

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

Радіоелектроніка Інформатика Управління

Радиоэлектроника
Информатика
Управление

Radio Electronics
Computer Science
Control

2015/4

ISSN 1607-3274



9 771607 327005 51>





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. Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ №6904.

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтями 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, ВІНІТІ, Джерело), повний перелік яких подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

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

Тематика журналу містить: радіофізику, мікро-, нано- і радіоелектроніку, апаратне і програмне забезпечення комп’ютерної техніки, комп’ютерні мережі і телекомунікації, теорію алгоритмів і програмування, оптимізацію і дослідження операцій, міжмашинну і людино-машинну взаємодію, математичне і комп’ютерне моделювання, обробку даних і сигналів, управління в технічних системах, штучний інтелект, включаючи системи, засновані на знаннях, і експертні системи, інтелектуальний аналіз даних, розпізнавання образів, штучні нейронні і нейро-нечіткі мережі, нечітку логіку, колективний інтелект і мультиагентні системи, гібридні системи.

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

Усі статті проходять двоступінчасте закрите (анонімне для автора) **резензування** 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:

Андроулідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

Болянський С. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

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

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

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

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

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

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

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

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

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

Папшицький М., д-р філософії, Польща

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 вчену радою ЗНТУ, протокол № 07 від 22.12.2015.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

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

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

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорізький національний технічний університет, 2015

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

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

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

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

В журнале бесплатно публикуются научные статьи на английском, русском и украинском языках.

Правила оформления статей представлены на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

Журнал обеспечивает **бесплатный открытый он-лайн доступ** к полнотекстовым публикациям. Журнал разрешает авторам иметь авторские права и сохранять права на издание без ограничений. Журнал разрешает пользователям читать, загружать, копировать, распространять, печатать, искать или ссылаться на полные тексты своих статей. Журнал разрешает повторное использование его содержания в соответствии с СС лицензией CC-BY.

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал реферируется и индексируется в ведущих международных и национальных реферативных журналах и научометрических базах данных, а также размещается в цифровых архивах и библиотеках с бесплатным доступом on-line (в т.ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВИНТИ, Джэрэло), полный перечень которых представлен на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

Журнал распространяется по Каталогу периодических изданий Украины (подписной индекс – 22914).

Тематика журнала включает: радиофизику, микро-, нано- и радиоэлектронику, аппаратное и программное обеспечение компьютерной техники, компьютерные сети и телекоммуникации, теорию алгоритмов и программирования, оптимизацию и исследование операций, межмашинное и человеко-машинное взаимодействие, математическое и компьютерное моделирование, обработку данных и сигналов, управление в технических системах, искусственный интеллект, включая системы, основанные на знаниях, и экспертные системы, интеллектуальный анализ данных, распознавание образов, искусственные нейронные и нейро-нечеткие сети, нечеткую логику, коллективный интеллект и мультиагентные системы, гибридные системы.

Все статьи, предлагаемые к публикации, получают **объективное рассмотрение**, которое оценивается по существу без учета расы, пола, вероисповедания, этнического происхождения, гражданства или политической философии автора(ов).

Все статьи проходят двухступенчатое закрытое (анонимное для автора) **рецензирование** штатными редакторами и независимыми рецензентами – ведущими учеными по профилю журнала.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

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

Члены редколлегии:

Андроулидакис 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

Онуфrienko B. M., 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 № 07 от 22.12.2015.

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

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

The journal publishes scientific articles in English, Russian, and Ukrainian free of charge.

The **article formatting rules** are presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/information/authors>.

The journal provides policy of **on-line open (free of charge) access** for full-text publications. The journal allow the authors to hold the copyright without restrictions and to retain publishing rights without restrictions. The journal allow readers to read, download, copy, distribute, print, search, or link to the full texts of its articles. The journal allow reuse and remixing of its content, in accordance with a CC license CC-BY.

Published articles have a unique digital object identifier (DOI).

The journal is abstracted and indexed in leading international and national abstracting journals and scientometric databases, and also placed to the digital archives and libraries with a free on-line access (including DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, VINITI (All-Russian Institute of scientific and technical information), Djerelo), full list of which is presented on the site: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: 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 № 07 dated 22.12.2015.

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

ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА.....	7
<i>Онуфриенко Л. М., Чумаченко В. П., Чумаченко Я. В.</i> КОБОСНОВАНИЮ ОДНОЇ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ ВОЛНОВОДОВ. ЧАСТЬ II. Н-ПЛОСКОСТНАЯ ЗАДАЧА.....	7
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	13
<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
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	39
<i>Жихаревич В. В., Миронів І. В., Остапов С. Е.</i> АЛГОРИТМ РОЗПІЗНАВАННЯ СИМВОЛІВ ТЕКСТУ НА ОСНОВІ КОНКУРУЮЧИХ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ.....	39
<i>Кучеренко Е. І., Ходак М. В.</i> ЗНАНИЕ-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ.....	45
<i>Москаленко В. В., Рижова А. С., Довбши 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
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	66
<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-ОРИЕНТОВАНА МЕТОДИКА ВАЛІДАЦІЇ КОМПОЗИТНИХ ВЕБ-СЕРВІСІВ.....	79
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	87
<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 ДЕТЕРMINІЗАЦІИ.....	104
<i>Молодецька К. В.</i> СПОСІБ ПІДТРИМАННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОПИТУ АКТОРІВ СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ НА КОНТЕНТ.....	113

CONTENTS

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

РАДІОФІЗИКА

РАДІОФІЗИКА

RADIOPHYSICS

УДК 517.9 : 537.86

Онуфриенко Л. М.¹, Чумаченко В. П.², Чумаченко Я. В.³

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

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

³Канд. 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. Н-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 $s = \{s_n\}$ таких, что $\sum_{n=0}^{\infty} |s_n| < \infty$;

\tilde{l}_2 – пространство последовательностей $s = \{s_n\}$ таких, что $|s_0|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} |s_n|^2 n < \infty$;

$X \oplus Y$ – 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 ;

δ_{mn} – символ Кронекера;

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

ω – круговая частота колебаний;

ϵ_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные;

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

χ – 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, полученные

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 СЛАУ, возникающей при решении задачи рассеяния собственных волн волноводов на их сочленении, к эквивалентной системе, которая в пространстве последовательностей $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ является 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 Ω . Через α_j обозначены внутренние углы, отвечающие вершинам $M_j (j=1,3)$. 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 ε .

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 $E_z = ue^{i\omega t}$. Введем обозначения: $u_\Omega \equiv u \forall (x, y) \in \Omega$, $u^{(j)} \equiv u \forall (x, y) \in W_j$,

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

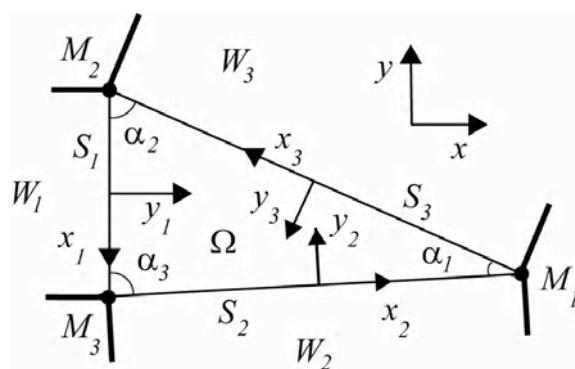


Рисунок 1 – Геометрия задачи

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

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

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

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

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

При $\text{Im} \varepsilon \leq 0$ 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 ω , при которых граничная задача однозначно разрешима.

2 СЛАУ. ЕДИНСТВЕННОСТЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Как и в случае блока с двумя присоединенными волноводами [3], будем искать u_Ω 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_Ω , линейно независима за исключением некоторого счетного множества значений ω . Последнее множество также не включается в рассмотрение. Отметим, что в отличие от случая E -плоскостной структуры в сумму, представляющую u_Ω , 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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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,

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

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

а также пересчетной формулы

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

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 $n \geq 1$:

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

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

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 α_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

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

где M_s^- и M_s^+ – начальная и конечная точки s -й стороны (например, $M_1^- = M_2$, $M_1^+ = M_3$), а β_{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

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

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

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

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

$$\tilde{q}_{mn}^{(sl)} = q_{mn}^{(sl)} - d_{mn}^{(sl)} = O\left(\frac{1}{m^2}\right), \quad n \geq 1. \quad (27)$$

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

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

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 $l_1^{(3)}$. Очевидно, что операторы $\tilde{F}^{(ss)}$ являются ω -непрерывными. Положим

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

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

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

Разности $\tilde{F}^{(sl)} - {}^0\tilde{F}^{(sl)}$ при $s \neq l$ также являются ω -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 // Радиоэлектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 5–9.
2. Chumachenko V. P. A GSM analysis of E-pane 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. Онуфrienko Л. М. К обоснованию одной математической модели плоского соединения трех волноводов. Часть I. E -плоскостная задача / Л. М. Онуфrienko, 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. – Київ : 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.

Стаття поступила в редакцію 20.05.2015.
 Після дороботки 18.06.2015.

Онуфрієнко Л. М.¹, Чумаченко В. П.², Чумаченко Я. В.³

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

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

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математичних методів в інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафті 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 довільно трикутної форми. Задача розсіювання хвилеводів мод формулюється у вигляді краєвої задачі для рівняння Гельмгольца з однорідними межовими умовами Дирихле на контурі конфігурації, умовами випромінювання в хвилеводах та умовою на ребрах. Модель ґрунтуються на зображені 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, скорегованій 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 є 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 добутку областей, матрично-операторні рівняння.

Onufriyenko L. M.¹, Chumachenko V. P.², Chumachenko Ya. V.³

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

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

³Ph.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 conductances 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

- 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.
- 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.
- 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.
- 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
- Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region, *Electronics Letters*, 2001, Vol. 37, No. 19, pp. 1164–1165.
- Shestopalov V. P. Spektral'naya teoriya i vozbuždenie otkry'ty'x struktur. Kyiv, Naukova dumka, 1987, 288 p.
- 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 нагрузений. 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;

© Мастиновский Ю. В., 2015
DOI 10.15588/1607-3274-2015-4-2

x, t – осевая координата и время, соответственно;
 α – температурный коэффициент линейного расширения;

β – безразмерная составляющая магнитного поля;
 ε – коэффициент связности;
 Θ – безразмерная температура;
 κ – теплопроводность;
 λ, μ – упругие постоянные Ляме;
 μ_0 – магнитная проницаемость;
 v – коэффициент Пуассона;
 ξ, τ – безразмерные координата и время, соответственно;
 ρ – плотность;
 σ – безразмерное напряжение;
 σ_0 – удельная электрическая проводимость;
 σ_x – напряжение;
 τ_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 :

$$\vec{B} = (0, 0, B(x, t)) \text{ и } \vec{E} = (0, E(x, t), 0).$$

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 полу бесконечных 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]:

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

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 τ_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

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

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

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

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

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

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

$c_2^2 = \frac{V^2}{c^2}$, получаем для рассматриваемой задачи следующую 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

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

и граничными условиями

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

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

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

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 термоупругую задачу с начальными условиями (10), граничными механическими

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

и граничными тепловыми условиями

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

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 невозможным. 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; $\varepsilon = 3,56 \cdot 10^{-2}$; $k = 4,13 \cdot 10^{-3}$;

$$n = 2\alpha(3\lambda + 2\mu)/(\sigma_0\mu_0k) = 800.$$

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 связанный 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 случаи 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 предрасположены 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

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

2. Селезов И. Т. Нестационарные и нелинейные волны в электропроводящих средах / И. Т. Селезов, С. В. Корсунский. – Киев : Наукова думка, 1991. – 200 с.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Коваленко А. Д. Термоупругость. / А. Д. Коваленко // Київ : Вища школа, 1975. – 216 с.
9. Беляев Н. М. Методы теории теплопроводности. В 2-х частях. / Н. М. Беляев, А. А. Рядно. Ч. 1. – М. : Вищ. школа, 1982. – 237 с.
10. Сагамонян А. Я. Волны напряжений в сплошных средах / А. Я. Сагамонян // М.: Изд-во МГУ – 1985 – 416 с.
11. 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.
12. Данильченко Д. В. Нестационарные волны в составной цилиндрической оболочке / Д. В. Данильченко, Ю. В. Мастиновский // 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 ПОКРИТІВ У РАДІОЕЛЕКТРОННІЙ АПАРАТУРІ

Створення нових багатошарових покріттів 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 термоупружних 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 скінченою. Вводиться припущення, що спрощують повністю зв'язану систему магнетотермоупружних рівнянь, які 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 покріттів з різними геометричними і механічними параметрами в умовах заданих термомеханічних навантажень. Дані методика розрахунку багатошарових покріттів різновідмінних термоупружніх конструкцій може бути використана для виявлення ділянок, найбільш скінливих до пошкоджень.

Ключові слова: магнітне поле, термоупруженість, демпфувальні покріття, напруження, метод характеристик.

Mastinovskiy 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 MULTYLAYER 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

1. Parton V. Z. Metody magnitnoy teoriyi uprugosti. Moscow, Nauka. Glavn. red. phys.- mat. lit., 1981, 588 p.
2. Selezo I. T. Nestatsionarnye i nelineyniye volny v elektroprovodyschikh sredakh. Kiev, Naukova dumka, 1991, 200 p.
3. Shamrovskiy A. D., Maekjtyan G. V. Termouprugiyie volny i skorost ikh rasprostraneniya v dinamicheskoy zadache vzaimosvyazannoy termouprugosti, *Vostochno-yevropeiskiy zhurnal peredovykh technologiy*. 2011, Vypusk № 7 (53), Vol. 5, pp. 41–45.
4. Bala Kiran A Review of Two-Temperature Thermoelasticity, *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2012, Vol. 2, Issue 6, pp. 4224–4227.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Kovalenko A. D. Termouprugost. Kiev, Vyscha shkola, 1975, 216 p.
9. Belyayev N. M., Ryadno A. A. Metody teoriyi termouprugosti. V 2-kh chastyakh. Ch.1. Moscow, Vyssh. Shkola, 1982, 237 p.
10. Sagamonyan A. Y. Volny napryazheniy v sploshnykh sredakh. Moscow, Izd-vo MGU, 1985, 416 p.
11. 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.
12. 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.

УДК 004.9:811.162.1

Костіков М. П.

Асистент кафедри інформаційних систем Національного університету харчових технологій, Київ, Україна

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 існуючу граматичну форму 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 – легшою. 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 флексивні 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. Залізняк, А. Ранта [1], І. Шевченко, В. Широков [2] та ін. Питанням формалізації граматики

© Костіков М. П., 2015

DOI 10.15588/1607-3274-2015-4-3

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

При моделюванні граматики флексивних 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 звичти певну кількість словоформ, а й розуміти суть того, що відбувається при їх утворенні. Наявні ж моделі лише описують 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. Слови 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
своєго 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. Ранта, у традиційній парадигматичній мо-
делі немає точного визначення самої парадигми та її зас-
тосування [1]. Таким чином, моделювання граматики з
видаленням парадигматичних класів за зовнішніми озна-
ками словозміни, на якому базуються сучасні електронні
лексикографічні системи, не враховує специфіки, притаман-
ної 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 граматич-
них 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 коментаря-
ми та прикладами слів, які підпадають під описані зразки.
Проте в кожному шаблоні наводиться лише перелік усіх
нетотожних ГФ без розмітки за граматичними значення-
ми, які вони виражают.

Подібна ситуація спостерігається і при формалізації
граматики інших фlectивних 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
їхніми специфікою.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

З метою наочного подання та пояснення процесу слово-
заміни польської мови нами було розпочато розроблен-
ня нової моделі. При моделюванні словозміни було вирі-
шено декомпозувати 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 послідовності
групи літер. Комбінації цих перетворень повинні дозволяти
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 морфологічного аналізатора польської мови Morfoligik [6].

Далі було досліджено процес утворення похідних ГФ іменників від початкових. На основі інформації з підручників і граматичних довідників польської мови було проведено декомпозицію цього процесу з метою виділення елементарних перетворень.

Моделювання процесу словозміни проходило ітераційно в напівавтоматичному режимі. Спершу формально описувались окремі елементарні перетворення. Після цього через спеціально розроблений інтерфейс додання ланцюжків 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 ітераціях система спочатку перебирала вже наявні в БД ланцюжки, і лише в разі неуспіху відбувалося введення послідовності 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 утворенні ГФ, було взято з підручників польської мови, зокрема [8] і [9]. Елементарні перетворення було описано як окремі методи мовою програмування C# із використанням 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 перетворень для слова «życie» при утворенні різних відмінок однини. Перетворення T002 відповідає відкиданню закінчення -e, а T006, T012, T024 – доданню закінчень -a, -em, -i відповідно.

Таблиця 1 – Фрагмент еталонної таблиці ГФ іменників

ID	SgN	SgG	SgD	...	SgV	PIN	...	PIV
353	żal	żalu	żalowi	...	żalu	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, +ą, +ach, +ami, +e, +ego, +em, +emu, +ę, +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 послідовності звуків	a→e, a→ę, c→cz, ch→sz, czść→czć, ćc→c, d→dż, dszcz→dżdż, dz→ż, dźń→dń, el→ol, e→ą, e→ę, g→dz, g→ż, k→c, k→cz, l→ł, o→e, o→ó, ó→o, r→rz, rz→r, s→ś, sl→śl, sn→śń, st→ść, t→ć, z→ż, zn→żń, -(i-), +(i-)
7	зміна позначення звуку на письмі	ci→ć, ć→ci, i→j, ii→i, -(i-), ni→ń, ń→ni, ś→si, zi→ż, ż→zi
8	зміна основи слова	–

Таблиця 3 – Фрагмент таблиці ланцюжків елементарних перетворень для іменників

NounID	GM	Chain
356	SgG	T002T006
356	SgD	T002T024
356	Sgl	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 дляожної 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 забезпечуємо 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 уможливлює 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.
- 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. Gruszczyński, M. Woliński, R. Wołosz]. – Warszawa : Wiedza Powszechna, 2008. – 180 p.
- PoliMorf – otwarty słownik morfologiczny : prezentacja [Electronic resource] / M. Wolicki, M. Mirowski, 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.słowniki.org.pl/słownik-frekwenncyjny-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. Кротовская, Л. Г. Кацкевич, Г. М. Лесная, Н. В. Селиванова]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : ACT, 2005. – 559 с.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2015.

Після доробки 30.10.2015.

Костиков Н. П.
Асистент кафедри информационных систем Национального университета пищевых технологий, Киев, Украина

ФОРМАЛЬНА 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.
2. Shyrokov V. A. Elementy leksykohrafii : monogr. 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 jazyka 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/11205.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.słowniki.org.pl/słownik-frekencyjny-leksemow.pdf>.
8. Danuta Vasilevskaia, Stanislav Karolyak Uchebnik pol'skogo jazyka. Sankt-Peterburg, Lan', 2001, 576 p.
9. Krotovskaya Ya. A., Kashkurevich L. G., Lesnaya G. M., Selivanova N. V. Prakticheskij kurs pol'skogo jazyka. Bazovij uchebnik. 2nd ed. Moscow, AST, 2005, 559 p.

УДК 001.8:002.01

Субботин С. А.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

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 метрики на уровне журналов – то, что они неприменимы для отдельных статей и для отдельных ученых. Впервые предложен комплекс межстадийных 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, научометрия, библиометрия, качество, статья, научная публикация, метрика, анализ цитируемости, важность статьи.

НОМЕНКЛАТУРА

$annot_{ip}$ – 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;

fr_{ij} – 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_b^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_{jrnk}^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 научометрической базе;

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

N_b^{jr} – число наименованийserialных 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;
 $syp(v_i)$ – функция, возвращающая список слов-синонимов для слова v_i , а также их переводы (с их синонимами) на все доступные языки публикаций в базе $Base$;
 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;
 ρ – 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 соотнесены 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 учётом 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 межстартевые показатели, отражающие взаимосвязь публикаций и их влияние друг на друга.

Показатель цитируемости j -й публикации 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: $z = \arg \min_{p=1,2,\dots,|R_{k \rightarrow q(p)}|} \{h_{k \rightarrow q(p)}\}$, 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):

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

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: значення показателя (3) буде тем більше, чим короче і прямеє зв'язок i -ї та j -ї публікацій в базі *Base*.

На практиці багато публікацій основується на результатах предшестуваючих им робот. При цьому авторы часто склонні використовувати публікації після них, що містять більші свежі результати. Поэтому на конкретну публікацію більше вплив можуть мати шанс оказувати непосредственно предшестуваючі їй по часу публікації.

Временний потенціал прямого можливого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію определим по формуле (4):

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

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: значення показателя (4) буде тем більше, чим більші відстані по часу видання виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що i -ї публікація опублікована раніше j -ї публікації.

Об'єднавши показатель прямого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію (2) і временний потенціал прямого можливого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію (4), отримаємо временний потенціал прямого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію, определяемий по формуле (5):

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

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по часу видання виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що i -ї публікація опублікована раніше j -ї публікації і в перечисленіх її публікації є зв'язок на i -ї публікацію (явно вказано взаємозв'язок публікацій).

Временний потенціал косвенного впливу i -ї публікації на j -ю публікацію оцінимо як (6):

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

Показатель (6) буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по часу видання виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що i -ї публікація опублікована раніше j -ї публікації і по зв'язкам від j -ї публікації можна перейти по базі *Base* до i -ї публікації (невявна зв'язок публікацій).

Причому чим менше буде довжина шляху від j -ї публікації до i -ї, тим більше буде значення показателя.

