } x_1 \text{ is "среднее"} = \text{then } y \text{ is "среднее"},$$

$$\text{if } x_1 \text{ is "большое"} = \text{then } y \text{ is "большое"}. \quad (12)$$

Определим функции принадлежности в виде гауссианов:

$$\text{"большое"} - \mu(x) = 1 - e^{-k_3(x-b)^2};$$

$$\text{"малое"} - \mu(x) = 1 - e^{-k_1 x^2};$$

$$\text{"среднее"} - \mu(x) = 1 - e^{-k_2(x-a)^2}.$$

Решим задачу на первом правиле из (12) графическим метод [5] (рис. 4)

Задав  $x'$ , находимо решение  $y'$ . После дефаззификации [5] на основе центра масс

$$y_0 = \frac{\sum_i y_{i0} \cdot S_i}{\sum_i S_i},$$

$$y_0 = \frac{3,5 \cdot 0,25 + 5,5 \cdot 3}{3,25} = \frac{0,9 + 16}{3,25} = \frac{17}{3,25} = 5,85.$$



Исходя из предметной области, для перемещения мобильного объекта определены искомые величины метода TSK и метода Мамдани (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты сравнения методов

Метод	Результат
Метод TSK	7,6
Метод Мамдани	5,85

Искомое решение, по данным экспертных оценок, находится в интервале  $5,9 \leq y_0 \leq 8,2$ . Как следует из табл. 1 и данных эксперимента, метод TSK является более точным, позволяет получать устойчивые решения. Это и определяет преимущества метода.

### 5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Рассматриваемая БД представляет собой множество фрагментов данных в системе

$$F = \{f_i, i = 1 \dots n\}, \quad (13)$$

которые распределены на множестве узлов

$$U = \{u_j, j = 1 \dots m\}, \quad (14)$$

соединенных каналами передачи данных

$$S = \{s_k, k = 1 \dots h\}. \quad (15)$$

На следующем этапе функционирует приложение, которые инициируют выполнение запросов

$$P = \{p_s, s = 1 \dots r\}. \quad (16)$$

В процессе функционирования БД порождается множество запросов

$$Q = \{q_d, d = 1 \dots n_d\}, \quad (17)$$

и множество обновлений

$$W = \{w_e, e = 1 \dots n_w\}, \quad (18)$$

где  $e \in w$  для элементов, которых определены функции

$$T_1(q_d, A), \quad (19)$$

– время выполнения запроса

$$q_i(d = 1 \dots n_d) \text{ и } T_2(w_e, A), \quad (20)$$

– время обновления

$$w_e(e = 1 \dots n_w). \quad (21)$$

Основной задачей оптимизации БД является необходимость найти систему распределения данных с учетом (13)–(21), при которой суммарное среднее время выполнения запросов и распространения обновлений, порожденных функционированием системы, минимально. Таким образом, оптимизация запросов реализуется в виде

$$\langle F, Q, W, T \rangle \xrightarrow{V} \min. \quad (22)$$

При вычислении критерия оптимальности необходимо учитывать следующие ограничения:

– в БД должны присутствовать хотя бы одна копия данных:

$$\sum_{j=1}^n A_{ij} \geq 1, (i = 1, n), \quad (23)$$

– суммарный объем данных, хранящихся на узле, не должен превышать общее дисковое пространство данного узла:

$$\sum_{j=1}^n L_i \times A_{ij} \leq D_j, (j = 1, m), \quad (24)$$

– максимальное время выполнения запросов не должно превышать заданного предельного значения  $T \leq T^*$ . Тогда

$$V = \sum_{i=1}^m A_{ij} \cup \sum_{j=1}^n L_i \times A_j. \quad (25)$$

Оптимизация запросов в работе, реализована с использованием расширения метода дихотомии (половинного деления) [10]. Применение метода позволило сократить время реализации запросов до 10%, что является удовлетворительным.

### 6 ОБСУЖДЕНИЕ

Усовершенствованный метод доступа является динамичным, но СУБД не учитывает особенности реализации распределенной обработки [3]. При таком подходе проблема метода оптимизации распределения данных рассматривается как комплексная проблема.

Структурная схема осуществления такого запроса представлена на (рис. 5). На основе поступающего запроса проводится анализ доступных на данный момент серверов и формируется запрос к каждому активному серверу. После чего осуществляется объединение полученных наборов данных в результирующее множество.

Особенностью формирования распределенного запроса (рис. 5) является требование доступности активных



Рисунок 5 – Схема формирования распределенного запроса



Рисунок 6 – Схема обработки распределенного запроса

серверов, что в ряде случаев вызывает сложности. Экспериментом подтверждено, что вычислительная сложность процессов (рис. 5) близка к линейной –  $O(n)$ . Конвертирование названий атрибутов и условия выборки происходит в соответствии с таблицами метаданных, расположенными на используемом сервере сети, и может быть представлена в виде (рис. 6).

Недостатком метода TSK [5–7] является его ориентация на непрерывные процессы и в меньшей мере учитывает неоднородность входных данных и знаний. В связи с этим, усовершенствование метода TSK на основе функции полезности является перспективным, однако требует дополнительных исследований. Экспериментом подтверждено (табл. 1), что реализация метода отличается большей универсальностью по сравнению с методом Мамдани [8, 9].

**ВЫВОДЫ**

Разработка знание-ориентированных интеллектуальных методов и моделей анализа сложных объектов является важной составляющей технологических процессов в производственных системах, которые функционируют в условиях неопределенности. Знание-ориентированные методы направлены на моделирование и обработку детерминированных, вероятностных и нечетких знаний, как фактор повышения качества систем.

В результате проведенных исследований получены научные и практически значимые результаты, которые

позволяют сократить время их реализации при одновременном повышении достоверности в прятках решений до 12%, что является удовлетворительным.

1. Выполнен содержательный анализ предметной области, определены преимущества и недостатки существующих решений.

2. Определены особенности методов обработки информации на основе оптимизации запросов, сделан вывод об их применимости в предметных областях, что определяет практическую значимость полученных результатов.

3. Получил дальнейшее развитие нечеткий метод Такаги-Сугено-Канга, который в отличие от существующих, дополнительно включает в систему уравнений функцию полезности на интервале лингвистических термов [0, 1], что позволяет осуществлять интеграцию знаний в процедурах нечеткого логического вывода Такаги-Сугено-Канга с учетом значимости правил и повышает достоверность решений.

4. Перспективой дальнейших исследований является адаптация исследований в предметных областях проектирования и внедрение результатов в производственных системах.

**БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках государственной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета радиозлектроники «Нейро-фаззи системы для текущей кластеризации и классификации последо-

вательностей данных в условиях их искривления отсутствующими и аномальными» (номер гос. регистрации 0113U000361), где авторами предложены новые методы на основе развития метода Такаги-Сугено-Канга для оптимизации запросов и принятия решений на знаниях.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Архипенков С. Аналитические системы на базе Oracle Express OLAP / С. Архипенков. – М. : Диалог-МИФИ, 2000. – 287 с.
2. Data integration in the distributed information systems // International Journal of Advanced Studies. – 2012. – №1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://ijournal-as.com/issues/2012/1/bisterfeld.pdf>
3. Кузьмина С. П. Базы данных [Текст] / С. П. Кузьмина. – С.Пб. :СПбГИЭУ, 2006. –189 с.
4. Райордан Р. Основы реляционных баз данных / Р. Райордан. – М. : Издательско-торговый дом «Русская редакция», 2001. – 384 с.
5. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилинский, Л. Рутковский. – М. : Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.

6. Интеллектуальное управление технологическими процессами [Текст]: монография научное издание / [Бодянский Е. В., Кучеренко Е. И., Михальов А. И. и др.]. – Днепропетровск : Национальная металлургическая академия Украины, 2013. – 213 с.
7. Tsoukalas L. H. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering / L. H. Tsoukalas, R. E. Uhrig. – New York : John Wiley & Sons, Inc, 1997. – 587 p.
8. Ходак М. В. Информационная технология автоматизированного управления мобильными объектами / М. В. Ходак, Е. И. Кучеренко // Праці VII міжнародної школи-семинару «Теорія прийняття рішень». – Ужгород, УжНУ, 2014. – С. 261–262
9. Ходак М. В. Применение нечеткой логики в моделях процессов сложных систем / М. В. Ходак, Е. И. Кучеренко // Материалы 19-го Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Том 6. – Харьков, ХНУ-РЭ, 2015. – С 62–63.
10. Метод дихотомии или метод половинного деления [Электронный ресурс]. – Режим доступа – <http://bpascal.ru/download/desc/319.php>

Статья поступила в редакцию 27.07.2015  
После доработки 11.08.2015.

Кучеренко С. І.<sup>1</sup>, Ходак М. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Д-р технічних наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

<sup>2</sup>Аспірантка Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

### ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Розглянуто проблеми глобального доступу до даних і знань компанії. Наявність автоматизованих об'єктів зажадало реалізації інтелектуальних технологій, методів і моделей оцінки якості їх функціонування.

Запропоновано метод оптимізації доступу до даних, який орієнтований на інтеграцію вже існуючих локальних даних і передбачає незалежну підтримку та адміністрування кожного з них. Метод орієнтований на детерміновані процеси, що обмежує його застосування.

Сформульовано особливості методів обробки даних, запропонований розширений знання-орієнтований метод нечіткого виводу TSK. Нечіткий метод TSK, який на відміну від існуючих, додатково включає в систему рівнянь функцію корисності і дозволяє здійснювати інтеграцію знань в процедурах нечіткого логічного висновку з урахуванням значущості правил. Експериментом доведено ефективність підходу в знання-орієнтованих технологіях.

**Ключові слова:** федеративна база даних, розподілений запит, неоднорідні системи, локальні дані, база правил.

Kucherenko Ye. I.<sup>1</sup>, Khodak M. V.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dr. Sc., prof., Professor of Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup>Postgraduate student of Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

### KNOWLEDGE-ORIENTED INTELLECTUAL METHODS DECISION UNDER UNCERTAINTY

The problems of global access to data and knowledge of the company. Availability of automated facilities require the implementation of intelligent technologies, methods and models for assessing the quality of their functioning.

A method for optimizing data access, which is focused on the integration of existing local data, and provides independent support and administration of each of them. The method is focused on a deterministic process, which limits its application.

Formulated especially data processing techniques, to offer enhanced knowledge-oriented method of fuzzy inference TSK. Fuzzy method TSK, which, unlike the existing ones, further includes a system of equations of the utility function and enables the integration of knowledge in the procedures of fuzzy inference based on the importance of rules. The experiment confirmed the effectiveness of the approach to knowledge-oriented technologies.

**Keywords:** federated database, distributed query, inhomogeneous systems, local data, rule base.

### REFERENCES

1. Arhipenkov S. Analytical systems based on Oracle Express OLAP. Moscow, Dialogue-MIFI, 2000, 287 p.
2. Data integration in the distributed information systems [electronic resource]. Access mode <http://ijournal-as.com/issues/2012/1/bisterfeld.pdf>
3. Kuzmina S. P. Databases. Sankt-Peterburg, SPbGIEY, 2006, 189 p.
4. Riordan R. Relational database systems. Moscow, Publishing trade house «Russian edition», 2001, 384p.
5. Rutkovska D., Rutkovski L., Pilinski M. Neural network, genetic algorithms and fuzzy systems. Moscow, Hotline-Telecom, 2006, 452 p.
6. Bodyanskiy E. V., Kucherenko E. I., Mihalev A. I., Filatov V. A., Gasik M. M., Kucin V. S. Intelligent management technological

- process monograph-scientific publication. Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukrain, 2013, 213 p.
7. Tsoukalas L. H., Uhrig R. E. Fuzzy and Neural Approaches in Engineering. New York, John Wiley & Sons, Inc, 1997, 587 p.
8. Khodak M. V., Kucherenko E. I. Information technology computer-aided management of mobile objects, *Proceedings of the VII international school-seminar «Decision theory»*. Uzhgorod, Uzhgorod National University, 2014, pp. 261–262.
9. Khodak M. V., Kucherenko E. I. The use of fuzzy logic in the process models of complex systems, *Proceedings of the 19th International Youth Forum «Radioelectronics and Youth in XXI century»*, Volume 6. Kharkiv, KNURE, 2015, pp. 62–63
10. The method of dichotomy or bisection method [electronic resource]. Access mode <http://bpascal.ru/download/desc/319.php>

## ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НА ГАММА-КАМЕРІ

Пропонується метод інформаційного синтезу системи підтримки прийняття рішень для радіонуклідної діагностики органів людини при динамічному обстеженні на гамма-камері. Як приклад розглянуто процес діагностування функціонального стану нирок. Розроблено алгоритм сегментації серії скінтиграм на основі інформаційно-екстремального кластер-аналізу просторово-часових векторів зміни яскравості пікселів та алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання для розпізнавання функціонального стану нирок за ренографічною кривою. Розроблені алгоритми ґрунтуються на адаптивному двійковому кодуванні ознак розпізнавання та оптимізації геометричних параметрів розбиття простору ознак на класи еквівалентності в процесі максимізації інформаційної спроможності системи підтримки прийняття рішень. Запропоновано модифікацію інформаційного критерію ефективності машинного навчання, що є функціоналом від помилки другого роду та першої достовірності. Аналізуються результати роєвої оптимізації вирішальних правил та показано результати автоматичної сегментації скінтиграфічних даних з метою виділення зон інтересу і автоматичної класифікації ренограм для формування діагностичного висновку. Потужність алфавіту класів функціонального стану нирки становить три класи. Перший клас характеризує нормальний стан без видимих порушень функції нирок. Другий клас характеризує ураження ниркової паренхіми. Третій клас характеризує порушення уродинаміки. Зроблено висновок про достовірність отриманих вирішальних правил.