Наряду з часом видання на публікації може впливати на неї місце їх видання або написання. Очевидно, що автори деякої публікації можуть бути краще зроблені з публікаціями своїх колег, які працюють в тому ж місті або країні, або ж публікуючих публікації в одному з них журналі.

Просторовий потенціал прямого можливого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію определим по формуле (7):

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

Заметимо, що значення північної широти та східної довготи вважаються позитивними, а значення південної широти та західної довготи – негативними. Для визначення координат місця видання можна користуватися даними [19].

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по відстані між місцями видання (написання) виявляються i -ї та j -ї публікації.

Об'єднавши показатель прямого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію (2) і просторовий потенціал прямого можливого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію (7), отримаємо просторовий потенціал прямого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію, определяемий по формуле (8):

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

Показатель (8) буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по місцю видання виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що в перечисленіх її публікаціях є зв'язок на i -ї публікацію (явно вказано взаємозв'язок публікацій).

Просторовий потенціал косвенного впливу i -ї публікації на j -ю публікацію зададимо як (9):

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

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по відстані між місцями видання (написання) виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що по зв'язкам від j -ї публікації можна перейти по базі *Base* до i -ї публікації (невявна зв'язок публікацій). Причому чим менше буде довжина шляху від j -ї публікації до i -ї, тим більше буде значення показателя.

Просторово-временний потенціал прямого можливого впливу i -ї публікації на j -ю публікацію определим по формуле (10):

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

Показатель (10) буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тем більше, чим більші відстані по часу видання виявляються i -ї та j -ї публікації, при умові, що i -ї публікація опублікована раніше

j-ї публікации, и чем более близкими по расстоянию между местами издания (написания) являются *i*-я и *j*-я публікации.

Пространственно-временной потенциал прямого влияния *i*-ї публікации на *j*-ю публікацию определим по формуле (11):

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

Показатель (11) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем более близкими по времени издания являются *i*-я и *j*-я публікации, при условии, что *i*-я публікация опубликована раньше *j*-ї публікации, и чем более близкими по расстоянию между местами издания (написания) являются *i*-я и *j*-я публікации, при условии, что *i*-я публікация опубликована раньше *j*-ї публікации и в перечне ссылок *j*-ї публікации имеется ссылка на *i*-ю публікацию (явно указана взаимосвязь публікаций).

Пространственно-временной потенциал косвенного влияния *i*-ї публікации на *j*-ю публікацию определим по формуле (12):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: значение показателя (12) будет тем больше, чем более близкими по времени издания, а также по расстоянию между местами издания (написания) являются *i*-я и *j*-я публікации, при условии, что по ссылкам от *j*-ї публікации можно перейти по базе *Base* к *i*-ї публікации (неявная связь публікаций). Причем чем меньше будет длина пути от *j*-ї публікации к *i*-ї, тем больше будет значение показателя (12).

Анализ взаимосвязи публікаций и их подобия по тематике, очевидно, предполагает учет их лексики. При этом следует учесть вариативность лексики (синонимы), а также возможность написания публікаций на различных языках.

Под словарем текста будем понимать набор слов, содержащихся в тексте, представленных в нормализованной форме (например, существительные и прилагательные в единственном числе и именительном падеже, глаголы – в неопределенной форме и единственном числе и т.п.) без повторений.

Показатель точного совпадения словарей *i*-ї и *k*-ї публікаций определим по формуле (13):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение данного показателя, тем сильнее совпадают словарии, чем меньше – тем слабее.

Показатель приближенного совпадения словарей *i*-ї и *k*-ї публікаций определим как (14):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (14), тем сильнее совпадают словарии с учетом синонимов и переводов слов, чем меньше – тем слабее.

Показатель разности частот (частотного точного несовпадения) лексики *i*-ї и *k*-ї публікаций определим по формуле (15):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (15), тем сильнее не совпадают частоты одинаковых слов в словарях, чем меньше – тем слабее.

Соответственно, определим показатель частотного точного совпадения лексики *i*-ї и *k*-ї публікаций, написанных на одном языке, как (16):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (16), тем слабее не совпадают частоты одинаковых слов в словарях, чем меньше – тем сильнее.

Показатель приближенного частотного несовпадения лексики *i*-ї и *k*-ї публікаций с учетом синонимов и разных языков определим по формуле (17):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (17), тем сильнее не совпадают частоты семантически эквивалентных слов (с учетом синонимов и переводов) в словарях, чем меньше – тем слабее.

Соответственно, определим показатель абсолютного частотного совпадения лексики *i*-ї и *k*-ї публікаций с учетом синонимов и переводов по формуле (18):

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

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (18), тем слабее не совпадают частоты семантически эквивалентных слов (с учетом синонимов и переводов) в словарях, чем меньше – тем сильнее.

Для более комплексного анализа взаимосвязи публікаций и их подобия целесообразно учитывать их взаимосвязь через библиографические ссылки, а также подобие их лексики.

Обобщенный показатель соответствия лексики аннотаций литературных источников лексике текста цитирующей их публікации определим по формуле (19):

$$I_{art_j} = \frac{1}{N_{ref_j}} \sum_{i=1}^{N_{ref_j}} \left(\frac{1}{N_{annot_i}} \sum_{p=1}^{N_{annot_i}} \{1 | syn(annot_{q(i)p}) \cap text_j \neq \emptyset\} \right). \quad (19)$$

Данный показатель будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: чем больше будет значение показателя (19),

тем сильнее совпадает лексика текста j -ї публікації і лексика аннотацій цитируемых єю публікацій.

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

$$I_{trt_j} = \frac{1}{N_{ref}} \sum_{i=1}^{N_{ref}} \left(\frac{1}{N_{text_i}} \sum_{p=1}^{N_{text_i}} \{1 \mid syn(text_{q(i)p}) \cap text_j \neq \emptyset\} \right). \quad (20)$$

Даний показатель буде приймати значення в діапазоні $[0, 1]$: чим більше буде значення показателя (20), тем сильнее совпадает лексика текста j -ї публікації і лексика аннотацій цитируемых єю публікацій.

Рассмотрим метрики на уровне авторов.

Число публікацій i -го автора в базі публікацій за період времени t определим як (21):

$$N_{A_i}^t = \sum_{j=1}^N \{1 \mid i \in aut(paper_j), t_j \in t\}. \quad (21)$$

Число ссылок на публікацію i -го автора в базі публікацій за період времени t определим по формуле (22):

$$N_{A_i}^{cit,t} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \{1 \mid ref(k) \in R_j, i \in aut(paper_k), t_j \in t\}. \quad (22)$$

Число цитувань i -м автором собственных публікацій за період времени t в базі публікацій определим по формуле (23):

$$N_{A_i}^{sc,t} = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \{1 \mid ref(k) \in R_j, i \in aut(paper_k), i \in aut(paper_j), t_j \in t\}. \quad (23)$$

На основі введених показателей определим относительний показатель цитируемости публікацій i -го автора в базі публікацій за період времени t по формуле (24):

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

Показатель (24) буде приймати значення в діапазоні $[0, 1]$: чим більше буде значення показателя (24), тем сильнее цитат в базі.

Показатель прямого впливу публікацій i -го автора на публікації j -го автора за період времени t оціним по формуле (25):

$$I_{A_i \rightarrow A_j}^t = \frac{1}{\max\{N_{A_i}^t, N_{A_j}^t\}^2} \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \{1 \mid i \in aut(paper_k), j \in aut(paper_p), t_k \in t, t_p \in t, k \neq p, ref(k) \in R_p\}. \quad (25)$$

Показатель (25) буде приймати значення в діапазоні $[0, 1]$: чим більше буде значення показателя (25), тем сильнее вплив публікацій i -го автора на публікації j -го автора.

Показатель косвенного впливу публікацій i -го автора на публікації j -го автора за період времени t оціним по формуле (26):

$$I_{A_i \rightarrow A_j}^{indifl,t} = \frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^N \sum_{p=1}^N \{1 \mid i \in aut(paper_k), j \in aut(paper_p), t_k \in t, t_p \in t, k \neq p\}. \quad (26)$$

Показатель (26) буде приймати значення в діапазоні $[0, 1]$: чим більше буде значення показателя (26), тем більше публікацій j -го автора ссылається на більше публікацій i -го автора.

Рассмотрим метрики на уровне журналов.

На основі кожного абсолютного показателя якості публікацій, опублікованих за визначений період (определяється роком, томом, номером / випуском) в журналі, определим, відповідно:

– відносительний показатель якості номерів (випусків) журналу за період t (27):

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

де середній показатель якості номерів (випусків) журналу за період t оціним як (28):

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

– нормираний показатель якості номерів (випусків) журналу за період t (29):

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

де \bar{I}^{qt} – мінімальний показатель якості номерів (випусків) журналу за період t (30):

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

\hat{I}_p^t – максимальний показатель якості номерів (випусків) журналу за період t (31):

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

Общий показатель індексуемості k -го журналу по набору баз B определим по формуле (32):

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

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

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

Даний 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):

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

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):

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

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.

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

Показатель (40) будет принимать значения в диапазоне [0, 1]: его значение будет тем больше, чем большее 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):

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

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 $I_{infl}(i,j)$, $I_{indifl}(i,j)$, $\varphi_{i,j}^t$, $I_{i,j}^{t,infl}$, $I_{i,j}^{t,indifl}$, $\Phi_{i,j}^g$, $I_{i,j}^{g,infl}$, $I_{i,j}^{g,indifl}$, $\Phi_{i,j}^{tg}$, $I_{i,j}^{tg,infl}$, $I_{i,j}^{tg,indifl}$.

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.

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

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

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):

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

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

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

Число 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):

$$N_{A_i}^{sc_k} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 | ref(q) \in R_j, i \in aut(paper_q), i \in aut(paper_j), t_j \in t, paper_q \in jrn_k, paper_j \in jrn_k\}. \quad (44)$$

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

$$N_{A_i}^{scj_k} = \sum_{j=1}^N \sum_{q=1}^N \{1 | ref(q) \in R_j, i \in aut(paper_q), i \in aut(paper_j), t_j \in t, paper_j \in jrn_k\}. \quad (45)$$

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

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

где $0 < \rho \leq 1$. Значение ρ 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):

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

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 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Рассмотрим пример расчета части 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 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 РЕЗУЛЬТАТИ

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 публикациями 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
$I_{cit_j}^{rel}$	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 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 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
$I_{cit_{A_i}}^{rel,t}$	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 межстадийных 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 научометрических 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 ЛИТЕРАТУРЫ

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 цифры, 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.

Субботин С. О.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры программных 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 міжстаетайніх 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.
- Eggle 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. Kratkoe opisanie naukometricheskix pokazatelej, osnovannyyx na citiruemosti, *Upravlenie bol'shimi sistemami* : cb. tr. Spec., vyp. 44, Naukometriya i e'kspertiza v upravlenii naukoj. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 248–261.
- Shtovba S. D., Shtovba E. V. Obzor naukometricheskix pokazatelej dlya ocenki publikacionnoj deyatelnosti uchenogo, *Upravlenie bol'shimi sistemami* : cb. tr. Spec. vyp. 44, Naukometriya i e'kspertiza v upravlenii naukoj. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 262–278.
- Subbotin S. O. Model' ta indyvidual'ni metryky jakosti naukovyh publikacij, *Radioelektronika, informatyka, upravlinja*, 2015, No. 3, pp. 30–39.
- Global Gazetteer [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.fallingrain.com/world/>

Стаття надійшла до редакції 29.07.2015.

Після доробки 18.08.2015.

УДК 519.876.5:004

Чопоров С. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедри математического моделирования Запорожского национального университета,
Запорожье, Украина

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 построение 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

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

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 графиками [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 идеи 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.

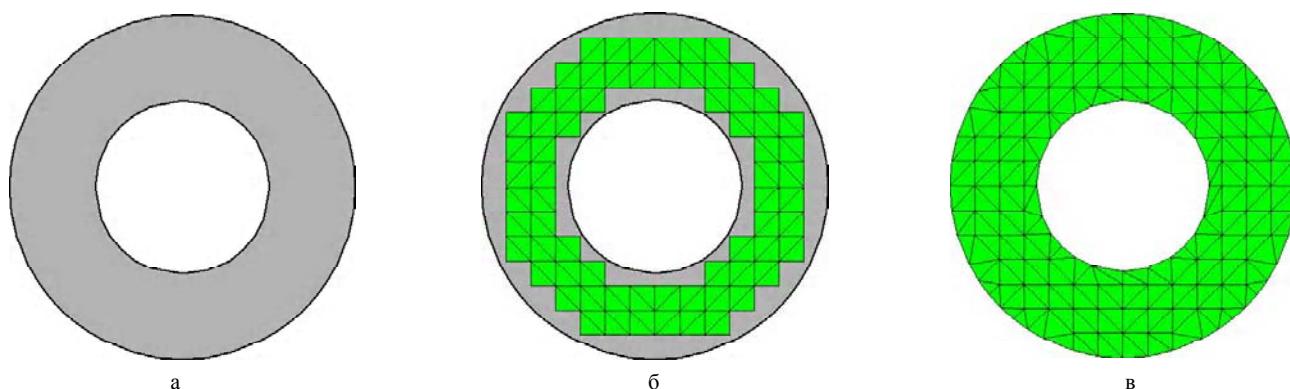


Рисунок 1 – Исходная область, начальная сетка и адаптированная сетка при $r_i = 0,5$ и $r_o = 1$: а – схема области, б – начальная сетка, в – триангуляция

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 шестиугольников на основе метода суперпозиции.

Пусть фоновая сетка треугольных элементов представлена множеством

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

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

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

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:

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

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 Δ 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

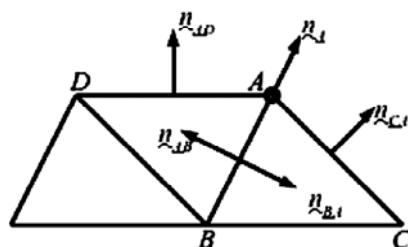


Рисунок 2 – Построение нормали в узле начальной сетки

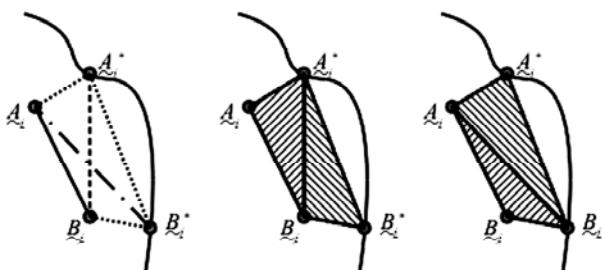


Рисунок 3 – Способы формирования треугольников в приграничном слое

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 Δ .

Параметр Δ 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 δ 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

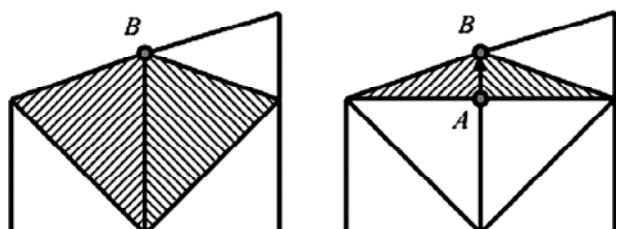


Рисунок 4 – Пример операции $\text{join}(A, B)$

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

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

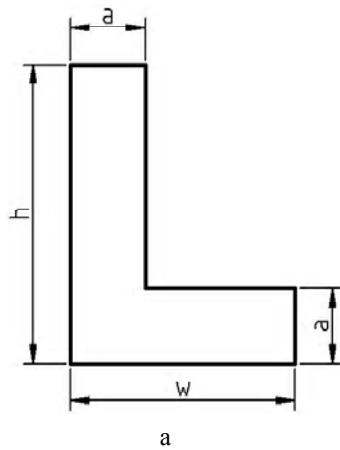
где функция

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

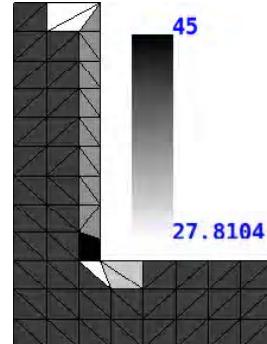
соответствует прямоугольной области, центр масс которой совпадает с началом координат.

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

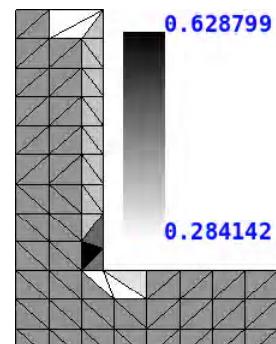
2. Квадратная пластина с треугольным отверстием в центре



а

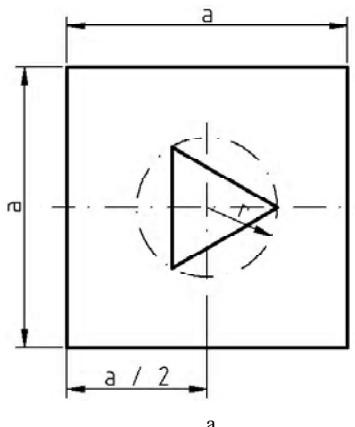


б

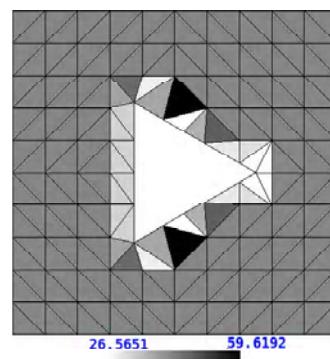


в

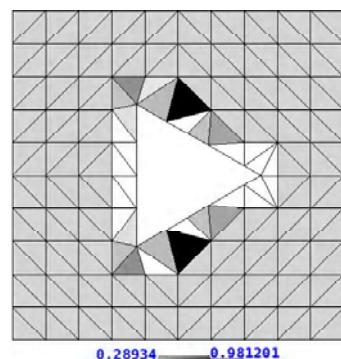
Рисунок 5 – L-область: $w = 30$, $h = 40$, $a = 10$: а – чертеж области, б – распределение значений минимального угла, в – распределение соотношения углов



а



б



в

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

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов 16×16 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

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

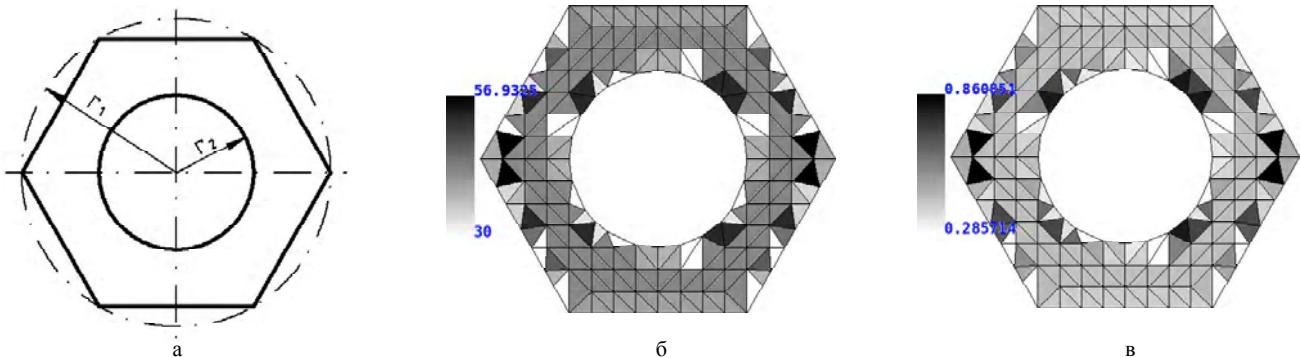


Рисунок 7 – Гайка: $r_1 = 40$, $r_2 = 20$:

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

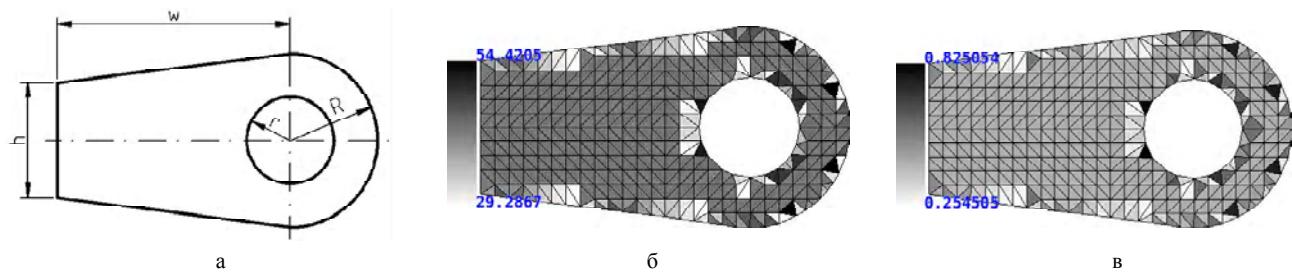


Рисунок 8 – Контур специальной планки при $h = 20$, $w = 40$, $R = 15$ и $r = 7,5$:

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

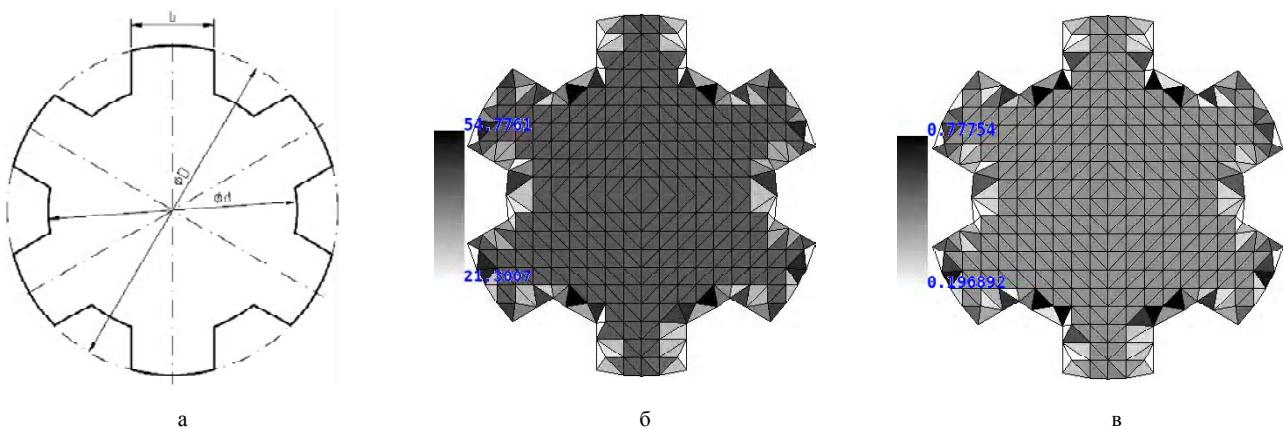


Рисунок 9 – Зубчатое колесо при $D = 80$, $d = 60$, $b = 20$ и $ng = 3$:

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

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов 27×15 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

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

При использовании в качестве фоновой равномерной сетки с количеством элементов 20×20 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).

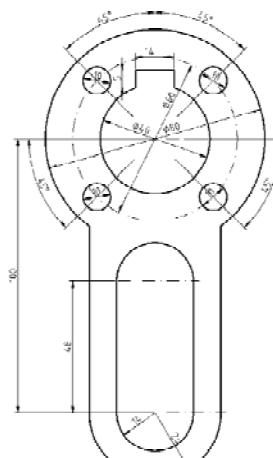
6. Прокладка

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

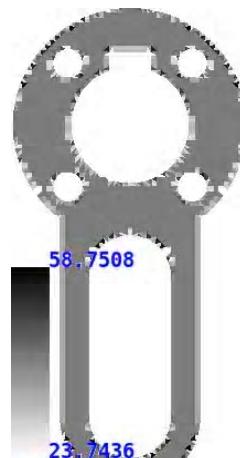
$$\text{layer}(x, y) = \left[\text{circle}(x, y, r_1) \vee \text{circle}(x, y + h_2, r_5) \vee \text{rect}\left(x, y + \frac{h_2}{2}, w_2, h_2\right) \right] \wedge \\ \wedge \neg \text{circle}(x, y, r_2) \wedge \neg \text{rect}(x, y - r_2, w_1, 2h_1) \wedge \\ \wedge \neg \text{circle}(x - c_{1,x},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

где параметры $r_1 = \frac{80}{2} = 40$, $r_2 = \frac{40}{2} = 20$, $r_3 = \frac{60}{2} = 30$,

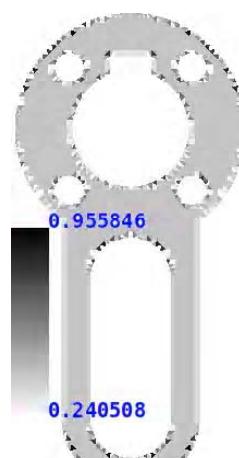
$$r_4 = \frac{10}{2} = 5, \quad r_5 = 24, \quad r_6 = 14, \quad w_1 = 14, \quad h_1 = 5, \quad w_2 = 2r_5,$$



а



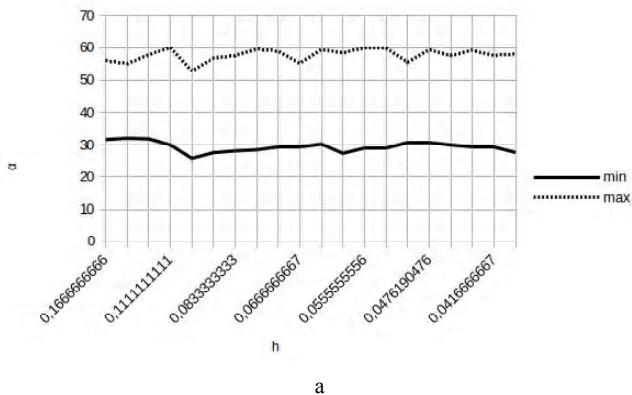
б



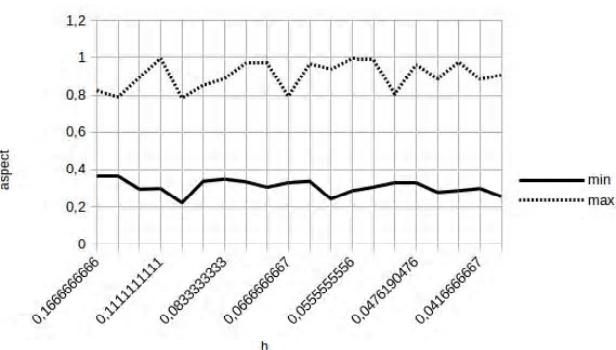
в

Рисунок 10 – Прокладка:

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



а



б

Рисунок 11 – Зависимость распределения метрик от шага сетки:
а – распределение значений минимального угла, б – распределение соотношения углов

Теперь рассмотрим влияния параметра δ на значения метрики. Варьируем значения δ , считая, что используется равномерная фоновая сетка 16×16 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.

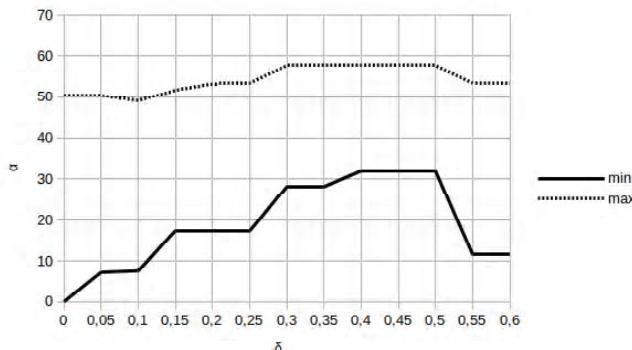


Рисунок 12 – Зависимость распределения значений минимального угла от значения параметра δ

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 отличии 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 определить оптимальные значения параметров метода. Также перспективой исследований является обобщение предложенного метода для моделирования трехмерных объектов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального университета №3/15 «Математическое моделирование конструкций неоднородной структуры на базе современных информационных технологий» (номер гос. регистрации 0115U0000761).

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. Мавритый, А. В. Толок, Т. И. Шейко] // Информационные технологии. – 2007. – № 10. – С. 23–32.

15. Максименко-Шейко К. В. R-функции в математическом моделировании геометрических объектов в 3D по информации в 2D / К. В. Максименко-Шейко, Т. И. Шейко // Вісник Запорізького національного університету : Збірник наукових праць. Фізико-математичні науки. – 2010. – № 1. – С. 98–104.
16. Лисняк А. А. Способ построения дискретных математических геометрических объектов, заданных с помощью R-функций / 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 объектов, заданных с помощью R-функций / А. А. Лисняк // Радіоелектроніка, 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. – Р. 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 ДВОВІМІРНИХ ОБЛАСТЕЙ ПРИ ФУНКЦІОНАЛЬНОМУ ПІДХОДІ

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

Ключові слова: дискретна модель, сітка, трикутник, R-функция, фонова 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 discrete 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: discreet model, mesh, triangle, R-function, background grid.

REFERENCES

1. Skvorcov A. V. Obzor algoritmov postroeniya triangulyacii Delone, *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 2002, No. 3, pp. 14–39.
2. Skvorcov A. V. Triangulyaciya Delone i ego primenenie. Tomsk, Izdatel'stvo Tomskogo universiteta, 2002, 128 p.
3. Bern M., Eppstein D. Mesh generation and optimal triangulation, *Computing in Euclidean Geometry*, 1992, No. 1, pp. 23–90.
4. 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
5. 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
6. 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
7. 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
8. 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
9. 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).
10. Naumann U., Schenk O. [edited by] Combinatorial Scientific Computing. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2012, 600 p.
11. Cheng S.-W., Dey T. K., Shewchuk J. R. Delaunay Mesh Generation. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2012, 387 p. ISBN: 9781584887300
12. Samet H. The Quadtree and Related Hierarchical Data Structures, *ACM Computing Surveys*, 1984, Volume 16, Issue, pp. 187–260. DOI: 10.1145/356924.356930
13. Rvachev V. L., Shejko T. I. Vvedenie v teoriyu R-funkcij, *Problemy mashinostroeniya*, 2001, Vol. 4, No 1–2, pp. 46–58.
14. Maksimenko-Shejko K. V., Macevityj A. M., Tolok A. V., Shejko T. I. R-funkcii i obratnaya zadacha analiticheskoy geometrii v trexmernom prostranstve, *Informacionnye tekhnologii*, 2007, No. 10, pp. 23–32.
15. Maksimenko-Shejko K. V., Shejko T. I. R-funkcii v matematicheskem modelirovaniy geometricheskix ob'ektov v 3D po informacii v 2D, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovykh prac'. Fizyko-matematychni nauky*, 2010, No. 1, pp. 98–104.
16. Lisnyak A. A. Sposob postroeniya diskretnyx matematicheskix geometricheskix obektov, zadannyx s pomoshh'yu R-funkcij, *Visnyk Zaporiz'kogo nacional'nogo universytetu: Zbirnyk naukovykh statej. Fizyko-matematychni nauky*, 2013, No. 1, pp. 59–69.
17. 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
18. 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

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.932 12; 004.932; 004.932.75

Жихаревич В. В.¹, Миронів І. В.², Остапов С. Е.³

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

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

³Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідуючий 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 ґрунтуються 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 модельною програму, яка дозволила оцінити ефективність клітинно-автоматичних методів та провести експерименти з розпізнаванням 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-автоматичного поля та виведення результатів розпізнавання.

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

НОМЕНКЛАТУРА

A – скінчений 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 «*C*»);

X – вхідний алфавіт автомата Мура;

Y – вихідний алфавіт автомата Мура;

δ – функція переходів автомата Мура;

μ – функція виходів автомата Мура;

\rightarrow – напрям руху автомата *A* вправо;

\leftarrow – напрям руху автомата *A* вліво;

\downarrow – напрям руху автомата *A* вниз;

\uparrow – напрям руху автомата *A* вгору.

ВСТУП

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

досить давно. Як правило, такі системи розбивають процес переводу 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 різni 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.

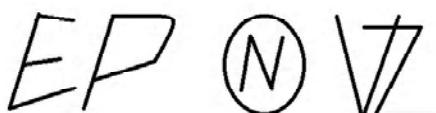


Рисунок 1 – Деформовані символи англійського алфавіту

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 скінченних 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 застосовувати 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 розширяє 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, траекторії 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: скінчений автомат A описується кортежем $A = \{S, X, Y, \delta, \mu\}$, причому відображення δ описує функцію переходів автомата $\delta: S \times X \rightarrow S$, а відображення μ – традиційну функцію виходів автомата Мура $\mu: S \rightarrow Y$.

Тут входним сигналом (умовою переходу до іншого стану автомата) є або досягнення ним кінця лінії символу (наприклад, станів S_1 та S_7 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 рівномірних станів (згідно графу переходів).

Вихідною реакцією КА є сигнал про напрямок руху в даний момент часу (зображені 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, зображенним 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 априорних 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 автомати 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).

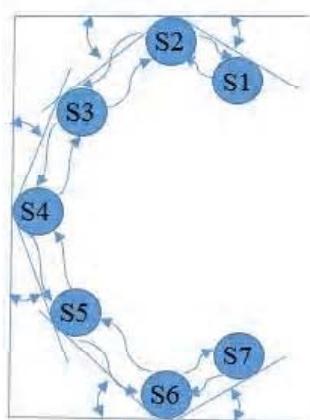


Рисунок 2 – Приклади графів переходів ймовірнісних автоматів Мура для символу «С»

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 усії свої стани, наприклад, ніколи не досягне станів S_6 та S_7 (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 усії свої стани, перебуваючи на клітинно-автоматному полі, яке належить іншому символу. Наприклад, КА типу «С» будуть реалізовувати всії свої стани, перебуваючи на літері «G», а отже не будуть вилучатися. Таким чином, на літері «G» зможуть реалізувати усії свої стани два типи КА: «С» та «G». Аналогічна ситуація може реалізуватися з символами «І» та «Д», «а» та «е» 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 усії 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 «G», перетвориться в КА типу «G», КА типу «Д» 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 моделючу програму. Використовувалася мова програмування Java, середовище розробки – IntelliJ IDEA. На клітинно-автоматному полі сформовано обрамлені літери 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 приводять 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.

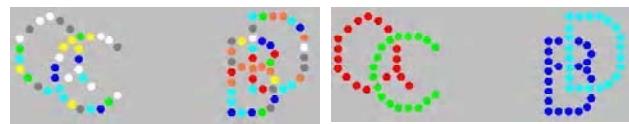


Рисунок 6 – Приклад розпізнавання символів, які частково накладаються. Ліворуч – стартовий стан системи, праворуч – розпізнані символи

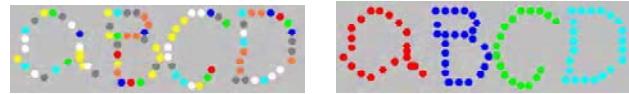


Рисунок 7 – Приклад розпізнавання символів, які мають певний ступінь деформації. Ліворуч – стартовий стан системи, праворуч – результат розпізнавання

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 траекторіях, які визначаються сукупністю їх станів та переходів. За межами вказаних траекторій 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 нездійсненим 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 (стационарний 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-

кільки 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 редактування та виведення розпізнаного 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. Шапіро Л. Комп’ютерне зоріння / Л. Шапіро, Дж. Стокман. – М. : Біном. Лабораторія знань, 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. Ostatov //
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-strukturnyh-priznakov-izobrazheniy-simvolov-na-osnove-kletochnyh-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.nbu.edu.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.¹, Миронів І. В.², Остапов С. Э.³

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Чернівецького національного університета імені Юрія Федьковича, Черновці, Україна

²Асистент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Чернівецького національного університета імені Юрія Федьковича, Черновці, Україна

³Д-р физ.-мат. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Чернівецького національного університета імені Юрія Федьковича, Черновці, Україна

АЛГОРИТМ РАСПОЗНАВАННЯ СИМВОЛОВ ТЕКСТА НА ОСНОВЕ КОНКУРИРУЮЧИХ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В данній роботі предложен новый метод распознавания символов текста, основанный на концепции конкурентных 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.¹, Myroniv I. V.², Ostapov S. E.³

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

²Assistant Professor, software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine

³Dr. 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

1. Shapiro L., Stokman Dzh. Komp'juternoe zrenie. Moscow, Binom, Laboratoriya znanij, 2006, 752 p.
2. Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision: A Modern Approach. Pearson Education, Inc., 2011, 792 p.
3. Wolfram S. A New Kind of Science. Wolfram Media, Inc., 2002, 1197 p.
4. 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 automata, *Collection of Scientific papers of IInd Int. Conf. «Cluster Computing-2013»*. Lviv, 2013, June 3–5, pp. 149–156.
5. von Neumann J. Theory of Self Reproducing Automata. University of Illinois Press, Champaign, 1966, 388 p.
6. Zhikharevich V. V., Ostapov S. Je. Modelirovanie processov samoorganizacii i jevoljucii sistem metodom nepreryvnih asinhronnih kletochnyh avtomatov. Komp'juting, 2009, vol. 8, No. 3, pp. 61–71.
7. Zhikharevich V. V., Shumiljak L. M., Strutinskaja L. T. i dr. Postroenie i issledovanie nepreryvnoj kletchno-avtomatnoj modeli processov teploprovodnosti s fazovimi perehodami pervogo roda, *Komp'juternye issledovaniya i modelirovanie*, 2013, vol. 5, No. 2, pp. 141–152.
8. 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.
9. 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>
10. Sujasov D. I. Vydenie strukturnyh priznakov izobrazhenij simvolov na osnove kletochnyh avtomatov s metkami [Jelektronnyj resurs], *Informacionno-upravljajushchie sistemy*, 2010, No. 4, pp. 39–45. Rezhim dostupa: <http://cyberleninka.ru/article/n/vydenie-strukturnyh-priznakov-izobrazheniy-simvolov-na-osnove-kletochnyh-avtomatov-s-metkami>
11. Belan S. N. Ispol'zovanie kletochnyh tehnologij v sistemah obrabotki i raspoznavaniya zobrazenij [Jelektronnyj resurs], *Shtuchnij intelekt*, 2008, No. 3, pp. 244–253. Rezhim dostupa: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/6952>.
12. Evsjutin O. O. Issledovanie diskretnyh ortogonal'nyh preobrazovanij, poluchaemyh s pomoshch'ju dinamiki kletochnyh avtomatov [Jelektronnyj resurs], *Komp'juternaja optika*, 2014, vol. 38, No. 2, pp. 314–321. Rezhim dostupa: <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/>

¹Д-р техн. наук, профессор Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина

²Аспирантка Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина

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 transformation 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;
 μ_a – функция полезности;
 μ_{x_i} – функция принадлежности;
 \bar{x}_i – исходные данные;
 \bar{y}_i – параметр логического вывода;
 \bar{y}_k – значения управляемого 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 – канали 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_h – 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 сложных 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 бумажном виде.

Работа направлена не только на выявление 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:

$$\{\Pr_j\}, j \in J, \quad (1)$$

$$\{I_{jk}\}, k \in K. \quad (2)$$

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

$$\forall \Pr_j(\tau), \Pr_j \in \{\Pr_j\} A \cup S_h. \quad (3)$$

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 ЛІТЕРАТУРЫ

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 продукции 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 интерфейса 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, декомпозициируется 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, не сильно 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-

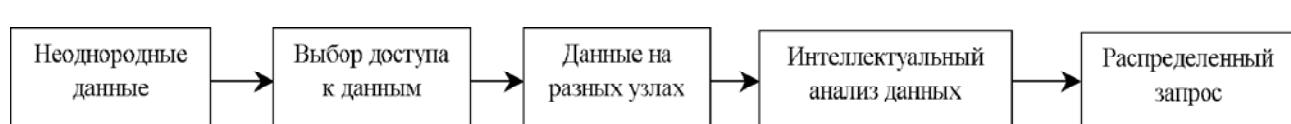


Рисунок 1 – Структура анализа предметной области

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 различными 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 осуществляя оптимизацию поиска методом половинного деления (дихотомии).

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

Таблица 1

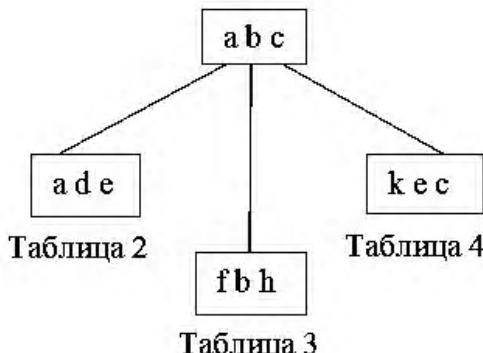


Рисунок 2 – Пример структурной схемы неоднородных БД

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 осуществляется минимизация 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:

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

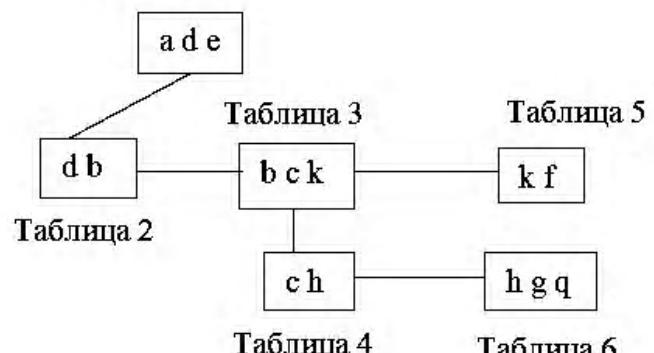
$$R^{(1)} : \text{IF}(x_1 \text{ is } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ is } A_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ is } A_n^N) \text{THEN } y_N = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (5)$$

– 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-

Таблица 1



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

Этап 1. Формирование правил продукций TSK.

Этап 2. Формирование функции принадлежности μ_{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 управленических 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)

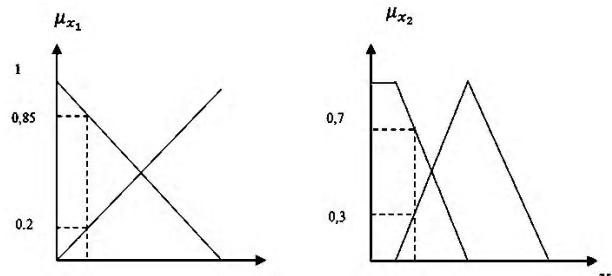
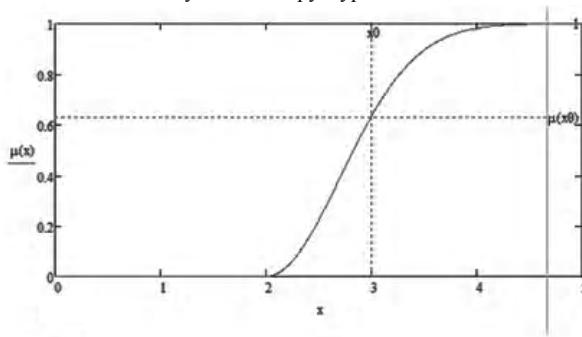
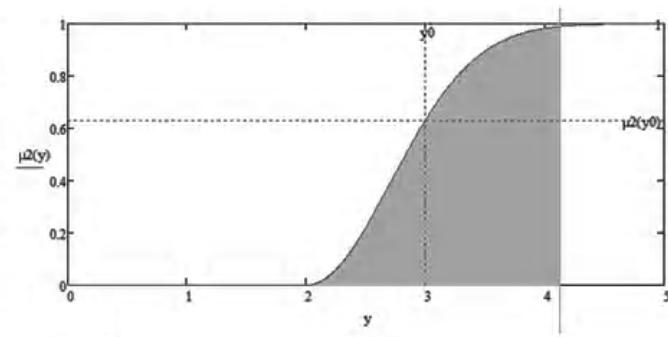


Рисунок 3 – Структура вычислений



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 расширений методом TSK и методов Мамдани [6].