**Ключові слова:** сегментація, кластер-аналіз, інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія, алфавіт класів, словник ознак, радіонуклідна діагностика, гамма-камера, оптимізація, роєві алгоритми.

### НОМЕНКЛАТУРА

DICOM – Digital Imaging and COmmunications in Medicine;

КФЕ – критерій функціональної ефективності;

ІЕІ – інформаційно-екстремальна інтелектуальна;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

$C$  – кількість функціональних станів органу людини,

що діагностується;

$c_1$  – ваговий коефіцієнт для формули шидкості;

$c_2$  – ваговий коефіцієнт для формули шидкості;

$D_{1,m}$  – перша достовірність для класу  $X_m^o$ ;

$D_{2,m}$  – друга достовірність;

$d_m$  – кодовий радіус контейнера класу  $X_m^o$ ;

$E_m$  – інформаційний критерій функціональної ефективності навчання СППР розпізнавати реалізації класу  $X_m^o$ ;

$G_E$  – робоча (допустима) область визначення функції КФЕ;

$G_n$  – область допустимих значень кількості охоплених контейнерами векторів;

$G_\delta$  – область допустимих значень параметра поля контрольних допусків на значення ознак розпізнавання;

$M$  – потужність алфавіту класів розпізнавання;

$m$  – номер поточного класу розпізнавання;

$N$  – кількість пікселів скінтиграфічного знімку;

$n$  – кількість векторів, що відповідають пікселям знімку гамма-камери;

$n_c$  – кількість спостережень  $c$ -го функціонального стану;

$v_{\max,i}$  – максимальне значення  $i$ -ї ознаки в навчальній матриці  $\{v_i^{(j)}\}$ ;

$w$  – константа прискорення;

$x_m$  – двійковий еталонний вектор класу  $X_m^o$ , що виз-

начає геометричний центр його гіперсферичного контейнера;

$\bar{u}_{1,i}$  – середнє вибіркве значення  $i$ -ї ознаки в базовому класі  $X_1^o$ ;

$\alpha_m$  – помилка першого роду;

$\beta_m$  – помилка другого роду;

$\delta_{\max}$  – граничне значення ширини поля контрольних допусків;

$\delta_{T,i}$  – параметр ширини поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки класифікатора зони спостереження;

$\delta_{\Phi,i}$  – параметр ширини поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки класифікатора функціонального стану органу.

### ВСТУП

Радіонуклідні дослідження функціонального стану внутрішніх органів людини характеризуються високою інформативністю, неінвазивністю та низьким променевим навантаженням [1]. При цьому гармонічне поєднання новацій в області математичних алгоритмів візуалізації діагностичних даних та розробки скінтиляційних детекторів забезпечують неперервний прогрес в даній області. Однак, незважаючи на суттєве розширення обсягу діагностичних даних і можливості їх візуального подання, остаточно прийняття рішень все ще залишається за лікарем, від професійного рівня якого залежить достовірність діагностичного висновку [2].

Спостереження при радіонуклідній діагностиці є багатовимірними, а саме дослідження відбувається за довільних початкових умов, тому одним із перспективних напрямів підвищення ефективності діагностичних систем даного типу є застосування ідей і методів машинного навчання та розпізнавання образів. Проте в умовах

незбалансованості та перетину класів розпізнавання, що характерно для задач медичної діагностики, традиційні біонічні та статистичні підходи до аналізу даних характеризуються не високою достовірністю і вимагають значних обчислювальних ресурсів [3]. На підвищення ефективності машинного навчання спрямована інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія (IEI-технологія), в якій порогове кодування ознак дозволяє трансформувати простір ознак за допомогою простих операцій порівняння, а згладжуючий ефект логарифмічних інформаційних мір забезпечує високу узагальнюючу здатність і достовірність вирішальних правил [4].

У статті розглядається задача інформаційного синтезу в рамках IEI-технології здатної навчатися СППР для функціонального обстеження нирок. При цьому для оптимізації параметрів функціонування СППР запропоновано використовувати алгоритм рою частинок.

### 1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай дано апіорно неklasифікований набір просторово-часових векторів одного динамічного дослідження органів  $\{v_i^{(j)} | j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}\}$  на гамма-камері, та алфавіт класів  $\{T_k^o | k = \overline{1, K}\}$ , що характеризує тип зони спостереження. При цьому клас  $T_1^o$  є базовим і відповідає зоні інтересу. Для зони інтересу задано алфавіт просторово-часових образів  $\{\Phi_c^o | c = \overline{1, C}\}$ , що характеризує функціональний стан досліджуваного органу людини і відповідна апіорно класифікована навчальна матриця типу об'єкт-властивість  $\{y_{c,i}^{(j)} | j = \overline{1, n_c}; i = \overline{1, N}; c = \overline{1, C}\}$ . Клас  $\Phi_1^o$  є базовим і відповідає функціональному стану здорового органа. Відома структура вектора параметрів функціонування СППР:

$$g = \langle \delta_{T,i}, \delta_{\Phi,i}, x_m, d_m \rangle. \quad (1)$$

При цьому задано такі обмеження:  $d(x_m \oplus x_{cm}) > d_m$ , де  $d(x_m \oplus x_{cm})$  – кодова відстані між двійковим еталонним (усередненим) вектором класу  $X_m^o$  та двійковим еталонним вектором сусіднього до нього класу  $X_{cm}^o$ ;  $\delta_{T,i} \in [0; \delta_{\max}]$ ,  $\delta_{\Phi,i} \in [0; \delta_{\max}]$ .

Необхідно в процесі навчання СППР визначити оптимальні значення координат вектора параметрів функціонування  $g^*$  (1), що забезпечують максимальне значення усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного КФЕ СППР

$$\bar{E} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \max_{G_E} \{E_m\}.$$

Необхідно в робочому режимі СППР прийняти рішення про належність екзаменаційних реалізацій до одного з класів алфавіту зон спостереження  $\{T_k^o\}$  та про відповідність екзаменаційних реалізацій, віднесених до зони інтересу  $T_1^o$ , одному з класів алфавіту функціональних станів діагностованого органу  $\{\Phi_c^o\}$ .