Тогда метод Мамдани представлен в виде:

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

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 методом [5] (рис. 4)

Задав x' , находимо решение y' . После дефазификации [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

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

Оптимизация запросов в работе, реализована с использованием расширения метода диахотомии (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 данных 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, расположеннымными 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 детализированных, 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 практиках 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 госбюджетной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета радиоэлектроники «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 ЛИТЕРАТУРЫ

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 metallurgical academy of Ukraine, 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-семінару «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, ХНУРЭ, 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 Є. І.¹, Ходак М. В.²

¹Д-р технічних наук, професор Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

²Аспірантка Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

ЗНАННЯ-ОРІЄНТОВАНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕТОДИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ЗА УМОВ НЕВИЗНАЧНОСТІ

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 розширеній знання-орієнтований метод нечіткого виведення 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: федераційна база даних, розподілений запит, неоднорідні системи, локальні дані, база правил.

Kucherenko Ye. I.¹, Khodak M. V.²

¹Dr. Sc., prof., Professor of Department of Artificial Intelligence, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

²Postgraduate 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. Analitical 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 menagment technological process monograph-scientific publication. Dnipropetrovsk, National metallurgical academy of Ukraine, 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>

УДК 681.518:004.93.1'

Москаленко В. В.¹, Рижова А. С.², Довбиш А. С.³¹Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна²Аспірант кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна³Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету

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 сцинтиграм 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 роевої оптимізації вирішальних правил та показано результати автоматичної сегментації сцинтиграфічних 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 нормальній 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, роеві 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 швидкості;

c_2 – ваговий коефіцієнт для формули швидкості;

$D_{1,m}$ – 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_δ – область допустимих значень параметра поля контрольних допусків на значення ознак розпізнавання;

M – потужність алфавіту класів розпізнавання;

m – номер поточного класу розпізнавання;

N – кількість пікселів сцинтиграфічного 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;

$y_{1,i}$ – середнє вибіркове значення i -ї ознаки в базовому класі X_1^o ;

α_m – помилка первого роду;

β_m – помилка другого роду;

δ_{\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 сцинтиляційних детекторів забезпечують неперервний прогрес в даній області. Однак, незважаючи на суттєве розширення обсягу діагностичних даних і можливості їх візуального подання, остаточне 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 узагальнючу 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 апріорно некласифікований 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 апріорно 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 Φ_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 відстань 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.

Переважна 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 враховувати 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 64×64 розглядаються як апріорно некласифікована 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 сцинтиграми на зони спо-

стереження становить $K = 3$. Області лівої та правої нирок 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 Φ_1^o відповідає нормаль-ному функціонуванню нирки, клас Φ_2^o характеризує ураження ниркової паренхіми, клас Φ_3^o – порушення уродинаміки.

Інформаційно-екстремальне машинне навчання полягає в трансформації априорно-нечіткого простору первинних ознак розпізнавання в чітку еквівалентність класів, контейнери яких відновлюються в радіальному базисі вторинних ознак двійкового простору Хеммінга [4]. Переход 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 априорно некласифікованої навчальної матриці $\{v_i^{(j)} | j = \overline{1, n}; i = \overline{1, N}\}$, яку необхідно розбити на класи еквівалентності $\{T_k^o | k = \overline{1, K}\}$, 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 $\{z^{(j)} | j = \overline{1, r}\}$, що є потенційними початковими центрами контейнерів, шляхом копіювання двійкової матриці

$\{x_i^{(j)}\}$, видалення в ній одинакових векторів та сортування решти векторів в порядку збільшення кількості одиничних координат.

2. Формування початкових центрів контейнерів $\{x_k | k = \overline{1, K}\}$ за правилом рівномірного збільшення кількості одиниць в центрах упорядкованого алфавіту

$$x_k = \begin{cases} z^{(1)}, k = 1; \\ z^{(r \cdot [k-1]/[K-1])}, 1 < k < K; \\ z^{(r)}, k = K. \end{cases}$$

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 $d_k^* = \arg \max_{G_d \cap G_n} \{\bar{E}(d_k)\}$.

5. Зупин.

Ітераційна процедура оптимізації впорядкованого вектора параметрів поля контрольних допусків $<\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_{N-1}, \delta_N>$ 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 E

$$<\delta_i^*> = \arg \max_{G_\delta} \left\{ \max_{G_d \cap G_E} \{\bar{E}\} \right\}. \quad (2)$$

Для оптимізації вектора параметрів полів контрольних допусків $<\delta_i>$, який впливає на функціональну ефективність СППР, запропоновано використовувати алгоритм рою частинок, оскільки він дозволяє знайти глобальний максимум КФЕ, не потребуючи 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 -ї ітерації, то нові значення найкращої персональної P_{best} та глобальної G_{best} позицій обчислюються за правилами:

$$P_{best_j}(k+1) = \begin{cases} P_{best_j}(k) & \text{якщо } J(P_j(k+1)) \leq J(P_{best_j}(k)), \\ P_j(k+1) & \text{якщо інакше;} \end{cases}$$

$$G_{best}(k+1) = \arg \max_j \{J(P_{best_j}(k+1))\}.$$

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:

$$\begin{aligned} V_{j,i}(k+1) &= wV_{j,i}(k) + c_1 r_{1,i}(k) * [P_{best_j,i}(k) - P_{j,i}(k)] + \\ &+ c_2 r_2(k) * [G_{best_j} - P_{j,i}(k)], \end{aligned}$$

$$P_{j,i}(k+1) = P_{j,i}(k) + V_{j,i}(k+1),$$

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 розпізнавання класу X_m^o розглядається модифікація інформаційної міри Кульбака [5], яка є функціоналом від першої достовірності $D_{1,m}$ та помилки другого роду β_m :

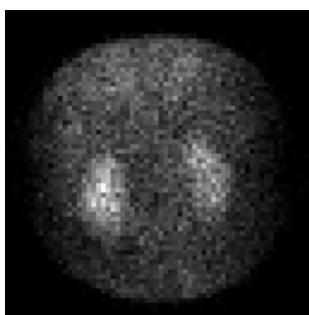
$$E_m = [D_{1,m} - \beta_m] \cdot \log_2 \left(\frac{1 + [D_{1,m} - \beta_m]}{1 - [D_{1,m} - \beta_m]} \right). \quad (3)$$

Робоча (допустима) область визначення функції інформаційного критерію обмежена нерівностями $D_{1,m} \geq 0,5$, $D_{2,m} = 1 - \beta_m \geq 0,5$.

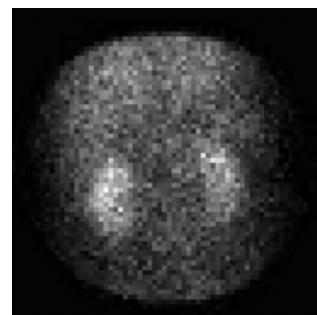
Нормовану модифікацію критерію (3) представимо у вигляді

$$E_m^{(k)} = \frac{E_m^{(k)}}{E_{\max}}, \quad (4)$$

де E_{\max} – максимальне значення критерію (3), розраховане при: $D_{1,m}^{(k)} = 1$ і $\beta_m^{(k)} = 0$.



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 μ_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 (сцинтиляції) 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 міжцентральні відстані контейнерів класів рівні $d(x_1 \otimes x_2) = 11$, $d(x_1 \otimes x_3) = 13$ та $d(x_2 \otimes x_3) = 14$ відповідно.

Аналіз рис. 4 показує, що оптимальні значення радіусів гіперсферичних контейнерів класів Φ_1^o , Φ_2^o та Φ_3^o

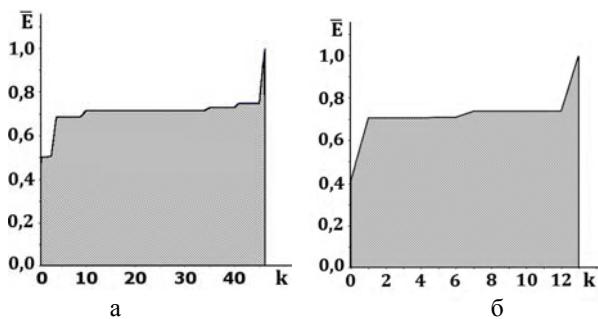


Рисунок 2 – Динаміка зміни усередненого нормованого інформаційного КФЕ в процесі роевої оптимізації полів контрольних допусків: а – класифікатор зон спостереження; б – класифікатор функціонального стану нирки

відповідно рівні: $d_1 = 4$, $d_2 = 10$ та $d_3 = 6$. При цьому міжцентральні 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 вдається 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.

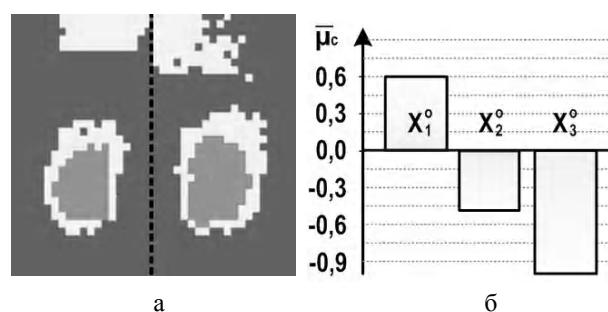


Рисунок 5 – Результат сегментації та класифікації: а – зони спостереження; б – функціональний стан лівої нирки

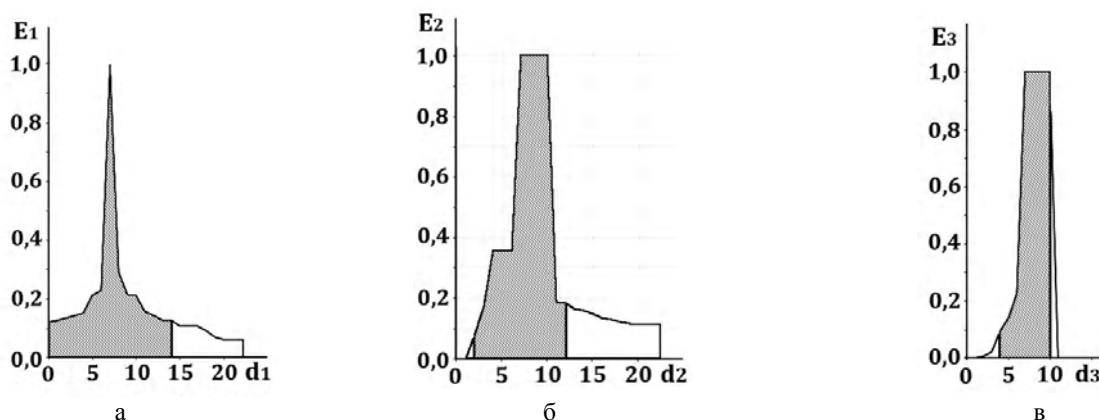


Рисунок 3 – Залежність нормованого інформаційного КФЕ від радіусу контейнера класів зон спостереження: а – T_1^o ; б – T_2^o ; в – T_3^o

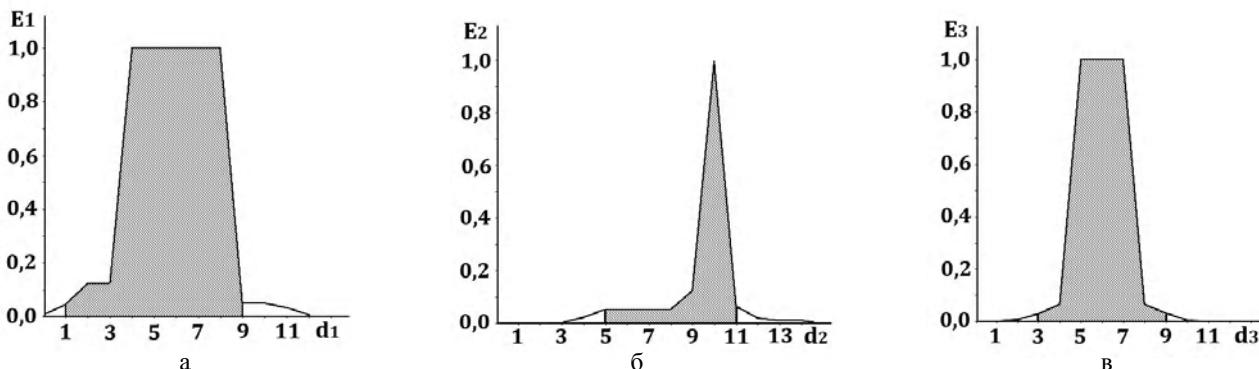


Рисунок 4 – Залежність нормованого інформаційного КФЕ від радіусу контейнера класів функціонального стану нирки: а – Φ_1^o ; б – Φ_2^o ; в – Φ_3^o

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 – $\bar{d}_{\Phi c}^* = 14,0$. При цьому коефіцієнт нечіткості для розбиття простору ознак на класи еквівалентності дорівнює :

$$L_\Phi^* = \frac{\bar{d}_\Phi^*}{\bar{d}_{\Phi c}^*} = 0,47.$$

Таким чином, завадозахищеність вирішальних правил для автоматичної сегментації нижча від завадозахищеності класифікатора функціональних станів в зоні інтересу і обумовлює потенційну завадозахищеність СППР вцілому. 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, подальше дослідження варто присвятити збільшенню алфавіту класів зон інтересу при автоматичній сегментації сцинтиграм 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 сцинтиграм 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 оптимізаторами 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-екстремально-го 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 роєвої оптимізації 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 переніхіми та порушення уродинаміки нирок.

ПОДЯКИ

Автори висловлюють подяку завідувачу лабораторії Інституту сцинтиляційних 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

- Гектин А. В. Медицинские гамма-камеры – тенденции и динамика развития / А. В. Гектин, А. В. Демин, В. Ю. Педаш // Сцинтиляционные материалы. Получение, свойства, применение. Сборник под редакцией Б. В. Грінева. – Харків : «Інститут монокристаллов», 2007. – 416 с.
- Лишманов Ю. Б. Радионуклидная диагностика для практических врачей / Ю. Б. Лишманов, В. И. Чернова. – Томск : SST, 2004. – 394 с.
- Люггер Дж. Ф. Искусственный интеллект. Стратегии и методы решения сложных проблем / Дж. Ф. Люггер. – М. : Вильямс. – 2003. – 864 с.
- 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.
- Suji G. E. MRI Brain Image Segmentation based on Thresholding / G. E. Suji, Y. V. S. Lakshmi, G. W. Jiji // International Journal of Advanced Computer Research. – 2013. – Vol. 3, No.1, Issue 8. – P. 97–101.
- 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.
- Landgren M. Segmentation of medical images. Applications in echocardiography and nuclear medicine / M. Landgren. – Sweden, Lund : MediaTryck, 2014. – 73 p.
- 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.¹, Рижова А. С.², Довбыш А. С.³

¹Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных наук Сумського національного університету, Суми, Україна

²Аспірант кафедри комп'ютерних наук Сумського національного університету, Суми, Україна

³Д-р техніческих наук, професор, заведуючий кафедрой комп'ютерных наук Сумського національного університету

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИНЯТТЯ 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 сцинтиграмм 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 сцинтиграфических 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 уринодинамики. 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, роеевые алгоритмы.

Moskalenko V. V.¹, Rizhova A. S.², Dovbysh A. S.³

¹Ph.D., Senior lecturer of Computer Science department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

²Postgraduate student of Computer Science department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

³Dr. 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

1. Gektin A. V., Demin A. V., Pedash V. Ju. Medicinskie gammakamery – tendencii i dinamika razvitiya, *Scintillacionnye materialy. Poluchenie, svojstva, primenenie. Sbornik pod redakcijej B.V. Grinjova*. Har'kov, «Institut monokristallov», 2007, 416 p.
2. Lishmanov Ju. B., Chernova V. I. Radionuklidnaja diagnostika dlja prakticheskikh vrachej. Tomsk, SST, 2004, 394c.
3. Ljugger Dzh. F. Iskusstvennyj intellekt. Strategii i metody reshenija slozhnyh problem. Moscow, Vil'jams, 2003, 864 p.
4. 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.
5. Suji G. E., Lakshmi Y.V.S., Jiji G. W. MRI Brain Image Segmentation based on Threshholding, *International Journal of Advanced Computer Research*, 2013, Vol. 3, No.1, Issue 8, pp. 97–101.
6. 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,
7. Landgren M. Segmentation of medical images. Applications in echocardiography and nuclear medicine. Sweden, Lund, MediaTryck, 2014, 73 p.
8. 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.
9. Gonzalez F.A., Romero E. Biomedical Image Analysis and Machine Learning Technologies: Applications and Techniques. Hershey, USA, IGI, 2009, 390 p.
10. 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.
11. Vershovskij E. A. Roevoj algoritm optimizacii v zadache klasterizacii mul'tispektral'nogo snimka, *Izvestija JuFU. Tehnickie nauki*, 2010, No. 5, pp. 102–107.

International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2015, Vol.11, No.1, pp. 87–103.

УДК 004.021

Мочалин А. Е.

Канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий Киевской государственной академии водного транспорта, Киев, Украина

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ БОЛЬШОГО ЧИСЛА ПАРАМЕТРОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГЕНЕТИЧЕСКИХ АЛГОРИТМОВ

Для формально сформулированной задачи оптимизации рассмотрены основные достоинства и недостатки классических методов ее решения. Освещены основные предпосылки появления и история развития аппарата генетических алгоритмов. Проанализировано современное состояние библиографии, посвященной вопросам использования поисковых генетических алгоритмов. Рассмотрены основные идеи и принципы, лежащие в основе работы генетических алгоритмов. Выполнен обзор наиболее часто встречающихся генетических операторов: кроссинговера и мутации. Детально проанализированы базовые этапы работы классического генетического алгоритма. Рассмотрены основные способы кодирования решений в хромосомах, выбора пар особей для скрещивания, а так же представлены некоторые распространенные стратегии отбора. Сформулированы основные достоинства бинарного кодирования решений в хромосомах с применением кода Грэя, а так же даны рекомендации по использованию вещественного кодирования решений в различных ситуациях. Описаны два основных класса параллельных генетических алгоритмов: «островов» и «мастер-рабочий». Приведен пример использования генетического алгоритма для оптимизации многоэкстремальной функции, зависящей от большого числа параметров. Представлены экспериментальные данные, подтверждающие преимущества использования графических процессоров для вычислений в параллельных генетических алгоритмах. Изложены рекомендации по целесообразности применения генетических алгоритмов в различных ситуациях.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм, мягкие вычисления, генетические операторы, кодирование решений.

НОМЕНКЛАТУРА

BORF – Building and Optimization of Reconstructed Frame;

Pix – пиксель;

PIV – Particle Image Velocimetry;

ГА – генетический алгоритм;

ПГА – параллельный генетический алгоритм;

A – константа;

$[a_i, b_i]$ – диапазон действительных значений, которые может принимать оптимизируемый параметр;

dx – перемещение;

D – ограничения, выделяющие область допустимых решений;

E – функция ошибки;

g_i – целочисленное значение хромосомы;

K – количество разрядов (ген) для кодирования возможных решений в битовых строках (хромосомах);

m' – некоторое решение из области допустимых решений;

m'' – оптимальное решение;

M – пространство решений некоторой задачи;

M' – пространство допустимых решений некоторой задачи;

N – количество поколений в генетическом алгоритме;

P – популяция особей;

P_i – отдельная особь из популяции P ;

$P_{i,j}^k$ – потомок особей P_i и P_j ;

Pm_i – мутированная особь P_i ;

Q – целевая функция;

r_i – вещественное число, соответствующее закодированному в хромосоме g_i решению;

R – критерий оптимизации;

t – время работы генетического алгоритма;

V_x, V_y, V_z – проекции скорости течения на оси x, y, z ;

y – координата точки в потоке, по оси y ;

x_i, z_i ; – отдельные гены в хромосомах.

ВВЕДЕНИЕ

На протяжении всей своей эволюции человечество постоянно сталкивалось с различными задачами оптимизации. Поиск кратчайшего пути, оптимальное управление запасами топлива, разработка автоматизированных систем поддержки принятия решений, выбор геометрической формы кузова автомобиля, при которой сопротивление воздуха будет наименьшим – все эти задачи тем или иным образом затрагивают теорию оптимизации. Оптимизация в широком смысле слова находит свое применение не только в науке и технике, но, так же, и в любой другой человеческой деятельности. Еще в XVIII веке великий ученый, блестящий математик и механик Леонард Эйлер сказал: «... в мире не происходит ничего, в чем не был бы виден смысл какого – нибудь максимума или минимума; поэтому нет никакого сомнения, что все явления мира с таким же успехом можно определить из причин конечных при помощи методов максимумов или минимумов, как из самих причин производящих».