### 2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Ефективність автоматизованої інтерпретації результатів радіонуклідного дослідження багато в чому залежить від якості виконання сегментації. У задачах сегментації медичних зображень набули значного поширення методи порогової сегментації [5], методи, основані на моделях, подібних активному контуру [6], і моделі «Snake» [7] та методи нарощування областей [8]. Однак у випадку сцинтиграфічних зображень наявність шуму, слабка контрастність і відсутність стабільних відмінностей окремих областей обумовлюють невисоку ефективність даних підходів і для покращення результатів потребують інтерактивної взаємодії з користувачем. Останнім часом активно досліджуються алгоритми автоматичної сегментації зображень, що основані на ідеях і методах машинного навчання та кластер-аналізу. В праці [9] розглядається реалізація алгоритмів автоматичної сегментації медичних зображень на основі алгоритмів машинного навчання, де вказано про необхідність використання великого обсягу навчальних зразків і їх ретельної розмітки експертами. В праці [10] досліджено використання методів кластер-аналізу для сегментації знімків магніто-резонансного обстеження, де відмічено чутливість до вибору початкових параметрів і невисоку оперативність відповідних алгоритмів.

Переважає більшість публікацій, пов'язаних з автоматизацією інтерпретації сцинтиграфічних знімків, присвячені сегментації знімків статичного дослідження, або сегментації сумарного зображення із серії кадрів функціонального обстеження [6, 7]. Однак в цьому випадку алгоритми сегментації ігнорують інформацію про динаміку проходження радіофармпрепарату і не дозволяють врахувати анатомофізіологічну мінливість органів. Крім того, традиційні методи машинного навчання не забезпечують високу достовірність класифікації функціонального стану зон інтересу, оскільки в умовах обмеженого обсягу навчальних вибірок вони ігнорують перетин класів в просторі ознак розпізнавання [3, 9].

Таким чином, з метою усунення визначених недоліків перспективним є розробка інтелектуальної СППР для функціонального обстеження на гамма-камері, яка б враховувала динаміку проходження фармпрепарату на етапі автоматичної сегментації та забезпечувала високу достовірність рішень в умовах обмеженого обсягу навчальних даних на етапі розпізнавання функціонального стану в зоні інтересу.

### 3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

З метою дослідження роздільної та сумарної функціональної здатності нирок необхідно виділити області обох нирок і дослідити криві «активність-час». Для цього пікселі матриці гамма-камери з роздільною здатністю 64x64 розглядаються як апіорно неklasифікована множина векторів-реалізацій обсягом  $n = 4096$ , які необхідно автоматично розділити на зони спостереження. Оскільки запис сцинтиграм здійснюється на протязі 20 хвилин в режимі два кадри / хвилина, то потужність словника ознак, які беруть участь в класифікаційному аналізі, становить  $N = 40$ . В даному експерименті потужність алфавіту класів при сегментації сцинтиграм на зони спо-

стерезення становить  $K = 3$ . Области лівої та правої нирки вважаються зонами інтересу і відповідають класу  $T_1^o$ . Клас  $T_2^o$  відповідає іншим кровонаповненим тканинам, а клас  $T_3^o$  – клас зони, умовно прийнятої за фонову.

Для підтримки лікарських рішень криву-активності в зоні інтересу необхідно подати у вигляді вектора-реалізації функціонального стану органу та автоматично класифікувати. З цією метою за архівними медичними зображеннями і відповідними експертними висновками лікарів було сформовано навчальну вибірку класів функціонального стану в зоні лівої нирки. Обсяг вибірки кожного класу рівний  $n_c = 100$ . Потужність заданого алфавіту класів функціонального стану нирки становить  $C = 3$ . При цьому клас  $\Phi_1^o$  відповідає нормальному функціонуванню нирки, клас  $\Phi_2^o$  характеризує ураження ниркової паренхіми, клас  $\Phi_3^o$  – порушення уродинаміки.

Інформаційно-екстремальне машинне навчання полягає в трансформації апріорно-нечіткого простору первинних ознак розпізнавання в чітку еквівалентність класів, контейнери яких відновлюються в радіальному базисі вторинних ознак двійкового простору Хеммінга [4]. Перехід до бінарного простору ознак здійснюється шляхом порівняння значень первинних ознак зі значеннями верхнього  $A_{B,i}$  і нижнього  $A_{H,i}$  контрольних допусків:

$$A_{H,i} = \overline{y_{1,i}} - \delta_{\Phi,i}, \quad A_{B,i} = \overline{y_{1,i}} + \delta_{\Phi,i}.$$

Базовий алгоритм інформаційно-екстремального машинного навчання [4] реалізує оптимізацію геометричних параметрів розбиття простору ознак. При цьому оптимізація кодового радіусу  $d_m$  гіперсферичного контейнера класу  $X_m^o$  відбувається в процесі знаходження максимуму інформаційного критерію в робочій області визначення його функції

$$E_m^* = \max_{G_d} E_m,$$

де  $G_d = \{0, 1, \dots, d < d(x_m \oplus x_{cm})\}$  – множина радіусів концентрованих гіперсфер, центр яких визначається вершиною  $x_m \in X_m^o$ .

У випадку апріорно некласифікованої навчальної матриці  $\{v_i^{(j)} \mid j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}\}$ , яку необхідно розбити на класи еквівалентності  $\{T_k^o \mid k = \overline{1, K}\}$ , формування вирішальних правил запропоновано здійснювати в процесі інформаційно-екстремального кластер-аналізу. При цьому межі поля контрольних допусків для  $i$ -ї ознаки обчислюється за формулами:

$$A_{H,i} = v_{\max,i} - \delta_{T,i}, \quad A_{B,i} = v_{\max,i}.$$

Розглянемо основні етапи реалізації базового алгоритму інформаційно-екстремальної кластеризації CLUSTERING\_1 діагностичних даних на  $K$  кластерів:

1. Формування множини двійкових векторів  $\{z^{(j)} \mid j = \overline{1, r}\}$ , що є потенційними початковими центрами контейнерів, шляхом копіювання двійкової матриці

$\{x_i^{(j)}\}$ , видалення в ній однакових векторів та сортування решти векторів в порядку збільшення кількості одиничних координат.

2. Формування початкових центрів контейнерів  $\{x_k \mid k = \overline{1, K}\}$  за правилом рівномірного збільшення кількості одиниць в центрах упорядкованого алфавіту

$$x_k = \begin{cases} z^{(1)}, k = 1; \\ z^{(r \lfloor (k-1)/(K-1) \rfloor)}, 1 < k < K; \\ z^{(r)}, k = K. \end{cases}$$

3. Кластер-аналіз двійкової матриці класу  $\{x_i^{(j)}\}$  за алгоритмом К-середніх [11], з використанням дистанційної міри Хеммінга, та формування множини оптимальних центрів кластерів  $x_m^*$ .

4. Оптимізація радіуса контейнерів здійснюється за ітераційною процедурою  $d_k^* = \arg \max_{G_d \cap G_n} \{\overline{E}(d_k)\}$ .

5. Зупин.

Ітераційна процедура оптимізації впорядкованого вектора параметрів поля контрольних допусків  $\langle \delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots, \delta_{N-1}, \delta_N \rangle$  для ознак розпізнавання реалізує механізм адаптивного двійкового кодування ознак і полягає в максимізації усередненого за алфавітом класів ( $\{\Phi_c^o\}$  чи  $\{T_k^o\}$ ) інформаційного критерію  $\overline{E}$

$$\langle \delta_i^* \rangle = \arg \max_{G_\delta} \left\{ \max_{G_d \cap G_E} \{\overline{E}\} \right\}. \quad (2)$$

Для оптимізації вектора параметрів полів контрольних допусків  $\langle \delta_i \rangle$ , який впливає на функціональну ефективність СППР, запропоновано використовувати алгоритм рою частинок, оскільки він дозволяє знайти глобальний максимум КФЕ, не потребує початкових наближень і відрізняється простотою реалізації [11]. Завдяки випадковості розподілу частинок і їх хаотичності в русі з'являється дуже велика імовірність знайти оптимальне рішення за декілька ітерацій. Елемент випадковості в процесі пошуку забезпечується параметрами алгоритму, значення яких генеруються випадковим чином з заданого діапазону (0,1) у відповідності з нормальним законом розподілу  $U(0,1)$ .

Ефективність кожної частинки, тобто її близькість до глобального оптимуму, вимірюється за допомогою наперед визначеної фітнес-функції, роль якої в даному випадку виконує функція КФЕ. Кожна частинка зберігає наступну інформацію:  $P_j$  – поточна позиція  $j$ -ї частинки;  $V_j$  – поточна швидкість частинки,  $Pbest_j$  – краща персональна позиція частинки, що характеризується максимальним на поточний момент часу значенням фітнес-функції. Крім цього, з метою пошуку глобального екстремуму фітнес-функції найкраща частинка шукається в усьому рої, а її позиція позначається як  $Gbest$ . Якщо позначити  $J[P_j(k)]$  як значення фітнес-функції для  $j$ -ї частинки на

$k$ -й ітерації, то нові значення найкращої персональної  $Pbest$  та глобальної  $Gbest$  позицій обчислюються за правилами:

$$Pbest_j(k+1) = \begin{cases} Pbest_j(k) & \text{якщо } J(P_j(k+1)) \leq J(Pbest_j(k)), \\ P_j(k+1) & \text{якщо інакше;} \end{cases}$$

$$Gbest(k+1) = \arg \max_j \{J(Pbest_j(k+1))\}$$

На кожній ітерації алгоритму рою частинок  $i$ -та компонента швидкості  $V_{j,i}(k+1)$  та положення  $P_{j,i}(k+1)$   $j$ -ї частинки частинки оновлюється і визначаються за формулами:

$$V_{j,i}(k+1) = wV_{j,i}(k) + c_1r_{1,i}(k) * [Pbest_{j,i}(k) - P_{j,i}(k)] + c_2r_2(k) * [Gbest_j - P_{j,i}(k)],$$

$$P_{j,i}(k+1) = P_{j,i}(k) + V_{j,i}(k+1),$$

де  $r_{1,i}(k) = U(0,1)$ ,  $r_{2,i}(k) = U(0,1)$ .

Алгоритм рою частинок виконує повторення обчислення нових позицій і швидкості частинок до тих пір, доки не буде досягнуто задане число ітерацій чи до тих пір, доки приріст швидкості не стане близький до нуля.

Як критерій ефективності навчання класифікатора розпізнавати клас  $X_m^o$  розглядається модифікація інформаційної міри Кульбака [5], яка є функціоналом від першої достовірності  $D_{1,m}$  та помилки другого роду  $\beta_m$ :

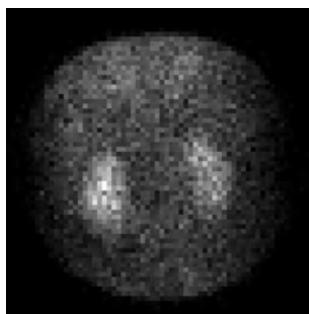
$$E_m = [D_{1,m} - \beta_m] \cdot \log_2 \left( \frac{1 + [D_{1,m} - \beta_m]}{1 - [D_{1,m} - \beta_m]} \right). \quad (3)$$

Робоча (допустима) область визначення функції інформаційного критерію обмежена нерівностями  $D_{1,m} \geq 0,5$ ,  $D_{2,m} = 1 - \beta_m \geq 0,5$ .

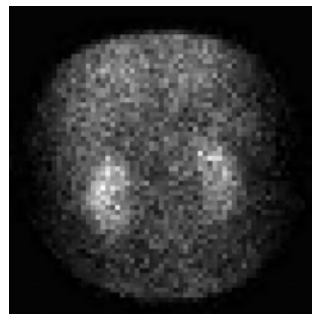
Нормовану модифікацію критерію (3) представимо у вигляді

$$E_m^{(k)'} = \frac{E_m^{(k)}}{E_{\max}}, \quad (4)$$

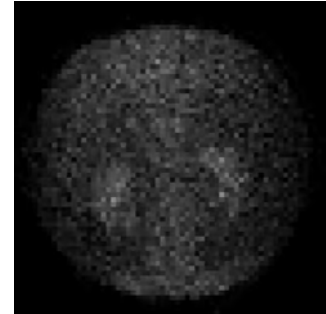
де  $E_{\max}$  – максимальне значення критерію (3), розраховане при:  $D_{1,m}^{(k)} = 1$  и  $\beta_m^{(k)} = 0$ .



а



б



в

Рисунок 1 – Кадри сцинтиграм в різні моменти зчитування після введення радіофармпрепарату: а – 10 хвилин; б – 15 хвилин; в – 20 хвилин

У режимі екзамену рішення про належність вектора реалізації  $x^{(j)}$  одному з класів алфавіту  $\{X_m^o\}$  приймається шляхом обчислення геометричної функції належності

$$\mu_m^* = \max_{\{m\}} \{\mu_m\},$$

де  $\mu_m$  – функція належності вектора  $x^{(j)}$  до контейнера класу  $X_m^o$ , обчислюється за правилом:

$$\mu_m = 1 - \frac{d(x_m^* \oplus x^{(j)})}{d_m^*},$$

де  $d(x_m^* \oplus x^{(j)})$  – кодова відстань від центра контейнера класу  $X_m^o$  до вектора  $x^{(j)}$ .

#### 4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Реалізація алгоритму навчання СППР здійснювалася за даними, що накопичені у сховищі медичних зображень кластерного комплексу в Інституті сцинтиляційних матеріалів НАН України і представлені у форматі DICOM [1]. На рис. 1 показано декілька кадрів із серії сцинтиграм динамічного дослідження нирок одного з пацієнтів.

Кожен піксель сцинтиграми характеризується станом лічильника імпульсів (сцинтиляцій) у відповідній координаті матриці гамма-камери. Серія сцинтиграм утворює для кожного пікселя криву «активність-час», яка має різний вигляд для різних органів і тканин та залежить від їх функціонального стану.