Первые математические методы поиска оптимальных решений возникли уже в XVIII веке (вариационное исчисление, численные методы и др.). Однако по-настоящему широкое применение методы оптимизации получили во второй половине XX века. Этому способствовало бурное развитие ЭВМ, без использования которых было крайне сложно реализовать практическое применение математических методов оптимизации.

Одним из перспективных направлений оптимизации являются генетические алгоритмы [1]. Несмотря на то, что впервые о них заговорили более 40 лет назад, они до сих пор продолжают развиваться и находят актуальное практическое применение в самых различных областях науки и техники.

Объектом исследования является процесс решения оптимизационных задач большого числа параметров, основанный на использовании генетических алгоритмов.

Предметом исследования являются операторы, модели, методы и стратегии, используемые в ГА.

Целью данной работы является анализ развития и текущего состояния аппарата генетических алгоритмов, а так же оценка целесообразности использования ГА с бинарным кодированием для поиска глобальных максимумов и минимумов многоэкстремальной функции большого числа параметров при решении различных оптимизационных задач.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть заданы $M, D: M' \subseteq M$, а также целевая функция Q , которая каждому значению $m' \subseteq M'$ ставит в соответствие вещественное число из множества R (критерий оптимизации используется для сравнения альтернативных решений и выбора лучшего из них). Тогда модель задачи оптимизации описывается тройкой: $\langle M, D, Q \rangle$.

Требованием оптимизации является выражение:

$$Q(m') \rightarrow \min \text{ (или } Q(m') \rightarrow \max \text{).} \quad (1)$$

Решение $m'' \in M'$, удовлетворяющие требованию оптимизации (1), называется оптимальным. Целью оптимизационной задачи является поиск оптимального решения m'' из множества всех допустимых решений. Довольно часто встречаются задачи, требующие оптимизации по нескольким критериям одновременно.

2 ЛІТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В связи с высокой распространностью и важностью решения задач оптимизации в науке и технике, в настоящее время разработано довольно большое количество различных методов и алгоритмов поиска максимумов и минимумов. К ним можно отнести: поиск в ширину [1], метод дихотомии [1], метод градиентного спуска [2], метод золотого сечения [2] и т. д.

Все указанные выше методы оптимизации относятся к классическим. Они позволяют с высокой точностью решать большой класс задач, однако обладают и недостатками. Среди основных недостатков классических методов оптимизации следует отметить следующие:

- при оптимизации нелинейных функций возникает проблема локальных экстремумов, когда за истинное решение принимается не глобальный, а локальный экстремум;
- при увеличении числа одновременно оптимизируемых параметров резко возрастает вычислительная сложность и, как следствие, время вычислений.

Попытки преодоления указанных проблем привели к созданию теории генетических алгоритмов. Генетические алгоритмы – это поисковые алгоритмы, основанные на селекции и генетике [1]. Основателем теории генетических алгоритмов по праву считается американский

исследователь Джон Холланд, который в конце 1960-х годов предложил в качестве принципов комбинаторного перебора вариантов решения оптимизационных задач использовать методы и модели механизма развития органического мира на Земле. В 1975 году Холланд опубликовал свою самую знаменитую работу «Adaptation in Natural and Artificial Systems» [3]. В ней он впервые ввел термин «генетический алгоритм». Ученники Холланда – Кеннет Де Йонг и Дэвид Голдберг – продолжили его работу в области ГА. Наиболее известная работа Голдberга – «Genetic algorithms in search optimization and machine learning» [4].

Следует отметить, что генетические алгоритмы относятся к более общей группе методов, называемых эволюционными вычислениями [5]. В свою очередь эволюционные вычисления относятся к классу неточных, приближенных методов решения, часто называемых «мягкими вычислениями» [6].

Современная библиография по генетическим алгоритмам превышает 9000 наименований и продолжает увеличиваться. Однако работ, посвященных именно комплексному обзору теории ГА, учитывая важность и актуальность данного направления, все еще не хватает.

Одним из лучших русскоязычных современных трудов в области генетических алгоритмов является учебник Гладкова Л. А. [1]. В данном учебнике описаны фундаментальные основы ГА и эволюционного моделирования, представлены основные принципы, стратегии и концепции генетического поиска. Однако в качестве обзора знакомства с ГА и областью их применения данный труд рассматривать не стоит, в связи с довольно большим объемом материалов, рассматриваемых в нем.

Среди наиболее известных работ в области ГА следует отметить статью Whitley D. A «Genetic algorithm tutorial» [7]. Данная работа носит обзорный характер и ее можно рекомендовать для ознакомительного знакомства с теорией генетических алгоритмов. К недостаткам этой статьи можно лишь отнести отсутствие современных примеров практического применения ГА в различных областях науки и техники (работа вышла более 20 лет назад).

В текущей работе попытаемся совершить краткий комплексный обзор основ теории оптимизации с использованием генетического поиска, и подкрепить теорию современными примерами использования аппарата ГА.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

ГА базируются на теоретических достижениях синтетической теории эволюции и используют основные принципы эволюционной теории Ч. Дарвина [8]: наследственность, изменчивость и естественный отбор.

ГА оперируют совокупностью особей (популяцией), которые представляют собой строки (хромосомы), кодирующие одно из решений задачи. Этим ГА отличается от большинства других алгоритмов оптимизации, которые оперируют лишь с одним решением, улучшая его.

Каждая особь оценивается мерой ее «приспособленности» согласно тому, насколько «хорошо» соответствующее ей решение задачи. Для этого используется функция приспособленности [1] (целевая функция), которая выделяет наиболее приспособленные решения (в даль-

нейшем они продолжают использоваться) и наихудшие решения (удаляются из популяции и не влияют на дальнейший поиск оптимального решения). Таким образом, мы стремимся повысить приспособленность, а следовательно, и приблизиться к искомому решению.

Работа генетического алгоритма представляет собой итерационный процесс. На каждой новой итерации над текущими особями применяются различные генетические операторы, которые порождают новые особи. После этого все особи оцениваются с помощью целевой функции и наиболее приспособленные используются на следующей итерации ГА. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будут достигнуты желаемые результаты, либо число итераций превысит пороговое значение (пороговое значение числа итераций позволяет ограничить сверху временные рамки работы алгоритма). Так же, одним из признаков того, что следует остановить итерационный процесс, является схождение популяции (состояние популяции, когда все ее особи на протяжении нескольких поколений находятся в области некоторого экстремума и почти одинаковы). Схождение популяции обычно указывает на то, что достигнутое решение близкое к оптимальному. Обычно итоговым решением задачи служит наиболее приспособленная особь последнего поколения.

Генетические операторы являются средством отображения одного множества на другое. Они позволяют применять принципы наследственности и изменчивости к виртуальным популяциям. Все генетические операторы обладают вероятностными характеристиками, что вносит некоторую степень свободы в работу ГА. Наиболее применяемыми генетическими операторами являются оператор кроссинговера (скрещивания) и оператор мутации.

Оператор кроссинговера моделирует процесс скрещивания особей. Этот генетический оператор приводит к созданию новых особей, на основе существующих. Простейшим вариантом скрещивания является одноточечный кроссинговер. Перед началом его работы, выбираются две особи P_1, P_2 из популяции P , и случайным образом определяется точка разрыва в их хромосомах. Затем хромосомы обмениваются правыми частями, в результате чего получаются новые возможные решения оптимизационной задачи:

$$P_1 = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}, P_2 = \{z_1, z_2, z_3, \dots, z_n\},$$

$$P_{1,2}^1 = \{x_1, x_2, z_3, \dots, z_n\}, P_{1,2}^2 = \{z_1, z_2, x_3, \dots, x_n\}.$$

Рассмотренный выше оператор скрещивания не является единственным. Существует огромное число операторов кроссинговера, так как их структура в основном и определяет эффективность генетических алгоритмов. Среди наиболее известных операторов скрещивания можно отметить следующие: двухточечный оператор кроссинговера [1], циклический оператор кроссинговера [1], упорядоченный оператор кроссинговера [1], триадный кроссинговер [9], перетасовочный кроссинговер [9] и др.

Следующим, наиболее часто применяемым генетическим оператором является оператор мутации. Оператор мутации необходим для «выбивания» популяции из локального экстремума и способствует защите от преж-

девременной сходимости. Простейший оператор мутации меняет местами два случайно выбранных в хромосоме гена:

$$P_3 = \{x_1, x_2, x_3, x_4\},$$

$$Pm_3 = \{x_1, x_2, x_4, x_3\}.$$

Так же существуют и другие операторы мутации, например двухточечный оператор мутации [1].

Рассмотренные выше генетические операторы являются основными, но не единственными. К часто используемым генетическим операторам можно отнести: оператор инверсии [1], оператор транслокации [1], оператор транспозиции [1], оператор сегрегации [1] и многие другие. В настоящее время продолжают появляться новые генетические операторы.

В целом можно утверждать, что в каждом конкретном случае нужно внимательно подходить к выбору генетических операторов, используемых в ГА, так как это во многом влияет на качество и скорость получения конечного результата.

Как уже отмечалось выше, работа генетического алгоритма представляет собой повторяющийся процесс. Простейший (классический) алгоритм ГА [3] представлен на рис. 1.

В классическом ГА обычно используются два генетических оператора: кроссинговер и мутация. На первом этапе случайным образом создается популяция особей (возможных решений). Даже если все исходные особи будут иметь низкую приспособленность, в результате работы ГА должны появиться хромосомы, кодирующие более точные решения оптимизационной задачи.

Обычно для кодирования решений используется бинарный алфавит. При этом принято использовать специальный прием кодирования оптимизируемого параметра, принимающего действительные значения в некотором диапазоне $[a_i, b_i]$, в битовую строку. Интервал допустимых значений оптимизируемого параметра разбивают на участки с требуемой точностью. Для преобразования целочисленного значения хромосомы g_i из множества $\{0, \dots, 2^K\}$ в вещественное число r_i из интервала пользуются формулой:

$$r_i = g_i \cdot \frac{(b_i - a_i)}{2^K - 1} + a_i.$$

Чаще всего используется $K = 8; 16$.



Рисунок 1 – Основные этапы классического ГА

Бинарное кодирование обеспечивает лучший поиск с помощью гиперплоскостей, так как предоставляет максимальное их количество, при этом для встречаемости каждого символа в каждой позиции требуется меньший размер популяции. Следует отметить, что довольно часто ГА будет работать лучше при кодировании параметров кодом Грэя [10], а не прямым бинарным кодом. Это связано с тем, что расстояние Хэмминга [10] между битовыми представлениями данных может и не отражать близость в привычном смысле – например, числа 7 и 8 различаются на 4 бита. Бинарное кодирование добавляет дополнительные разрывы, что осложняет поиск.

Однако в некоторых случаях более целесообразно применять вещественное кодирование (например, для 100 переменных, изменяющихся в интервале $[-500; 500]$, требуется найти минимум с точностью до шестого знака после запятой). В этом случае при использовании ГА с двоичным кодированием длина строки составит 3000 элементов, а пространство поиска – около 10 в степени 1000).

Начальный размер популяции так же может влиять на работу ГА. Большие и обладающие достаточным разнообразием представленных решений популяции дают генетическому алгоритму больший шанс скорее найти нужное решение, но вместе с тем требуют и больших вычислительных ресурсов при работе. В статье [11] подробно рассмотрен вопрос выбора размера начальной популяции, необходимой для стабильной работы ГА.

В рассматриваемом классическом ГА используется оператор кроссинговера. Существуют различные подходы к выбору особей для скрещивания. Простейший из них, когда родительские особи выбираются случайно (панмиксия). Однако обычно вероятность скрещивания лучших хромосом с худшими уменьшается на последних итерациях алгоритма. Это приводит к скрещиванию лучших хромосом между собой и закреплению желаемых признаков в хромосомах.

Часто используются и другие методы выбора пар хромосом для оператора кроссинговера. Например «близкое родство» (инбридинг), когда первая хромосома выбирается случайным образом, а вторая хромосома с большей вероятностью будет кодировать близкое решение. Так же к методам выбора особей для скрещивания можно отнести аутбридинг [9], выбор на основе кода Грэя [9] и другие.

Одним из важнейших этапов ГА является этап отбора. На данном этапе выбираются особи, над которым будут выполняться различные генетические операторы: скрещивание, мутация и т.д. Именно эти особи будут оказывать влияние на следующие поколения. В настоящее время известны различные стратегии отбора. Например, ранговый отбор, когда для каждой особи ее вероятность быть отобранный пропорциональна ее порядковому номеру в отсортированной по возрастанию приспособленности популяции. Довольно часто так же применяются турнирный отбор [9], элитный отбор [1], отбор на основе заданной шкалы [1] и др.

Рассмотренный выше классический ГА не является единственным. Существуют и другие модели ГА: Genitor [7], Hybrid algorithm [7], CHC [7] и т.д. В каждом конкретном случае нужно детально анализировать исходные

данные, перед выбором конкретной модели ГА. Иногда поисковые генетические алгоритмы используют совместно с классическими методами оптимизации. В таких случаях ГА позволяет приблизиться к искомым значениям, а классические методы оптимизации (метод градиентного спуска, метод покоординатного спуска и т.д.), в свою очередь, позволяют более точно их определить.

В последнее время с развитием технологий параллельных вычислений, стали появляться и широко использоваться параллельные генетические алгоритмы [1, 12]. ПГА позволяют гораздо эффективней использовать мощности современных вычислительных систем. Параллельные генетические алгоритмы условно делятся на два больших класса: «островов» и «мастер-рабочий» [12].

При использовании схемы «островов» происходит параллельное развитие нескольких независимых популяций. Через некоторое число поколений производится обмен лучшими особями. Корректная реализация генетического алгоритма класса «островов» является довольно сложной нетривиальной задачей.

В схеме «мастер-рабочий» расчет функции приспособленности каждой особи происходит параллельно, при этом реализуется один цикл развития популяций. Особенно выгодно использовать данную схему, если оценка особей вычисляется по сложным формулам.

Обычно эффективность работы различных моделей ГА принято оценивать количеством вычислений целевой функции [13]. Чем меньше потребовалось вычислений целевой функции, при поиске оптимума, тем лучше реализован ГА. Тестовые функции, на которых можно экспериментально оценить конкретную реализацию ГА, должны учитывать сильные стороны генетического алгоритма, то есть быть многоэкстремальными и многомерными. В качестве тестовых функций очень часто используют функции, предложенные одним из студентов Холланда Де Йонгом [9] (в литературе их очень часто называют dejong1, dejong2, dejong3, dejong4).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В настоящее время существует огромное количество различных моделей и модификаций генетического алгоритма. Сравнить экспериментально, на тестовых функциях, все их сильные и слабые стороны между собой, не представляется возможным в рамках одной статьи. Поэтому, было решено в разделе эксперименты рассмотреть положительный опыт реального применения ГА для оптимизации многоэкстремальной функции в методе BORF [14], а так же нетривиальную модификацию генетического алгоритма для вычислений с использованием графических процессоров.

Метод BORF относится к классу методов трассерной визуализации PIV [15], которые позволяют экспериментально определять поля скоростей в различных потоках жидкости и газа. Данный метод пытается строить синтетическое реконструированное изображение, имеющее минимальные отличия от цифрового изображения течения, полученного естественным путем. Мерой отличия служит функция ошибки E (принцип ее вычисления детально описан в работе [14]). Функция ошибки E может иметь большое число локальных минимумов. В таком случае, использование классических методов оп-

тимизации (таких как, например, метод градиентного спуска) может привести к тому, что мы обнаружим локальный, а не глобальный экстремум. Так же функция ошибки зависит от большего числа переменных (в некоторых экспериментах число параметров функции E достигало 9000). Поэтому, одним из способов поиска минимума функции отличия, применяемого в методе BORF, является использование генетических алгоритмов. Чтобы оценить целесообразность использования ГА проводился ряд опытов на тестовом течении, с резкими градиентами скорости, описываемом следующим образом:

$$V_x = A \tanh\left(\frac{y-100}{10}\right) + \frac{y}{450}, V_y = 0, V_z = 0. \quad (2)$$

Для расчета профиля скорости тестового течения методом трассерной визуализации в методе BORF поочереди использовались метод градиентного спуска и ГА.

Довольно часто использование ГА сопряжено с большими временными затратами, особенно в тех случаях, когда расчет целевой функции требует больших вычислительных нагрузок. В этом случае грамотное применение параллельных вычислений может значительно увеличить скорость счета. В работе [13] автор провел эксперимент, где сравнил время работы классического ГА и ПГА работающего по схеме «мастер-рабочий». Генетический поиск использовался для оптимизации функции отличия в методе BORF. При этом ПГА работал на графических процессорах и использовал для этого технологию Cuda. Основным преимуществом использования графических адаптеров для параллельных вычислений является то, что аналогичные по производительности кластеры либо многоядерные процессоры имеют в сотни раз большую стоимость. Для того, чтобы проанализировать эффективность работы ПГА на графических процессорах, сравнивалось время работы генетического поиска в методе BORF с использованием параллельных технологий и без использования.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2. представлены теоретический профиль течения (2), а так же профили скорости, полученные методом BORF с использованием либо ГА с бинарным кодированием решений, либо метода градиентного спуска.

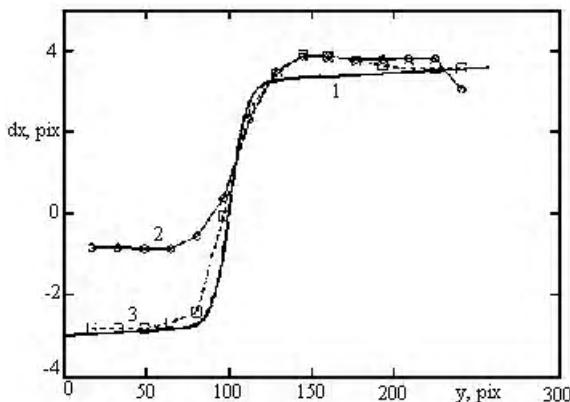


Рисунок 2 – Профили скорости исследуемого течения:
 1 – теоретический профиль; 2 – профиль скорости, построенный на основе данных, полученных методом BORF с использованием метода градиентного спуска; 3 – профиль скорости, построенный на основе данных, полученных методом BORF с использованием генетических алгоритмов

Как видно из рис. 2, использование метода градиентного спуска в методе BORF дает менее точные результаты, чем аппарат генетических алгоритмов. Это можно объяснить тем, что функция E имеет большое количество локальных минимумов, и метод градиентного спуска обнаруживает один из таковых и останавливает свою работу.

На рис. 3 представлен график зависимости времени работы различных версий ГА от числа поколений (число особей в каждом поколении – 100).

Из графика (рис. 3) видно, что использование технологии CUDA при поиске минимума функции отличия генетическим алгоритмом позволяет на порядки снизить время счета. При этом, следует отметить, что с увеличением числа поколений время ГА, использующего параллельные вычисления, растет заметно медленнее, чем время счета генетического алгоритма, не использующего параллельные вычисления.

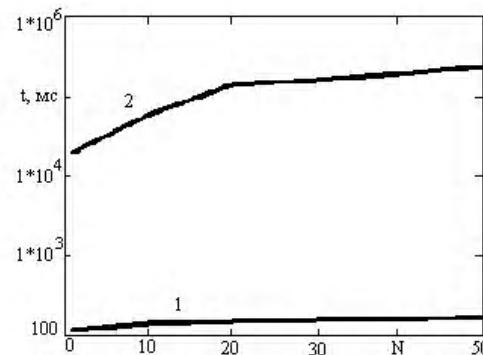


Рисунок 3 – Зависимость времени работы t от числа поколений N ГА в задаче поиска минимума функции отличия: 1 – с использованием параллельных вычислений на графическом адаптере; 2 – без использования параллельных вычислений

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время ГА нашли очень широкое практическое применение абсолютно в разных отраслях науки. Генетические алгоритмы сейчас успешно используется при решении следующих проблем: оптимизация функций, разнообразные задачи на графах (задача коммивояжера, раскраска и т. д.), настройка и обучение искусственной нейронной сети, задачи компоновки, задачи составления расписаний, аппроксимация функций, некоторые задачи в области биоинформатики.

Однако, не следует использовать ГА в случае, когда необходимо найти точный глобальный оптимум. ГА не гарантирует обнаружения глобального решения за приемлемое время. ГА не гарантируют и того, что найденное решение будет оптимальным решением. Тем не менее, генетические алгоритмы применимы для поиска «достаточно хорошего» решения задачи за «достаточно короткое время».

ВЫВОДЫ

В работе проанализированы основные принципы функционирования поисковых генетических алгоритмов, представлены наиболее важные генетические операторы, модели и стратегии, применяемые в ГА. Так же рассмотрен положительный опыт практического применения ГА для оптимизации многоэкстремальных функций.

Новизна выполненного обзорного исследования состоит в комплексном подходе к анализу эффективности решения многопараметрических оптимизационных задач с использованием генетических алгоритмов, который включает характеристику операторов, моделей, методов и стратегий, используемых в ГА. Впервые показано, что классический генетический алгоритм с бинарным кодированием допускает эффективную компьютерную реализацию, учитывающую особенности архитектуры графических процессоров при их использовании в высокопроизводительных параллельных вычислениях.

Практическая значимость результатов работы заключается в систематизации, которая позволяет оценивать эффективность применения генетических алгоритмов при решении конкретных прикладных задач. Определен также доступный и экономичный способ значительного повышения производительности расчетов с использованием генетических алгоритмов на основе программно-аппаратной технологии CUDA, обеспечивающей реализацию параллельных вычислений на графических процессорах.