На рис. 2 показано динаміку зміни інформаційного КФЕ (3) в процесі роєвої оптимізації полів контрольних допусків на значення ознак розпізнавання для класифікатора зон спостереження та класифікатора функціонального стану нирки (штрихована ділянка тут і далі позначає робочу область визначення функції КФЕ). У роєвому алгоритмі оптимізації використано швидкість частинок обмежена максимальним значенням  $V_{\max,j} = 2$ , вага інерції становить  $w = 0,95$ , а константи прискорення рівні одиниці  $c_1 = c_2 = 1,0$ .

Аналіз рис. 2 показує, що процес роєвої оптимізації контрольних допусків на значення ознак розпізнавання для класифікатора зон спостереження тривав 51 ітерацію, а для класифікатора функціонального стану нирки – 14 ітерацій.

**5 РЕЗУЛЬТАТИ**

В результаті оптимізації полів контрольних допусків вдалося побудувати чітке розбиття простору ознак на класи еквівалентності. Залежність нормованого інформаційного критерію (4) від значень геометричних параметрів розбиття проілюстровано на рис. 3 та рис. 4. Аналіз рис. 3 показує, що оптимальні значення радіусів гіперсферичних контейнерів класів  $T_1^o, T_2^o$  та  $T_3^o$  відповідно рівні:  $d_1 = d_2 = d_3 = 7$  (тут і далі в кодових одиницях). При цьому міжцентрові відстані контейнерів класів рівні  $d(x_1 \otimes x_2)=11$ ,  $d(x_1 \otimes x_3)=13$  та  $d(x_2 \otimes x_3)=15$  відповідно.

Аналіз рис. 4 показує, що оптимальні значення радіусів гіперсферичних контейнерів класів  $\Phi_1^o, \Phi_2^o$  та  $\Phi_3^o$

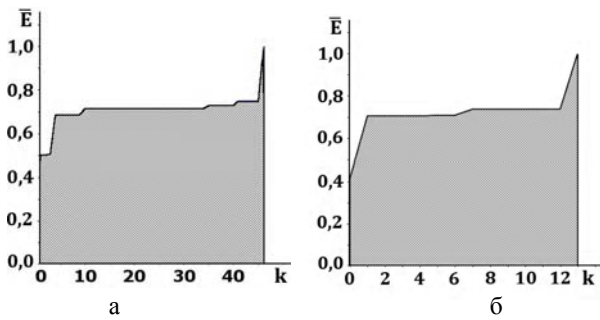


Рисунок 2 – Динаміка зміни усередненого нормованого інформаційного КФЕ в процесі роевої оптимізації полів контрольних допусків: а – класифікатор зон спостереження; б – класифікатор функціонального стану нирки

відповідно рівні:  $d_1 = 4$ ,  $d_2 = 10$  та  $d_3 = 6$ . При цьому міжцентрові відстані контейнерів класів рівні  $d(x_1 \otimes x_2)=15$ ,  $d(x_1 \otimes x_3)=13$  та  $d(x_2 \otimes x_3)=14$  відповідно.

На рис. 5а показано результат автоматичної сегментації сцинтиграми на три зони спостереження. При цьому штрихова лінія описує правило вибору зон спостереження для діагностики, розмежовуючи зони лівої та правої нирок. На рис. 5б показано результат розпізнавання функціонального стану лівої нирки.

Аналіз рис. 5а показує, що в процесі сегментації вдалося візуалізувати зони знаходження нирок.

Рис. 5б показує, що крива «активність-час» для лівої нирки за результатами розпізнавання відповідає нормальному стану без видимих змін і порушень функції нирок.

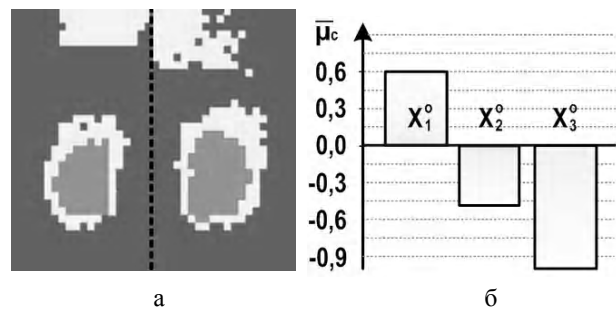


Рисунок 5 – Результат сегментації та класифікації: а – зони спостереження; б – функціональний стан лівої нирки

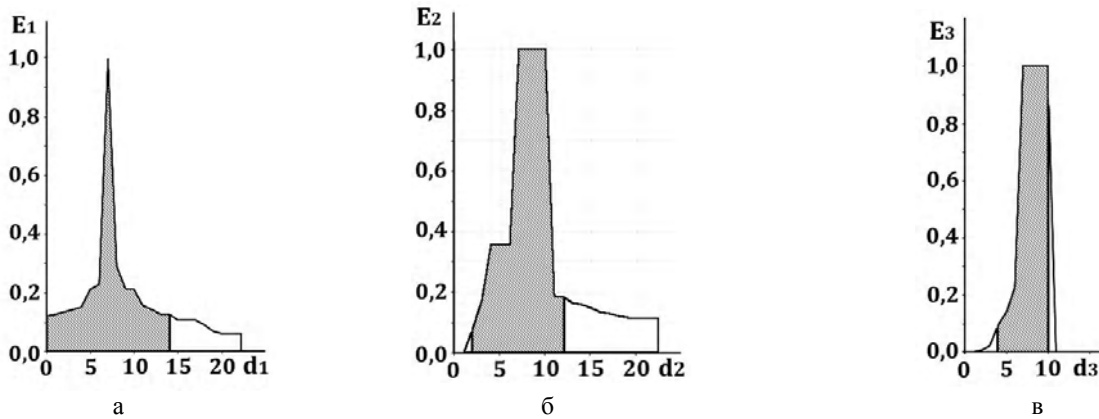


Рисунок 3 – Залежність нормованого інформаційного КФЕ від радіусу контейнера класів зон спостереження: а –  $T_1^o$ ; б –  $T_2^o$ ; в –  $T_3^o$

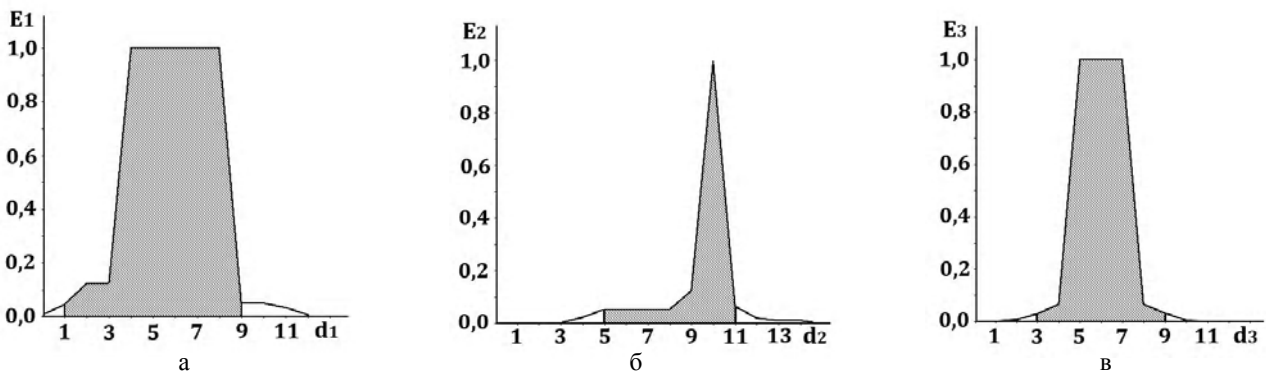


Рисунок 4 – Залежність нормованого інформаційного КФЕ від радіусу контейнера класів функціонального стану нирки: а –  $\Phi_1^o$ ; б –  $\Phi_2^o$ ; в –  $\Phi_3^o$



## 6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз результатів інформаційно-екстремального машинного навчання свідчить про отримання безпомилкових за навчальною матрицею вирішальних правил для автоматичної класифікації зон інтересу та розпізнавання їх функціонального стану на прикладі динамічного радіонуклідного дослідження нирок. При цьому середнє значення радіусів контейнерів класифікатора зон спостереження дорівнює  $\bar{d}_C^* = 7$ , а середня міжцентрова відстань класів зон спостереження –  $\bar{d}_{CC}^* = 13$ . Коефіцієнт нечіткості для розбиття простору ознак на кластери дорівнює

$$L_C^* = \frac{\bar{d}_C^*}{\bar{d}_{CC}^*} = 0,53.$$

Середнє значення радіусів контейнерів класифікатора функціонального стану в зоні інтересу дорівнює  $\bar{d}_\Phi^* = 6,66$ , а середня міжцентрова відстань класів функціонального стану –  $\bar{d}_{\Phi\Phi}^* = 14,0$ . При цьому коефіцієнт нечіткості для розбиття простору ознак на класи еквівалентності дорівнює :

$$L_\Phi^* = \frac{\bar{d}_\Phi^*}{\bar{d}_{\Phi\Phi}^*} = 0,47.$$

Таким чином, заводозахищеність вирішальних правил для автоматичної сегментації нижча від заводозахищеності класифікатора функціональних станів в зоні інтересу і обумовлює потенційну заводозахищеність СППР в цілому. При цьому коефіцієнт нечіткості класифікатора зон спостереження близький до 0,5, що прийнятно для умов медичної діагностики [4].

Аналіз результатів екзамену СППР показує, що невелика потужність алфавіту класів не дозволила виділити зону лоханки та корково-мозкової області сегментів нирок. Тому, подальші дослідження варто присвятити збільшенню алфавіту класів зон інтересу при автоматичній сегментації скінтиграм з метою отримання більш глибокого і детального аналізу. Крім того з метою розширення алфавіту діагностичних рішень варто дослідити класифікацію функціонального стану нирок при їх одночасному розгляді.

## ВИСНОВКИ

Наукова новизна одержаних результатів полягає у тому, що:

– вперше запропоновано метод сегментації серії скінтиграм динамічного радіонуклідного дослідження на основі інформаційно-екстремального кластер-аналізу, що дозволяє враховувати інформацію про динаміку проходження радіофармпрепарату через нирки і реалізувати автоматичне виділення зон інтересу за оптимальними в інформаційному сенсі вирішальними правилами;

– вперше запропоновано метод синтезу класифікатора функціонального стану нирки за кривою активності в зоні інтересу на основі інформаційно-екстремального машинного навчання, що дозволяє отримати безпомилкові за навчальною матрицею вирішальні правила в умо-

вах обмежених за обсягом навчальних вибірок та перетину класів в просторі ознак і таким чином реалізувати автоматичне формування діагностичного висновку;

– удосконалено метод інформаційно-екстремального кластер-аналізу за рахунок переходу до бінарного простору ознак та формування початкових центрів кластерів за правилом рівномірного збільшення кількості одиниць, що дозволяє в процесі відносно невеликої кількості ітерацій розв'язати оптимізацію контрольних допусків на значення ознак отримати безпомилкові вирішальні правила для апріорно впорядкованого алфавіту класів.

Практична цінність отриманих результатів для комп'ютеризованої медицини полягає у формуванні сучасної науково-методологічної основи проектування здатних навчатися СППР для функціонального обстеження на гамма-камері. При цьому результати імітаційного моделювання підтверджують високу ефективність отриманих вирішальних правил при виявленні стану ураження ниркової переніми та порушення уродинаміки нирок.

## ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку завідувачу лабораторії Інституту скінтіляційних матеріалів к.т.н. Дьоміну А. В. за надані експериментальні дані.

Робота виконана в рамках держбюджетної науково-дослідницької теми «Інтелектуальна система керування навантаженням і ресурсами розподіленого обчислювального середовища з підвищеною інформаційною безпекою» на базі лабораторії інтелектуальних систем кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гектин А. В. Медицинские гамма-камеры – тенденции и динамика развития / А. В. Гектин, А. В. Демин, В. Ю. Педаш // Сцинтилляционные материалы. Получение, свойства, применение. Сборник под редакцией Б. В. Гринева. – Харьков : «Институт монокристаллов», 2007. – 416 с.
2. Лишманов Ю. Б. Радионуклидная диагностика для практических врачей / Ю. Б. Лишманов, В. И. Чернова. – Томск : SST, 2004. – 394 с.
3. Люггер Дж. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люггер. – М. : Вильямс. – 2003. – 864 с.
4. Moskalenko V. V. Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes / A. S. Dovbysh, N. N. Budnyk, V. V. Moskalenko // Journal of automation and information sciences. New York : Begell House Inc. – 2012. – Vol. 44, Issue 10. – P. 35–44.
5. Sujji G. E. MRI Brain Image Segmentation based on Thresholding / G. E. Sujji, Y. V. S. Lakshmi, G. W. Jiji // International Journal of Advanced Computer Research. – 2013. – Vol. 3, No.1, Issue 8. – P. 97–101.
6. The estimation of GFR and ERPF using adaptive edge-based active contour for the segmentation of structures in dynamic renal scintigraphy / P. Suapang, K. Dejhan, S. Yimman // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2015. – Vol. 11, No. 1. – P. 87–103.
7. Landgren M. Segmentation of medical images. Applications in echocardiography and nuclear medicine / M. Landgren. – Sweden, Lund : MediaTryck, 2014. – 73 p.
8. Thakur A. A. Local Statistics Based Region Growing Segmentation Method for Ultrasound Medical Images / A. A. Thakur, R. S. Anand // World Academy of Science, Engineering and Technology. – Connecticut, CT 06878, USA : WASET, 2007. – № 10. – P. 914–919.