Одним из перспективных направлений дальнейших исследований являются распределенные генетические алгоритмы, способные эффективно выполняться параллельно на вычислительных устройствах различной архитектуры.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках научно-исследовательской темы кафедры информационных технологий Киевской академии водного транспорта «Моделирование сложных объектов и процессов».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Гладков Л. А. Генетические алгоритмы / Л. А. Гладков, В. В. Курейчик, В. М. Курейчик. – М. : ФИЗМАТЛІТ, 2006. – 320 с.
- Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.

- Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence / J. H. Holland. – Cambridge : A Bradford Book, 1992. – 211 p.
- Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning / D. Goldberg. – Boston : Addison-Wesley Professional, 1989. – 432 p.
- Скобцов Ю. А. Основы эволюционных вычислений / Ю. А. Скобцов. – Донецк : ДонНТУ, 2008. – 326 с.
- Soft computing: new trends and application / [L. Fortuna, G. Rizzotto, M. Lavorgna, G. Nunnari and other]. – Heidelberg : Springer, 2001. – 267 p.
- Whitley D. A genetic algorithm tutorial / D. Whitley // Statistics and Computing. – 1994. – Vol. 4. – P. 65–85. DOI: 10.1007/BF00175354.
- Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора / Ч. Дарвин. – Спб. : Наука, 2001. – 568 с.
- Панченко Т. В. Генетические алгоритмы / Т. В. Панченко. – Астрахань : Астраханский университет, 2007. – 87 с.
- Хэмминг Р. В. Теория кодирования и теория информации / Р. В. Хэмминг. – М. : Радио и связь, 1983. – 176 с.
- Выбор размера популяции для генетического алгоритма [Электронный документ]. – Режим доступа: <http://habrahabr.ru/post/114910/>. – 25.12.2014 г. – Загл. с экрана.
- Иванов Д. Е. Масштабируемый параллельный генетический алгоритм построения идентифицирующих последовательностей для современных многоядерных вычислительных систем / Д. Е. Иванов // Управляющие системы и машины. – Киев, 2011. – № 1. – С. 25–32.
- Мочалин А. Е. Использование параллельных генетических алгоритмов в методе обработки трассерных изображений BORF / А. Е. Мочалин // Вісник черкаського університету. – Черкаси, 2013. – № 38(291). – С. 58–64.
- Мочалин А. Е. Информационная технология обработки цифровых трассерных изображений на основе построения реконструированного кадра: дис. канд. техн. наук. 05.13.06. – Алчевск, 2013. – 177 с.
- Adrian R. J. Twenty years of particle image velocimetry / R. J. Adrian // Exp. in Fluids. – 2005. – Vol. 39, No. 2. – P. 159–169. DOI: 10.1007/s00348-005-0991-7.

Статья поступила в редакцию 13.01.2015.

После доработки 23.02.2015.

Мочалин О. Є.

Канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій Київської державної академії водного транспорту, Київ, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ БАГАТОЕКСТРЕМАЛЬНИХ ФУНКІЙ ВЕЛОКОЇ КІЛЬКОСТІ ПАРАМЕТРІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНИХ АЛГОРИТМІВ

Формально сформульована задача оптимізації. Розглянуті основні переваги і недоліки класичних методів оптимізації. Висвітлені основні передумови появи та історія розвитку апарату генетичних алгоритмів. Проаналізовано сучасний стан бібліографії, присвяченої питанням використання пошукових генетичних алгоритмів. Розглянуто основні ідеї та принципи, що лежать в основі роботи генетичних алгоритмів. Виконано огляд найбільш поширеніх генетичних операторів: кросинговеру і мутації. Детально проаналізовані базові етапи роботи класичного генетичного алгоритму. Розглянуті основні способи кодування рішень в хромосомах, вибору пар особин для схрещування, а так само представлені деякі поширені стратегії відбору. Сформульовані основні переваги бінарного кодування рішень в хромосомах із застосуванням коду Грэя, а так само дані рекомендації з використання дійсного кодування рішень в різних ситуаціях. Описані два основних класи паралельних генетичних алгоритмів: «островів» і «майстер-робітник». Наведено приклад використання генетичного алгоритму для оптимізації багатоекстремальної функції, що залежить від великої кількості параметрів. Представлені експериментальні дані, що підтверджують переваги використання графічних процесорів для обчислення в паралельних генетичних алгоритмах. Викладені рекомендації щодо доцільності застосування генетичних алгоритмів у різних ситуаціях.

Ключові слова: оптимізація, генетичний алгоритм, м'які обчислення, генетичні оператори, кодування рішень.

Mochalin O. Ye.

PhD, Associate professor of department of information technology, Kyiv State Maritime Academy named after hetman Petro Konashevich-Sahaydachniy, Kyiv, Ukraine

GENETIC ALGORITHMS IN OPTIMIZATION OF MULTIEXTREMUM FUNCTIONS WITH LARGE PARAMETERS NUMBER

An optimization problem is formally formulated. The main advantages and disadvantages of classical optimization methods are considered for this problem. Basic prerequisites for the emergence and history development of the instrument of genetic algorithms are highlighted. The current state of the bibliography which is dedicated to the use of search genetic algorithms is analyzed. The basic ideas and underlying principles

of genetic algorithms functioning are considered. A review of the most commonly used genetic operators: crossover and mutation, is made. The basic steps of classical genetic algorithm operation are analyzed in detail. The coding problem of solutions in the chromosomes and the selection of individual pairs for crossbreeding are considered. Some common selection strategies are presented as well. The basic benefits of the binary coding of solutions in the chromosomes that using Gray code are formulated. The recommendations are also given on the using of solutions real coding in different situations. The two main classes of parallel genetic algorithms: «islands» and «master – slave», are described. The example of using a genetic algorithm to optimize multiextremal function depending on a large number of parameters is showed. Experimental data are presented which confirm the benefits of graphic processors using in parallel implementation of genetic algorithm. The expediency recommendations of the use of genetic algorithms in different situations are set out.

Keywords: optimization, genetic algorithm, Soft Computing, genetic operators, coding of solutions.

REFERENCES

1. Gladkov L. A., Kurejchik V. V., Kurejchik V. M. Geneticheskie algoritmy. Moscow, FIZMATLIT, 2006, 320 p.
2. Kalitkin N. N. Chislennye metody. Moscow, Nauka, 1978, 512 p.
3. Holland J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems: An Introductory Analysis With Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence. Cambridge, A Bradford Book, 1992, 211 p.
4. Goldberg D. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Boston, Addison-Wesley Professional, 1989, 432 p.
5. Skobcov Ju. A. Osnovy jevoljucionnyh vychislenij. Doneck: DonNTU, 2008, 326 p.
6. Fortuna L., Rizzotto G., Lavorgna M., Nunnari G., Xibilia M. G., Caponetto R. Soft computing: new trends and application. Heidelberg, Springer, 2001, 267 p.
7. Whitley D. A genetic algorithm tutorial, *Statistics and Computing*, 1994, Vol. 4, pp. 65–85. DOI: 10.1007/BF00175354.
8. Darvin Ch. Proishozhdenie vidov putem estestvennogo otbora. Sankt-Peterburg, Nauka, 2001, 568 p.
9. Panchenko T. V. Geneticheskie algoritmy. Astrahan' universitet, 2007, 87 p.
10. Hjemming R. V. Teorija kodirovanija i teorija informacii. Moscow, Radio i svjaz', 1983, 176 p.
11. Vybor razmera populjaciij dlja geneticheskogo algoritma [Jelektronnyj dokument]. Rezhim dostupa: <http://habrhabr.ru/post/114910/>. 25.12.2014 g. Zagl. s jekrana.
12. Ivanov D. E. Masshtabiruemij parallel'nyj geneticheskij algoritm postroenija identificirujushhih posledovatel'nostej dlja sovremennych mnogojadernyh vychislitel'nyh sistem, *Upravljajushchie sistemy i mashiny*. Kiev, 2011, No. 1, pp. 25–32.
13. Mochalin A. E. Ispol'zovanie parallel'nyh geneticheskikh algoritmov v metode obrabotke trassernyh izobrazhenij BORF, *Visnik cherkas 'kogo universitetu*. Cherkasi, 2013, No. 38(291), pp. 58–64.
14. Mochalin A. E. Informacionnaja tehnologija obrabotki cifrovyh trassernyh izobrazhenij na osnove postroenija rekonstruirovannogo kadra: dis. kand. tehn. nauk. 05.13.06. Alchevsk, 2013, 177 p.
15. Adrian R. J. Twenty years of particle image velocimetry, *Exp. in Fluids*, 2005, Vol. 39, No. 2, pp. 159–169. DOI: 10.1007/s00348-005-0991-7.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

UDC 004.93

Amanatidis Dimitrios¹, Dossis Michael², Androulidakis Iosif³

¹PhD, Adjunct Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Technological Educational Institute of Western Macedonia, Kastoria, Greece

²PhD, Associate Professor, Department of Computer Engineering, Technological Educational Institute of Western Macedonia, Kastoria, Greece

³PhD, Network Operation Centre, University of Ioannina, Ioannina, Greece

IMAGE CONTOUR SEGMENTATION IN HARDWARE

The use of Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation method is considered. The segmentation method chosen, is a well-known, state-of-the-art, robust, efficient and fast-converging one, that combines functionals depending on the curve geometry and image properties in a level-set framework. The cost function sought to be minimized, is formulated as a weighted sum of three integral measures; a robust alignment term that leads the evolving surface to the edges of the desired object, a minimal variance term that measures the homogeneity inside and outside the object, and a geodesic active surface term that is used mainly for regularization. The algorithm is initially implemented in MatLab and ADA and subsequently, it is ported to our Behavioural Synthesis tool, the CCC HLS framework, which is capable of delivering correct-by-construction RTL VHDL implementations of computation-intensive applications. This way, behavioural ADA specifications are transformed into RTL micro-architectures which then can be easily implemented by commercial RTL synthesizers.

Keywords: Image Contour Segmentation, High Level Synthesis, Custom Coprocessors Compilation, FPGA Implementation.

NOMENCLATURE

CCC Custom Coprocessors Compilation;
HLS High Level Synthesis;
RTL Register Transfer Level;
ITF Intermediate Tables Format;
PARCS Parallel Abstract Resource – Constrained Scheduling.

INTRODUCTION

Lately, there has been a substantial progress in partial differential equations and variational approaches in various colour image processing tasks. Among the associated computer vision application, one may typically find on one hand; applications aiming to remodel (in the PDE/Variational framework) more traditional tasks or on the other hand some emerging applications [1]:

– Image restoration, which is historically considered to be one of the oldest aims. Moreover, improving the quality of the image is quite frequently, one of the first, necessary preprocessing steps taken.

– Image segmentation, one of the most important steps in image analysis, with its own well established theoretical objectives and methodologies.

– Image and video inpainting, used for restoration of photograph cracks or errors due to image transmission and image compression and coding applications.

– Image decomposition, into a sum of a geometric part and an oscillating patterns (texture) part, used mainly in image compression.

– Image classification, where variational models are introduced in the place of more well-studied approaches such as region growing and stochastic (mainly Markov Random Field) based ones.

Accurate segmentation of various types of imagery, is a well-studied, non-trivial, image and application dependent task, which is however an essential step towards higher level image understanding. It combines the early vision pre-processing stages where salient features are highlighted while others suppressed, and allows us to move to a more effective scene analysis stage. Applications of image segmentation can be found in a broad range of disciplines; from medical diagnostic applications and inspection of manufactured products to military, security and automotive industry applications; traffic control systems and video surveillance to face, fingerprint and iris recognition to name a few.

Generally speaking, image segmentation techniques can be either region-based or edge-based, which take into consideration the basic concepts of similarity and discontinuity respectively. In many cases, segmentation is formulated as an optimization problem where a set of unknown parameters have to be estimated. With the level-set approach the problem is posed as that of tracking a moving interface. Curve and surface evolution can be computed without having to parameterize the objects (Eulerian rather than Lagrangian approach) which can undergo complex topological deformations such as merging, splitting and developing holes.

The aim of this work is to present the implementation of a computationally demanding, image contour segmentation algorithm in hardware. In essence, the algorithm has to be discretized so that it can be efficiently ported to our CCC HLS framework and thereby serve as a paradigm for future implementations. Section I gives a brief problem statement.

Section II reviews related work. Section III outlines the theory of geometric active contours and Section IV presents the experimental results. Section V stresses the relation of verification and synthesis flows for our experiments and the last section discusses and concludes our work.

1 PROBLEM STATEMENT

The method's input data as discussed also in later sections are: the grayscale image I , the initial contour Φ_{initial} , the three weighting coefficients (w_1, w_2, w_3) for the respective contributing terms in the optimization scheme, the time step τ , and the loop termination criteria; δ for convergence and $iter$ for the maximum number of iterations. The method's output is the final contour, Φ_{final} .

2 LITERATURE REVIEW

The desired properties of a good image segmentation method, as defined in [2], are that it produces homogeneous, in a sense, regions, with a simple hole-less interior, clearly distinct from their adjacent regions, having accurate and simple borders. There are mainly two broad segmentation strategies which can be seen as being one the «dual» of the other: The first one mainly exploits the notion of homogeneity in regions, separated by sharp boundaries, to identify meaningful objects. A well-known representative method of the first approach is the seminal work by Mumford and Shah [3]. In this paper, we concentrate on the second approach which aims to segment an image by detecting the contours of the different image objects. This is actually an edge detection method, with the main principle of matching deformable curves to the contour objects by means of a suitable energy functional minimization. As examined below, various improvements have been suggested over the years to the original model leading to geodesic active contours and the level sets method.

Usually, edge detection requires differentiation to detect gray-level changes and smoothing, for noise reduction of the image. The most common method of (first-order) differentiation is the gradient, while on the other hand, smoothing typically involves filtering with a 2D Gaussian.

Quite frequently, the combined smoothing and differentiation of the image is implemented by filtering the image with the differentiated smoothing filter, as in [4] for example, where edges are defined as the zero crossing curves of the Laplacian of Gaussian (LoG) applied to the image.

Active contour models, (or deformable models) which are defined as energy-minimizing splines, with energy local minima corresponding to the desired image characteristics, started with the classical snakes [5], followed by non-variational geometric active contours [6–7] and geodesic active contours [8].

3 GEOMETRIC ACTIVE CONTOURS

In two dimensions, a simple curve defines the object boundaries. A given initial curve can evolve according to its geometry and the information in the image. The evolution is a result of minimizing an energy functional – a cost function – which is influenced by image information along the curve and the intrinsic geometry of the curve. Minimization of such a measure leads to a curve that should coincide with the boundary of the object. The first variation of the functional is used to evolve a given curve toward a significant local minimum of the functional, by applying a gradient descent flow.

A more recent method [9], examined geometric functionals that do not depend on the internal parameterization of the curve, but rather on its geometry and the image properties (geometric active contours). A weighted sum of three integral measures is used, a robust alignment term that leads the evolving surface to the edges of the desired object, a minimal variance term that measures the homogeneity inside and outside the object, and a geodesic active surface term that is used mainly for regularization. The method has also been used for segmentation of thin structures in volumetric medical images [10], where the respective weights were modified for different types of images (brain CTA, lung CT, MRI etc.).

The first functional considered is the Robust Alignment Term:

$$E_{AR}(C) = \int_0^L \left| \langle \nabla I(x(s), y(s)) n(s) \rangle \right| ds, \quad (1)$$

where the inner product gets high values if the curve normal n aligns with the image gradient direction, therefore we seek to maximize it.

The second functional is based on the Robust Minimal Variance criterion (proposed in [11]) which is given by:

$$E_{RMV}(C) = \iint_{\Omega_C} |I(x, y) - c_1|^2 dx dy + \iint_{\Omega \setminus \Omega_C} |I(x, y) - c_2|^2 dx dy, \quad (2)$$

where c_1 and c_2 are the mean intensities inside and outside the contour respectively and in the optimal case we look for the best separating contour. The term is of high importance in noisy images.

Finally, the Geodesic Active Contour functional which is sought to be minimized (as it is an inverse edge indicator) is given by:

$$E_{GAC}(C) = \int_0^L g(C(s)) ds. \quad (3)$$

This regularization term can be particularly useful in order to control the other two contributing terms (robust alignment and minimal variance).

Now, computing the first variations for each of the previous functionals, the optimization problem is posed as:

$$\operatorname{argmax}_{C, c_1, c_2} E(C, c_1, c_2), \quad (4)$$

where the combined functional is given below and α, β are positive weighting constants, chosen empirically depending

on the image, with α usually much smaller than β . A suggested rule of thumb for determining the best coefficients is that, when the image has a large amount of noise, β should be large, else it should be small. Moreover, when the variance of gray scales inside the object is large, should be small:

$$E(C, c_1, c_2) = E_{\text{AR}}(C, c_1, c_2) - \alpha E_{\text{GAC}}(C) - \beta E_{\text{MV}}(C), \quad (5)$$

which has the following Osher-Sethian [12] level-set formulation:

$$\varphi_t = \begin{cases} \text{sign}(\langle \nabla \varphi, \nabla I \rangle) \Delta I + \alpha \text{div}(g(x, y) \frac{\nabla \varphi}{|\nabla \varphi|}) \\ \beta(c_2 - c_1)(I - \frac{c_1 + c_2}{2}) \end{cases} |\nabla \varphi|. \quad (6)$$

The above formulation is shown in [9] to be solved numerically using a locally one-dimensional, fully implicit scheme:

$$\varphi^{n+1} = \prod_{k=1}^2 (\mathbf{I} - \tau \alpha A_k)^{-1} (\varphi^n + \tau \eta(\varphi^n, \nabla I)), \quad (7)$$

where \mathbf{I} is the identity matrix and the elements of the operators A_1 and A_2 are (η is the distance between neighbouring pixels):

$$a_{ij} = \begin{cases} \frac{g_i + g_j}{2h^2}, & \text{if } j \in N(i); \\ -\sum_{k \in N(i)} \frac{g_i + g_j}{2h^2}, & \text{if } j = i; \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (8)$$

and the function η is:

$$\eta(\varphi, \nabla I) = \text{sign}(\langle \nabla \varphi, \nabla I \rangle) \Delta I + \beta(c_2 - c_1) \left(I - \frac{c_1 + c_2}{2} \right). \quad (9)$$

4 EXPERIMENTS

In this work, we expand on results that were reported earlier in [13]. This contour-based method, has been shown to be quite accurate and fast converging, in fact in all of the images that we have experimented with, a total number of 10 iterations is sufficient for convergence, i.e. increasing the number of iterations has no effect on the final segmented mask. Fig. 1 depicts the contours for each one of the first nine iterations, superimposed on the original image («mri»).

Specifically, in this section we present our experimental results and the qualitative comparison of the three implemented algorithms; the original MatLab version, a «flat» version of the original method in MatLab again and the GNU ADA «flat» version which is the input to our CCC HLS tools (Fig. 2).

In building up our framework towards an efficient hardware representation of the method, we re-implemented the algorithm in MatLab (constructing a «flat» version of the original method, i.e. with no function calls, for hardware implementation efficiency), using 32-bit wide integers only (to avoid overflowing), leaving all MatLab parallel constructs out (and merging loops where applicable),

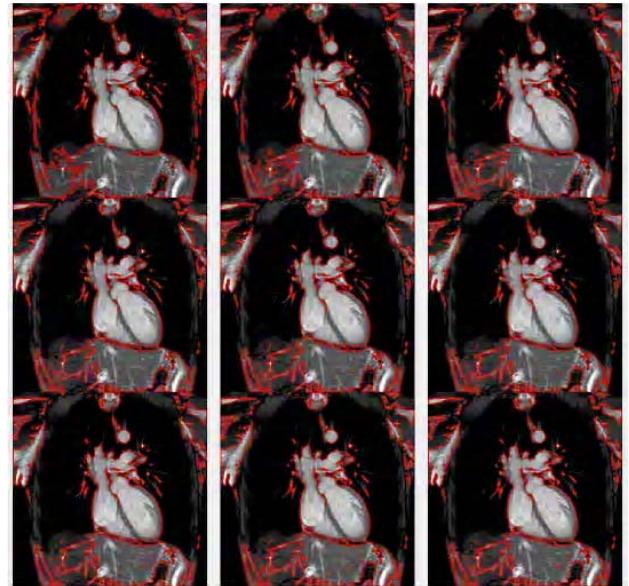


Figure 1 – Contours for the first nine iterations

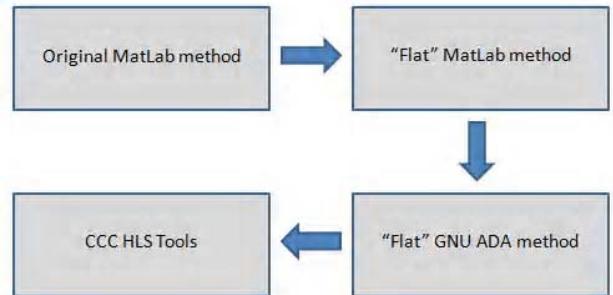


Figure 2 – The experimental framework

approximating square roots with the shifting n -th root algorithm and scaling ($\times 100$) some constants to avoid using any floats. Additionally, the time step τ was set to 1 rather than 0.5 and the well-studied example of $G(x, y)=1$ was used as the inverse edge indicator. This lead to a great amount of simplifications in computation, essential if the algorithm is to be implemented in hardware. The results were compared with the results obtained by the original method and were found of equivalent quality.