9. Gonzalez F. A. Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications and Techniques / F. A. Gonzalez, E. Romero. – Hershey, USA : IGI, 2009. – 390 p.
10. Patel S. Analysis Of Clustering Algorithms for MR Image Segmentation Using IQI / S. Patel, K. S. Patnaik // 2nd International Conference on Communication, Computing & Security, Toronto, Ontario, Canada, 10 June 2012 : proceedings. – Elsevier Ltd, 2012. – Vol. 6. – P. 387–396.
11. Вершовский Е. А. Роевой алгоритм оптимизации в задаче кластеризации мультиспектрального снимка / Е. А. Вершовский // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 5. – С. 102–107.

Стаття надійшла до редакції 28.07.2015.  
Після доробки 11.08.2015.

Москаленко В. В.<sup>1</sup>, Рижова А. С.<sup>2</sup>, Довбыш А. С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных наук Сумського державного університету, Суми, Україна

<sup>2</sup>Аспирант кафедры компьютерных наук Сумського державного університету, Суми, Україна

<sup>3</sup>Д-р технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных наук Сумського державного університету

#### ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ НА ГАММА-КАМЕРІ

Предлагается метод информационного синтеза системы поддержки принятия решений для радионуклидной диагностики органов человека при динамическом обследовании на гамма-камере. Как пример, рассмотрен процесс диагностики функционального состояния почек. Разработан алгоритм сегментации серии скинтиграмм на основании информационно-экстремального кластер-анализа пространственно-временных векторов изменения яркости пикселей и алгоритм информационно-экстремального машинного обучения для распознавания функционального состояния почек за ренографической кривой. Разработанные алгоритмы основываются на адаптивном двоичном кодировании признаков распознавания и оптимизации геометрических параметров разбиения пространства признаков на классы эквивалентности в процессе максимизации информационной способности системы поддержки принятия решений. Предложено модификацию информационного критерия эффективности машинного обучения, который есть функционалом от ошибки второго рода и первой достоверности. Анализируются результаты роевой оптимизации решающих правил и показано результаты автоматической сегментации скинтиграфических данных с целью выделения зон интереса и автоматической классификации ренограмм для формирования диагностического вывода. Мощность алфавита классов функционального состояния почки составляет три класса. Первый класс характеризует нормальное состояние без видимых нарушений функции почек. Второй класс характеризует поражения почечной паренхимы. Третий класс характеризует нарушения уридинамики. Сделан вывод о достоверности полученных решающих правил.

**Ключевые слова:** сегментация, кластер-анализ, информационно-экстремальная интеллектуальная технология, алфавит классов, словарь признаков, радионуклидная диагностика, гамма-камера, оптимизация, роевые алгоритмы.

Moskalenko V. V.<sup>1</sup>, Rizhova A. S.<sup>2</sup>, Dovbysh A. S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D., Senior lecturer of Computer Science department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

<sup>2</sup>Postgraduate student of Computer Science department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

<sup>3</sup>Dr. Sc., Professor, head of Computer Science department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

#### INTELLIGENT DECISION SUPPORT SYSTEM FOR FUNCTIONAL DIAGNOSTICS WITH GAMMA CAMERA

Method of information synthesis of a decision support system for radionuclide diagnostics of human organs during dynamic observation on gamma camera is proposed. By way of example, the process of diagnosis kidneys' functional state is considered. Segmentation algorithm series of scintigrams based on information-extreme cluster analysis of time-spatial vectors of pixel brightness changing, algorithm of recognition functional state of kidneys using renogram curves based on information-extreme machine learning are developed. The developed information-extreme algorithms based on adaptive binary coding of feature values and on optimization of geometrical parameters of feature space partitioning into classes equivalence during the process of maximizing of decision support system's information ability. The modified information criterion for estimate efficiency of machine learning which expressed in terms of false omission rate and positive predictive value is proposed. The results of parameters optimization of decision rules using the particle swarm algorithm are analyzed. The result of the automatic segmentation of scintigraphic data intended to highlight regions of interests, result of automatic classification of renogram curves intended to make-diagnosis are shown. Set of classes characterized three functional states of kidneys. The first class characterizes the normal state of renal function without any apparent violations. The second class characterizes renal parenchymal disease. The third class characterizes a impaired impaired urinary dynamics. It was concluded about the accuracy of the decision rules.

**Keywords:** segmentation, cluster-analysis, information-extreme intellectual technology, set of classes, feature set, radionuclide diagnostics, gamma-camera, optimization, swarm algorithm.

#### REFERENCES

- Gektin A. V., Demin A. V., Pedash V. Ju. Medicinskie gamma-kamery – tendencii i dinamika razvitiia, *Scintilljacionnye materialy. Poluchenie, svoystva, primenenie. Sbornik pod redakciej B.V. Grinjova*. Har'kov, «Institut monokristallov», 2007, 416 p.
- Lishmanov Ju. B., Chernova V. I. Radionuklidnaja diagnostika dlja prakticheskikh vrachej. Tomsk, SST, 2004, 394c.
- Ljagger Dzh. F. Iskusstvennyj intellekt. Strategii i metody reshenija slozhnyh problem. Moscow, Vil'jams, 2003, 864 p.
- Moskalenko V. V., Dovbysh A. S., Budnyk N. N. Information-Extreme Algorithm for Optimizing Parameters of Hyperellipsoidal Containers of Recognition Classes, *Journal of automation and information sciences*. New York, Begell House Inc., 2012, Vol. 44, Issue 10, pp. 35–44.
- Sujji G. E., Lakshmi Y.V.S., Jiji G. W. MRI Brain Image Segmentation based on Thresholding, *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, Vol. 3, No.1, Issue 8, pp. 97–101.
- Suapang P., Dejhan K., Yimman S. The estimation of GFR and ERPF using adaptive edge-based active contour for the segmentation of structures in dynamic renal scintigraphy, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 2015, Vol.11, No.1, pp. 87–103.
- Landgren M. Segmentation of medical images. Applications in echocardio and nuclear medicine. Sweden, Lund, MediaTryck, 2014, 73 p.
- Thakur A. A., Anand R. S. Local Statistics Based Region Growing Segmentation Method for Ultrasound Medical Images, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Connecticut, CT 06878, USA, WASET, 2007, No. 10, pp. 914–919.
- Gonzalez F. A., Romero E. Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications and Techniques. Hershey, USA, IGI, 2009, 390 p.
- Patel S., Patnaik K. S. Analysis Of Clustering Algorithms for MR Image Segmentation Using IQI, *2nd International Conference on Communication, Computing & Security, Toronto, Ontario, Canada, 10 June 2012 : proceedings*. Elsevier Ltd, 2012. Vol. 6, pp. 387–396.
- Vershovskij E. A. Rоеvoj algoritm optimizacii v zadache klasterizacii mul'tispektral'nogo snimka, *Izvestija JuFU. Tehnicheskie nauki*, 2010, No. 5, pp. 102–107.