Fig. 3 depicts results for the «football» image with the original MatLab method. Simpler case images, such as those with no noise, uniform background and no illumination have been considered as well (as in [13]) but the main sequence tested extensively has been «football», a rather challenging one. The final contour is superimposed on the input image frame and the originally suggested parameters were left intact:

- $w_1=0.01$ (weight for the geodesic active contour term);
- $w_2=4.0$ (weight for the alignment forces term);
- $w_3=5.0$ (weight for the minimal variance term);
- $\tau = 0.5$ (the time step);
- $iter=30$ (maximum number of iterations);
- $delta=0.0001$ (the convergence criterion threshold).

A segmented mask can be constructed by means of the final contour array elements' signs image. Note that no optimization on the contributing terms' weights has been exercised in this example.



Figure 3 – Original MatLab method results

Fig. 4 displays the results with the «flat» version of the original method in MatLab with the final contour appearing in red and parameter values set to: $w1=1$, $w2=400$, $w3=500$, $\tau=1$, $iter=10$ and $delta=1$.

The method reads the required grayscale or binary images (initial contour and input images) and any required weights and constants. Images are read and written in *.ppm* format (portable pixel maps), which makes colour image processing also feasible. An outline of the algorithm steps is following:

- read input image (I) and initial contour (φ) arrays;
- initialize some essential parameters, namely the three functional weights and the maximum number of iterations and the convergence threshold which are used as possible termination criteria;
- pre-compute first and second order derivative arrays;
- start the main while loop which tests for either convergence (using the L_2 norm) or exceeding the maximum number of iterations – on each loop iteration do:
 - a) set the previous contour to be the current contour;
 - b) compute the minimal variance term (Fig. 5);
 - c) compute the robust alignment term using the derivative images (Fig. 6);
 - d) compute the new contour array by combining the three functional terms (Fig. 6);
 - e) implement the main numerical formulation scheme (previous implicit function) which utilizes Thomas algorithm (simplified significantly with the previous assumptions) for inverting the tri-diagonal operators $A1$ and $A2$;
 - f) set φ as a distance map of its zero set (previous redistance function) and compute the new contour array using fast-marching (previous update function);
 - g) check for convergence and increment iteration counter;
 - end the main while loop.

Subsequently, the algorithm was implemented in GNU ADA and a comparison of the results showed equivalence in quality once more (Fig. 6). At this stage, we had to deal with some additional incompatibilities with respect to integer arithmetic, as MatLab rounds towards positive and negative infinities, whereas GNU ADA (GNAT Programming Studio) truncates towards zero.



Figure 4 – «Flat» method MatLab results

```
--and compute Threshold (LLoydMax)

for i in 1..HEIGHT loop
    for j in 1..WIDTH loop
        oldCout(i)(j) := Cout(i)(j);
        temp1 := Cout(i)(j);
        if temp1 < 0 then A1(i)(j) := 1;      --create A1 := mask_in
        else A1(i)(j) := 0;
        end if;
        A2(i)(j) := 1 - A1(i)(j);           --create A2 := mask_out
    end loop;
end loop;
temp1 := 0;                                --to create mask_in (A1) sum
temp2 := 0;                                --to create mask_out (A2) sum
temp3 := 0;                                --to create mask_in*I sum
temp4 := 0;                                --to create mask_out*I sum
for i in 1..HEIGHT loop
    for j in 1..WIDTH loop
        temp1 := temp1 + A1(i)(j);
        temp2 := temp2 + A2(i)(j);
        temp := A1(i)(j) * Iin(i)(j);
        temp3 := temp3 + temp;
        temp := A2(i)(j) * Iin(i)(j);
        temp4 := temp4 + temp;
    end loop;
end loop;
temp1 := temp3 / temp1;                      --this is I_in
temp2 := temp4 / temp2;                      --this is I_out
temp3 := (temp1 + temp2) / 2;                --this is c1
temp4 := temp2 - temp1;                      --this is c2
for i in 1..HEIGHT loop
    for j in 1..WIDTH loop
        temp1 := Iin(i)(j) - temp3;
        Threshold(i)(j) := temp4 * temp1;   --force:=temp4.* (I-temp3)
    end loop;
end loop;
```

Figure 5 – Computing minimal variance term

5 RESULTS

As stated, the designs were verified rapidly at the MatLab and compiled ADA code level. Moreover, RTL-level simulations were executed to prove the argument of the correctness at the level of the automatically generated RTL VHDL implementations, by the CCC behavioural synthesis tools. Thus, we ported the code to our tool, the CCC HLS framework in order to deliver correct-by-construction, Register Transfer Level (RTL), VHDL implementations of this computation-intensive application. The CCC framework consists of the frontend and the backend compiler, which communicate with each other via the ITF database.

The frontend compiler was built using compiler-compiler techniques and the backend compiler using logic

```

-- end loop;
temp := CoutT(WIDTH) (j) -- CoutT(W_1) (j);
T2(j) (WIDTH) := temp / 2;
end loop;

--compute Alignment (Laplacian term)
--use computed P,Q,D2I here

for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp1 := P(i) (j) * T1(i) (j);
    temp2 := Q(i) (j) * T2(i) (j);
    temp3 := temp1 + temp2;
    if temp3 > 0 then A1(i) (j) := -1; else
      if temp3 < 0 then A1(i) (j) := 1; else
        A1(i) (j) := 0;
      end if;
    end if;
    Alignment(i) (j) := A1(i) (j) * D2I(i) (j);
  end loop;
end loop;

--compute new Phi (G and k are 1)

for i in 1..HEIGHT loop
  for j in 1..WIDTH loop
    temp2 := Align * Alignment(i) (j);
    temp3 := Max_Lloyd * Threshold(i) (j);
    temp4 := Balloon + temp2 + temp3 + Cout(i) (j);
    Cout(i) (j) := temp4;
  end loop;
end loop;

```

Figure 6 – Final mask for GNU ADA method

programming techniques [14]. Moreover the ITF syntax and semantics are formally defined in [15]. Both of these methodologies are already patented with international patents [16]. The CCC synthesis flow is programmer-friendly, rapid and formal, which guarantees the correctness of the generated RTL implementation. Moreover, there are a number of custom options that can be used to drive the CCC compiler with specific environmental and other parameters.

The backend synthesis is optimized with the PARCS scheduler. PARCS is a formal optimizer which attempts to parallelize as many operations in the same clock cycle as possible, as long as control/data dependencies and resource constraints are obeyed.

This framework leads to behavioural ADA specifications being transformed into RTL micro-architectures, which can subsequently be implemented easily by commercial RTL synthesizers. RTL-level simulations were carried out to verify rapidly our designs and prove for correctness at the level of the automatically generated RTL VHDL implementations. Detailed experimentation with different images, validates the robustness of the proposed framework.

In order to verify the correctness of the translation a commercial tool from Mentor Graphics, Modelsim, was used to create and execute the required testbench. Test vectors (initial contour and input images) were created and fed into the algorithm (Model Under Test or MUT) in both the MatLab and the ADA environment. The actual output was finally compared to the desired one (Golden Model) to indicate a pass or fail outcome automatically.

CONCLUSION

The benefits of the proposed framework are significant. The method that was considered can efficiently detect object contours by considering the weighted sum of three

functionals; robust alignment functional, motivated by the fact that in many cases the gradient direction is a good estimator of the contour orientation; minimal variance functional, which seeks the best interior-exterior separation based on mean intensity values; geodesic active contour functional, a regularization term for other dominant terms. The first variations of the three functionals are extracted, formulated in a level-set framework and solved numerically. Even though the whole process may seem quite complicated and demanding at first sight, its FPGA implementation proved feasible.

In our effort to port high level ADA coding to RTL hardware, the use of our CCC tools proved invaluable; behavioural synthesis was automatic, very fast and correct-by-construction. Future work in this area includes experimentation with other computer vision algorithms such as optical flow and graph cuts, various neural network structures, e.g. PCNN (Pulse-Coupled Neural Networks) and RBFN (Radial Basis Function Networks), or other machine learning algorithms.

REFERENCES

1. Aubert G. Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations / G. Aubert and P. Kornprobst // Applied Mathematical Sciences. – Springer Science and Business Media, LLC, 2nd ed. – Vol. 147.
2. Haralick R. Computer and Robot Vision / R. Haralick and L. Shapiro, Eds. – 1993, chapter 16, Addison-Wesley.
3. Mumford D. Boundary detection by minimizing functionals / D. Mumford, J. Shah // Proc. of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – San Francisco, CA, June 1985. – P. 22–26.
4. Marr D. Theory of edge detection / D. Marr, E. Hildreth // Proc of the Royal Society. – London B, 207. –1980. – P. 187–217.
5. Kass M. Snakes: Active contour models / M. Kass, A. Witkin, D. Terzopoulos // Int. Journal of Computer Vision. – 1988. – Vol. 1. – P. 321–331.
6. Malladi R. Shape modeling with front propagation: A level set approach // IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1995. – vol. 17. – P. 158 –175.
7. Caselles V. A geometric model for active contours in image processing / V. Caselles, F. Catte, T. Coll, F. Dibos // Numer. Math. – 1993. – Vol. 66. – P. 1–31.
8. Caselles V. On geodesic active contours / V. Caselles, R. Kimmel and G. Sapiro // Int. Journal of Computer Vision. – 1997. – Vol. 22, No. 1. – P. 61–79.
9. Kimmel R. Fast edge integration // Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics / R. Kimmel, S. Osher and N. Paragios, Eds. – New York : Springer-Verlag, 2003.
10. Segmentation of Thin Structures in Volumetric Medical Images / M. Holtzman-Gazit, R. Kimmel, N. Peled and D. Goldsher // IEEE Transactions On Image Processing. – 2006. –Vol. 15, No. 2.
11. Chan T. Active Contours Without Edges / T. Chan and L. Vese // IEEE Transactions on Image Processing. – 2001. – Vol. 10, No. 2. – P. 266–277.
12. Osher S. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations / S. Osher, J. A. Sethian // Journal of Computational Physics. – 1988. – Vol. 79 – P. 12–49.
13. Dossis M. Using Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation algorithm / M. Dossis, D. Amanatidis, I. Androulidakis // Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT). – Zilina, Slovakia, July 7–9, 2015.

14. Dossis M. A Formal Design Framework to Generate Coprocessors with Implementation Options / M. F. Dossis // International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS). – Science Academy Publisher, United Kingdom. – August 2011. – Vol. 2, No. 4. – P. 929–936. ISSN: 2079–2557, www.sciacademypublisher.com.
15. Dossis M. Intermediate Predicate Format for Design Automation Tools / M. Dossis // Journal of Next Generation Information Technology (JNIT). – May 2010. – Vol. 1, No. 1. – P. 100–117.
16. Dossis M. Patent № 1005308, 5/10/2006 / M. Dossis // By the Greek Industrial Property Organisation, 2006.

Article was submitted 09.08.2015.
After revision 16.05.2015.

Аманатідіс Дімітріос¹, Доссіс Михаїл², Андроулідакіс Йосип³

¹Доктор філософії, ад'юнкт, асистент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічної освіти Західної Македонії, Касторія, Греція

²Доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічної освіти Західної Македонії, Касторія, Греція

³Доктор філософії, Центр управління комп'ютерними мережами, Університет Яніни, Яніна, Греція

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КОНТУРНОЇ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Розглянуто використання поведінкового синтезу для створення апаратного забезпечення контурної сегментації зображень. В якості методу сегментації обраний добре відомий, надійний, ефективний метод, що швидко збігається, який комбінує функціонали, залежні від геометрії кривих і властивостей зображення у множині рівнів структури. Мінімізована функція витрат формулюється як зважена сума трьох інтегральних мір: стійкого вирівнювання (прагне розвинуті поверхню до країв бажаного об'єкта), мінімальної дисперсії (вимірює однорідність всередині і зовні об'єкта) і геодезично активної поверхні (використовується в основному для регуляризації). Алгоритм спочатку реалізований в Matlab і ADA, а потім, він перенесений у наш інструмент Поведінкового синтезу – середовище CCC HLS, яке здатне створювати правильно побудовані RTL VHDL реалізації додатків, що інтенсивно використовують обчислення. Таким чином, поведінкові характеристики ADA перетворюються у мікроархітектури RTL, які потім можуть бути легко реалізовані за допомогою комерційних RTL синтезаторів.

Ключові слова: контурна сегментація зображень, високорівневий синтез, збірка користувальницьких сопроцессорів, ПЛІС-реалізація.

Аманатидіс Димітритіос¹, Доссіс Михаїл², Андроулідакіс Йосип³

¹Доктор філософії, ад'юнкт, асистент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічного образования Западной Македонии, Кастория, Греция

²Доктор філософії, доцент кафедри комп'ютерної інженерії, Інститут технологічного образования Западной Македонии, Кастория, Греция

³Доктор філософії, Центр управління комп'ютерними мережами, Університет Яніни, Яніна, Греція

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КОНТУРНОЙ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрено использование поведенческого синтеза для создания аппаратного обеспечения контурной сегментации изображений. В качестве метода сегментации выбран хорошо известный, надежный, эффективный и быстро сходящийся метод, комбинирующий функционалы, зависящие от геометрии кривых и свойств изображения во множестве уровней структуры. Минимизируемая функция затрат формулируется как взвешенная сумма трех интегральных мер: устойчивого выравнивания (стремится развить поверхность к краям желаемого объекта), минимальной дисперсии (измеряет однородность внутри и снаружи объекта) и геодезически активной поверхности (используется в основном для регуляризации). Алгоритм изначально реализован в MatLab и ADA, а затем, он перенесен в наш инструмент Поведенческого синтеза – среду CCC HLS, которая способна создавать правильно построенные RTL VHDL реализации приложений, интенсивно использующих вычисления. Таким образом, поведенческие характеристики ADA преобразуются в мікроархітектури RTL, которые затем могут быть легко реализованы с помощью комерческих RTL синтезаторов.

Ключевые слова: контурная сегментация изображений, высокоровневый синтез, сборка пользовательских сопроцессоров, ПЛИС-реализация.

REFERENCES

1. Gilles Aubert and Pierre Kornprobst Mathematical Problems in Image Processing: Partial Differential Equations and the Calculus of Variations, *Applied Mathematical Sciences*. Springer Science and Business Media, LLC, 2nd ed, 2006, Vol. 147.
2. Haralick R. and Shapiro L., Eds. Computer and Robot Vision. 1993, chapter 16, Addison-Wesley.
3. Mumford D. and Shah J. Boundary detection by minimizing functionals, *Proc of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. San Francisco, CA, June 1985, pp. 22–26.
4. Marr D. and Hildreth E. Theory of edge detection, *Proc of the Royal Society*. London B, 207, 1980, pp. 187–217.
5. Kass M., Witkin A. and Terzopoulos D. Snakes: Active contour models, *Int. Journal of Computer Vision*, 1988, Vol. 1, pp. 321–331.
6. Malladi R. Shape modeling with front propagation: A level set approach, *IEEE Transactions Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, Vol. 17, pp. 158–175.
7. Caselles V., Catte F., Coll T. and Dibos F. A geometric model for active contours in image processing, *Numer. Math.*, 1993, Vol. 66, pp. 1–31.
8. Caselles V., Kimmel R. and Sapiro G. On geodesic active contours, *Int. Journal of Computer Vision*, 1997, Vol. 22, No. 1, pp. 61–79.
9. Kimmel R., Osher S. and Paragios N., Eds. Fast edge integration, *Geometric Level Set Methods in Imaging, Vision and Graphics*. New York, Springer-Verlag, 2003.
10. Michal Holtzman-Gazit, Ron Kimmel, Nathan Peled and Dorith Goldsher Segmentation of Thin Structures in Volumetric Medical Images, *IEEE Transactions On Image Processing*, 2006, Vol. 15, No. 2.
11. Chan T., Vese L. Active Contours Without Edges, *IEEE Transactions on Image Processing*, 2001, Vol. 10, No. 2, pp. 266–277.
12. Stanley Osher and James A. Sethian Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations, *Journal of Computational Physics*, 1988, Vol. 79, pp. 12–49.
13. Michael Dossis, Dimitrios Amanatidis and Iosif Androulidakis, Using Behavioural Synthesis for hardware generation of a contour-based image segmentation algorithm, *Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*. Zilina, Slovakia, July 7–9, 2015.
14. Michael F. Dossis A Formal Design Framework to Generate Coprocessors with Implementation Options, *International Journal of Research and Reviews in Computer Science (IJRRCS)*. Science Academy Publisher, United Kingdom. August 2011, Vol. 2, No 4, pp. 929–936. ISSN: 2079–2557, www.sciacademypublisher.com.
15. Michael Dossis Intermediate Predicate Format for Design Automation Tools, *Journal of Next Generation Information Technology (JNIT)*. May 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 100–117.
16. Dossis M. Patent number 1005308, 5/10/2006 by the Greek Industrial Property Organisation, 2006.

Skobtsov Yu. A.¹, Skobtsov V. Yu.², Shalyto A. A.³¹Dr. Sc., Professor, Head of Automated Control Systems department, Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine²PhD, Associate Professor, Leading Researcher of Information Protection Laboratory, United Institute of Informatics Problems of the NAS of Belarus, Minsk, Belarus³Dr. Sc., Professor, Head of Program Technology department, Saint-Petersburg University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint-Petersburg, Russia

TEST GENERATION AND SIMULATION FOR CROSSTALK FAULTS

The main models of crosstalk faults are defined: 1) induced positive and negative pulses, 2) induced delays. The purpose of the work is to increase the effectiveness of the methods of constructing checking tests for digital systems based on an evolutionary approach and models of non-const fault. Formalized statement of the problem of test generation for a single crosstalk faults-induced pulses and delays. It is shown that this problem is reduced to solving a system of logic equations in the multi-valued alphabet. The 8-valued alphabet and multi-valued functions for basic gates are defined. Simulation method was developed in the 8-valued alphabet for crosstalk faults. On this basis, the genetic algorithm is proposed for test generation of single cross-faults. The test generation problem for fault-induced delay is formalized. A genetic algorithm of test generation for fault-induced is proposed. Developed algorithms and software for test generation for crosstalk faults, which improve the quality of test generation by using evolutionary techniques. The approbation of the developed methods is implemented at circuits of international catalogs ISCAS85, ISCAS89, which showed an increase in the completeness of tests by 15%.

Keywords: test generation, crosstalk faults, genetic algorithms, multi valued logic, fault simulation.

NOMENCLATURE

- a_i is an aggressor line;
- B_2 is a binary alphabet;
- C_8 is a multivalued alphabet;
- c_i is a capacitive value;
- DF is a reducing delay;
- DR is an increasing delay;
- f_i is a primary output
- FT is a backward front;
- f_a is an evaluation of aggression;
- f_e is an evaluation of excitation;
- f_p is an evaluation of propagation;
- f_f is a fitness-function;
- $g()$ is a victim-line function;
- $h()$ is an aggressor-line function;
- n is a number of primary variables;
- NG is a negative pulse;
- P_c is a crossover probability;
- PG is a positive pulse;
- P_m is a mutation probability;
- RT is a forward front;
- $S0$ is a static zero signal;
- $S1$ is a static one signal;
- s_i is a flag of belonging the subject line a_i ;
- x_i is a primary input variable.

INTRODUCTION

The diagnostics of modern digital systems and their element base increasing need of the analysis of not only stuck-at faults, but also of more adequate models of physical defects. Technological progress leads to density increasing on chip, rising number of crossings in conductive layers and speeding-up time frequency. As a result, the analysis of physical defects affecting on time parameters of a circuit and crossings in conductive layers is need. Especially it is concerned deep submicron level design.

Increasing transistor number on chip leads to that bigger number of element switches simultaneously and reduces

voltage level of elements, and enlarges delay time. At the same time, some crossing lines, which are suppose to be electrically isolated, can interfere with each other. One of such interactions, produced by parasitic coupling between conductors, is called «crosstalk», and can bring to functional problems, to performance degradation and makes worse time characteristics.

The purpose of the work is to increase the effectiveness of the methods of constructing checking tests of digital systems based on an evolutionary approach and models of non-const fault.

1 PROBLEM STATEMENT

Let the states of victim-line g and aggressor-line h are described by the Boolean functions of primary inputs variables, $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ and $h(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Similar on every j -th primary output it is implemented Boolean function $f_j(g, h, x_1, x_2, \dots, x_n)$, which depends of primary input variables $\underline{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ and internal variables g and h .

For crosstalk fault detection with positive pulse (glitch) it is necessary the primary inputs values, which guarantee on aggressor-line h RT, and on victim-line g – S0 in fault-free case. Then for given positive glitch crosstalk fault test generation problem is reduced to searching solution of following Boolean equations system (1)–(3):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = RT, \quad (1)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = S0, \quad (2)$$

$$F_j(S0, R, x_1, x_2, \dots, x_n) \oplus F_j(PG, R, x_1, x_2, \dots, x_n) = 1, \quad (3)$$

where (1) RT guarantees value on the aggressor-line h , (2) – the $S0$ value on the victim-line g and guarantees propagation of positive glitch effect from the victim-line g to some primary output.

Similar for crosstalk detection with negative glitch it is necessary primary inputs values that set-up value FT on aggressor-line h and on victim-line g value S1. Then for

negative glitch test generation problem is reduced to searching solution of following Boolean equations system (4)–(5):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = FT, \quad (4)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = S1, \quad (5)$$

$$F_j(S1, FT, x_1, x_2, \dots, x_n) \oplus F_j(NG, FT, x_1, x_2, \dots, x_n) = 1. \quad (6)$$

The test generation problem for the crosstalk delay fault of backward/forward front is reduced to searching solution of following Boolean equations system (7)–(9):

$$h(x_1, x_2, \dots, x_n) = FT / RT, \quad (7)$$

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = RT / FT, \quad (8)$$

$$F_j(FT / RT, RT / FT, x_1, x_2, \dots, x_n) = DR,$$

where (7) FT/RT guarantees value on the aggressor-line h , (8) –RT/ FT value on the victim-line g and (9) guarantees propagation of crosstalk delay effect from the victim-line g to some primary output. In the right parts of equations (7) and (8) we cited two values through slant line for backward/forward front cases.

Obviously that checking test for crosstalk faults should consist of pattern pairs, which guarantee mentioned above conditions. If the above formulated equation systems do not have solution then crosstalk induced pulse and delay faults are undetectable at least in this problem setting.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The works in the area of crosstalk fault simulation and test generation are carried out since middle of 90-th and are urgent for theory and practice of reliable design and diagnostics of modern digital devices. They are based on the application of different approaches such as timing analysis, multivalued logics, critical path method, PODEM algorithm modifications, structural deterministic and simulation based methods etc [1–3]. There are considered two basic types of crosstalk faults: crosstalk induced pulses and crosstalk induced delays.

In the first case, quickly switching conductive line – *aggressor*, can induce short pulse on static line – *victim*. First type faults are often named «crosstalk glitch» and caused by parasitic inducing between neighbor conductor lines, which have inductive and capacitive constituents in general. Depending on amplitude and width these pulses can essentially effect on circuit characteristics [1, 4].

In the second case, an induced delay takes place when on aggressor and victim lines (almost) synchronous signal crossings are happened. If on both lines crossings have the same direction then crossing time is reduced, and hence, signal propagation delay time is reduced. This effect is called crosstalk speedup. If signal crossing have opposite directions then crossing time increases and effect of crosstalk slowdown takes place [2]. If induced noise is over the boundary voltage or induced delay exceeds allowed value on victim line then it can lead to logical failures and functional problems on neighbor flip-flops or outputs.

Research on modeling and testing «crosstalk» faults since the mid90s. In [2] it was suggested the method, that is

based on search of input pattern pair that sets up defined value of signal on victim-line and excites crossing on aggressor-line, which provide fault effect propagation to primary outputs. Crosstalk induced pulses were considered in this paper. The authors in [3–5] have developed a mixed test signal generator XGEN for «crosstalk» induced delays. They suggested a mixed test generation method, where analog simulation allowing evaluating signal delays is used in binary patterns search.

Using Laplace transform they received expressions of faults “crosstalk” in the s-domain, which are used to analyze the dependence of the attributes of the pulse in the circuit with lumped parameters and temporal characteristics of fronts. Static timing analysis allows to define the time windows for inputs and outputs of elements. The required time window is determined as the intersection of time windows «aggressor» and «victim». For a given failure – a particular pair of «aggressor-victim» approach allows to set the required values for interacting lines and extend the influence of the fault to the external output.

During test generation is used 11-digit alphabet and modification of PODEM at step justification. The developed algorithm does not guarantee the generation of tests as a result of restrictions on the conditions of propagation effects of malfunctions and used (11-valued) logic system.

In [6], the authors have developed a model path delays in combination with a critical path and the sources set, by interacting with it. It is used as a basis for test generation method for the fault of the «propagation delay» without phase justification. And on the stage justification it applies genetic algorithm, which uses in the process of test generation temporal characteristics.

Further, this approach was developed in [7], which provides a solution to the problem of test generation in the case of many of the «aggressors», so acting a certain way. Here the implication graph is constructed which allows for the logical and structural information schemes to check conflicts in the process of test generation.

The paper [8] is devoted to testing of faults «crosstalk» – induced delays. An algorithm for test construction uses the generation of critical paths based on static timing analysis of the circuit. Testability of sustainability criteria used for checking the sensitivity of paths. To activate the sensor path pair «aggressor-victim» in a way to maximize the impact of the aggressor on the path and cause the signal propagation delay along this path.

In [9], a test generator unit based on accurate delay pattern is proposed. It is activated by a subpath to meet the conditions of signal transitions. Known fault model of the «delay» is modified for testing of induced delays. To reduce the set of analyzed faults preprocessing is performed to critical paths.

The authors in [10] have developed a method based on test generation PODEM. To test the «crosstalk» must be necessary transitions to the external inputs and provide a propagation of the influence of the fault on the external output. Each of these tasks is formulated separately, and the final decision is the result of crossing making these tasks. The 11-valued alphabet and PODEM method modification at justification stage are used during test

generation. Developed method does not guarantee test generation in consequence of restrictions for fault effects propagation conditions and using logical system.

In [12] to solve the problem of test generation for «crosstalk» is used 0–1 integer programming based on traditional algorithms for stuck-at faults. Maximum activation of the aggressor is formulated in terms of linear programming, and the impact of the propagation of the fault is solved by traditional means. It should be noted that all of the above papers in the test generation using mechanisms of «turning back» scheme that require significant computing resources. On the other hand there is a group of methods, which are based on modeling and did not require a «bounce back».

These include, for example, [13] where the simulation is used to test the cross-faults. It uses an algorithm for editors fault-candidates, which allows to obtain a compact set of target faults due to the exclusion of those problems that can never be activated and detected. Here editing algorithm for faults-candidates is used that allow get compact set of target faults due to exclusion that faults, which never can not be excited and detected. Under that sequential fault path delay simulator was applied. Except that analog macro model for evaluation of signal delays in consequence of crosstalk interfering is used. Here one aggressor-victim pair is associated with every crosstalk fault. Input patterns are generated randomly during search process. Authors of [14] suggested fault simulator that considers one victim-line and set of aggressor-lines. Binary logical simulation and, as a base, stuck-at faults tests are used in test generation. Note that simulation-based methods demand good heuristics for test pattern generation and generated test sequences have big length, as a rule.

3 MATERIALS AND METHODS

An application of multivalued alphabets, which allow more adequate simulate physical processes in digital devices at logical level, is widely used method to increase effectiveness test generation and simulation algorithms for digital circuits [4]. In table 1 there is represented multivalued alphabet C_8 (its symbols, encoding and physical interpretation), which we suggested to use in test generation and simulation algorithms for crosstalk faults.

Note that the primary inputs variables can take only following four values: «static 0» $S0 (0 \rightarrow 0)$, «static 1» $S1 (1 \rightarrow 1)$, forward front $RT (0 \rightarrow 1)$, backward front $FT (1 \rightarrow 0)$. Internal lines variables also can accept following additional values PG (positive pulse), NG (negative pulse), DR (increasing delay), DF (reducing delay).

From table 1 we can see that initial signals are binary in fact. But it is more effective to simulate and compute in terms of multivalued alphabet symbols, which allow to process several clocks simultaneously. So the C_8 symbols belong to Cartesian product of binary alphabets B_2 : $C_8 \subseteq B_2 \times B_2 \times B_2$.

For logical simulation purposes we should define logical functions for basic gates in the terms of C_8 alphabet. We can do it in table form that is enough effective for simulation goals. The table model for the basic gates AND, OR, NOT are defined constructively on the base of physical sense of C_8 symbols and functionality logics of given gates, and there is represented in tables 2–4.

Table 1 – Multivalued alphabet C_8

Symbol C_8	Interpretation	Binary encoding		
		tt-1	tt	t+1
$S0$	Static 0	00	00	00
$S1$	Static 1	11	11	11
RT	Forward front	00	11	11
FT	Backward front	11	00	00
PG	Positive pulse	00	11	00
NG	Negative pulse	11	00	11
DR	Increasing delay	00	00	11
DF	Reducing delay	11	11	00

Table 2 – Definition of gate AND in C_8 alphabet

AND	$S0$	$S1$	R	F	PG	NG	DR	DF
$S0$								
$S1$	$S0$	$S1$	R	F	PG	NG	DR	DF
R	$S0$	R	R	$S0$	PG	DR	DR	PG
F	$S0$	F	$S0$	F	$S0$	F	$S0$	F
PG	$S0$	PG	PG	$S0$	PG	U	$S0$	$S0$
NG	$S0$	NG	DR	F	$S0$	NG	DR	F
DR	$S0$	DR	DR	$S0$	$S0$	DR	DR	$S0$
DF	$S0$	DF	PG	F	PG	F	$S0$	$S0$

Table 3 – Definition of gate OR in C_8 alphabet

OR	$S0$	$S1$	R	F	PG	NG	DR	DF
$S0$	$S0$	$S1$	R	F	PG	NG	DR	DF
$S1$								
R	R	$S1$	R	$S1$	R	$S1$	R	$S1$
F	F	$S1$	$S1$	F	DF	NG	NG	DF
PG	PG	$S1$	R	DF	PG	$S1$	R	DF
NG	NG	$S1$	$S1$	NG	$S1$	NG	NG	$S1$
DR	DR	$S1$	R	NG	R	NG	DR	$S1$
DF	DF	$S1$	$S1$	DF	DF	$S1$	$S1$	DF

Table 4 – Definition of gate OR in C_8 alphabet

NOT	$S0$	$S1$	R	F	PG	NG	DR	DF
	$S1$	$S0$	F	R	NG	PG	DF	DR

Let consider a combinational circuit with primary inputs (x_1, x_2, \dots, x_n) and primary outputs (f_1, f_2, \dots, f_m) that have crosstalk fault on some line. Under test generation for crosstalk faults it is necessary:

- find out input patterns, which cause required signal transient on aggressor line;
- find out input patterns guaranteeing necessary static signal on victim line;
- find out input patterns propagating arisen crosstalk effect from victim line to primary outputs.

Consider the problem of the test generation for multiple delay faults induced by the various lines of aggressors. In this case, the victim lines are included in some path, connecting the external input to an external output of the circuit [2].

The set of the aggressor lines is formed by those lines, which could affect the victim line and thus cause a delay of signal propagation in the specified path. In solving this problem must be solved at least three sub-tasks [2]: 1) selecting the set of critical paths, forming a line of victims; 2) The choice of the set of aggressor lines for a given critical path; 3) generation of input test pair patterns that check-induced delay for a given circuit path and the set of aggressors lines.

Selection of multiple aggressor lines set for given victim line can be formalized as follows. Let $A=\{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ is the set of possible aggressors lines. For each aggressor line a_i , we define c_i – the extent of its effect at the victim, which is determined, above all, the value of the capacitive coupling between these lines.

Next, we define a set of Boolean variables $S=\{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, where each variable s_i corresponds to its aggressor a_i . At the same time

$$s_i = \begin{cases} 1, & \text{if } a_i \text{ belong to current aggressor set;} \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases}$$

That is, each variable s_i is a flag of belonging the subject line a_i to the current set of line-aggressors. Then the degree of effect of the current set of aggressors to the victim line

can be defined as $\sum_{i=1}^m s_i \cdot c_i$.

To maximize cross-induced delay for the current set of aggressors, should be excited so that the effect of delay at the victim line was a maximum. So it is necessary to find a Boolean vector S , which takes place $\max \sum_{i=1}^m s_i \cdot c_i$ and execute

the necessary logical conditions for generation the test pair [2]. Obviously, this task has the overhaul nature and is NP-hard. In the worst case would have to go through all possible set subsets of 2^m aggressor lines.

4 EXPERIMENTS

Crosstalk fault simulation is executed on the base of the event-driven simulation using multivalued alphabet C_8 [4]. The simulation goal is checking crosstalk fault detection by given input sequence. The generalized crosstalk fault simulation algorithm for both crosstalk faults is given below.

```
Crosstalk fault simulation (combinational
logical circuit, input sequence T, line pair
aggressor, victim))
Circuit description input;
Circuit initialization;
Input sequence T entry;
Crosstalk fault entry;
FOR every pattern of input sequenceT{
Multivalued input pattern generation in C8
alphabet;
If (condition crosstalk fault appearance){
Crosstalk fault effect entry and activation
for given line pair(aggressor, victim);
Input pattern fault-free and fault simulation;
If (there is primary output with crosstalk
effect) given crosstalk fault is detected;
}
}
}
```

For positive and negative pulse induced crosstalk effect entry PG and NG values should be set up on victim-line in the process of fault simulation.

The example 1 of multivalued logical simulation in C_8 alphabet is represented on figure 1 for circuit C17 from benchmark ISCAS85. The positive glitch fault between aggressor-line 19GAT(7) and victim-line 16GAT(8) is considered. Note that the values for one test pair detected given fault are represented here (Fig. 1).

The example 2 of delay induced fault for circuit C17 between victim-line h and aggressor-line i is presented on the Fig. 2. In this case we can set forward front value RT on aggressor-line I and backward front value FT at victim-line.

Genetic algorithm and multi-valued logic can be used in test pattern search process [15, 16]. At that the genetic algorithm provides a mechanism of random direct search of test patterns pairs, which satisfy noted conditions. To our point of view, application of evolutionary methods in test generation for considered faults is more justified than for classical stuck-at faults. It can be drawn an analogy with numerical optimization problems where evolutionary approach is used in cases of inapplicability of classical gradient methods first of all. It is necessary to note that genetic algorithms allow reduce synthesis problem to analysis problem (in some sense). Under condition of analysis tools presence (fault-free or faulty circuit simulators) genetic algorithms provide direct random search for synthesis problem solution. Under that synthesis and analysis problems can be considered at different levels.

Classical «simple» GA uses three basic operators: reproduction, crossover and mutation. Using these operators, the population (the set of individuals-solutions of considered problem) evolves from one generation to another. Classical steady state GA may be represented as the following sequence of operations that is shown in flow chart of fig. 3.

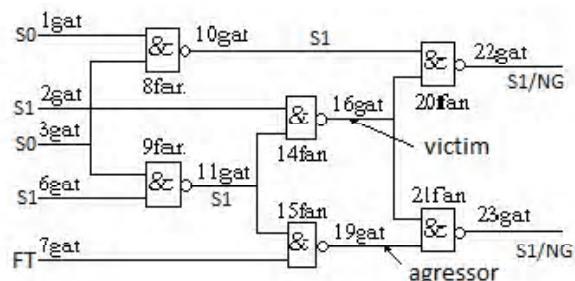


Figure 1 – Logical simulation of positive glitch in circuit C17

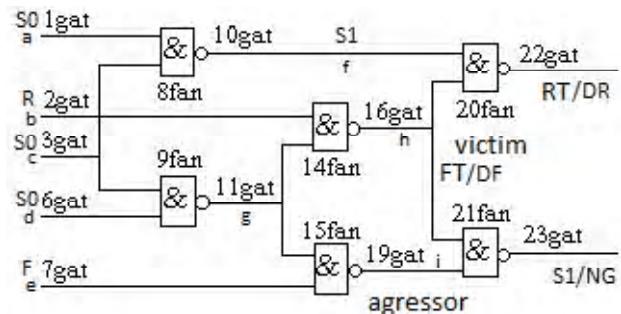


Figure 2 – Logical simulation of delay induced fault in circuit C1

In developed test generation genetic algorithm the initial population of size N is generated randomly. Here each chromosome (x_1, x_2, \dots, x_n) is of length $2n$ bits, where n is the inputs number. Note that each input $x_i \in B_2 \times B_2$ corresponds two consecutive bits, representing one of four values S0, S1, RT and FT. The set of such pattern pairs is population.

Generation of new population is done with using following genetic operators. The tournament selection is used here. On tournament selection [4,5] m individuals are chosen randomly, then the best one of them is selected as potential parent. This procedure is continued until intermediate population is not formed. Here selection parameter is $2 \leq m \leq N$ ($m=2,3$). Then crossover is performed with a high probability P_c . As crossover operator we apply uniform crossover in this case (Fig. 4).

The formed offspring are mutated with a low probability $P_m \ll 1$ and inserted in current population. The classical mutation operator is used. But it is applied for two-bit groups instead one bit according to values S0, S1, RT and FT.

Parent selection is biased towards patterns with good cover faults properties. We define fitness-function as linear combination of three component:

$$f_f = w_e f_e + w_p f_p + w_a f_a, \quad (10)$$

where f_e evaluates input pattern – individual ability to excite necessary value on victim-line, f_p evaluates individual ability to propagate crosstalk effect to primary outputs, f_a evaluates input pattern – individual ability to take into account aggressor lines effect. To evaluate fitness-function components results of logical simulation in multi-valued alphabet C_8 is used. The next population is generated based on the current population with using the same genetic operators. The process is repeated until the stop criterion is fulfilled.

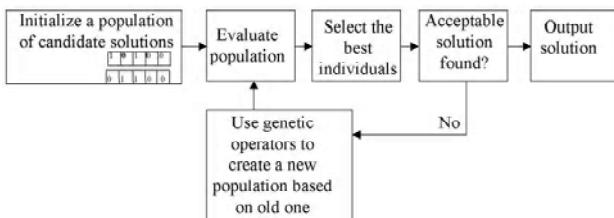


Figure 3 – Classical «simple» GA flowchart

Mask OC	1	0	1	0	1
1-st parent	1	1	0	1	1
	0	0	0	1	0
	↓			↓	
Offspring	1	0	0	0	1
	0	1	0	0	0
		↑			↑
2-nd parent	0	0	0	0	1
	1	1	1	0	1

Figure 4 – Uniform crossover operator

When implementing the proposed approach based Finite State Machines programming [17], which allows to use object-oriented features of faults. In addition, this approach allows to go from a simple genetic algorithm to genetic programming that enables to operate with more complex data structures of various dimensions for potential solutions and extend a class of simulated faults.

5 RESULTS

For example 1, the simulation results show that positive glitch fault between aggressor-line 19GAT(7) and victim-line 16GAT(8) is detected on the both output lines for the multivalued input pattern 1gat=S0, 2gat=S1, 3gat=S0, 6gat=S1, 7gat=FT, which corresponds to input test pair 1gat=0->0, 2gat=1->1, 3gat=0->0, 6gat=1->1, 7gat=0->1.

For example 2, on the figure 2 it is represented the example of multivalued test pattern 1gat=S0, 2gat=RT, 3gat=S0, 6gat=S0, 7gat=FT, which detects given delay induced fault for circuit C17 at the lines 16gat=DF (forward front delay) 22gat=DR (backward front delay).

The proposed method testing was performed at the circuits of international catalogs ISCAS85, ISCAS89, which according to international standards adopted to test new methods of test generation. For a subset of ISCAS85, ISCAS89 a number of computer experiments were performed which confirm the effectiveness of the developed methods. The results of test generation for single cross-fault type including positive (negative) induced impulse and induced delay are represented at table 5.

Except single cross-faults, the experiments were also performed for cross faults with many aggressors. The results are shown in Table 6.

6 DISCUSSION

It is seen that the average genetic algorithm provides a 2-fold greater fault coverage than random method. At the same time, for the combinational circuits fault coverage is 70%. Note that for certain schemes (eg. S526, S420.1, S1238) pseudo-random method does not generate check tests. For sequential circuits are somewhat worse results, and the average completeness of test is about 40%. But it should be noted that many of the faults marked as targets (the number of which is shown in the 2nd column tabl.6 is not feasible, due to contradictory logical conditions and, therefore, the actual fault coverage for cross fault is much higher.

CONCLUSIONS

It was shown for combinational digital circuits that application of genetic algorithms and multivalued event-driven simulation in C_8 alphabet allows effectively solving the test generation problem for crosstalk faults.

Table 5 – Test generation for single cross talk faults

Circuit	Fault coverage			
	Positive impulse PG	Negative impulse NG	Delay front DR	Delay back front DR DF
C432	98.05	99	100	98.01
C499	99	84.81	99.4	99.8
C880	97.09	95.13	98.16	98.85
C1355	88.15	94.41	99.18	99.43
C1908	89.75	96.77	95.63	93.88
C2670	90.31	94.15	94.71	90.45
C5315	99.70	99.87	99.71	99.72
C6288	99.91	98.97	99.31	99.32
C7552	97.23	98.28	99.05	97.03

Table 6 – Test generation for cross talk faults with many aggressors

Circuit	Number of target faults	Fault coverage, %		Time (sec)
		Pseudo random	Genetic algorithm	
C17	42	45,23	62.05	0.18
C432	9327	59.52	70.15	241.14
C449	21879	30.27	71.81	591.17
C880	9279	2.31	47.53	628.14
S27	74	6.78	37.87	0.39
S208	743	30.96	32.43	6.42
S208.1	558	1.63	45.21	12.72
S298	537	43.04	62.58	9.43
S344	1190	64.38	66.14	18.53
S349	1197	30.51	57.92	19.24
S526	891	0.3	19.23	21.34
S386	4195	15.81	25.51	58.04
S510	1098	36.83	43.87	14.73
S420.1	1276	0.3	36.93	63.95
S820	7738	26.34	35.41	166.42
S1196	10630	0.3	14.61	782.45
S1238	5822	0.2	13.51	531.23
S1488	4305	18.43	22.45	184.52
S1494	4283	18.23	18.43	165.42
average		22.70	41.24	185.02

The problem of test generation for the new class not s-a-constant faults is characteristic for modern digital circuits, which have a high density of elements and high operating frequencies. It is proposed a multi-valued alphabet C_8 , developed models of multi-valued logic elements to this alphabet, which allows to effectively simulate the cross-faults.

The modified genetic algorithm is designed for generation of test input pattern pairs, checking single fault «induced impulses».

Also the problem of the test generation for single cross faults such as «induced delay is considered. Has received the further development of the method of multi-valued logic simulation in the alphabet, which allows you to simulate the new class is not constant – as a cross-fault-induced pulses and induced delays. Modified genetic algorithm for constructing test sets of pairs of input sequences that cross-check single failure of the» induced delay. The problem of test generation for fault-induced delay with many lines-aggressors is considered.

A software module developed by a multi-valued simulation and genetic algorithms for constructing tests for non-classical (constant) cross-faults, which are integrated into the system simulation and test generation ASMIDA.

Completed testing and verification of the effectiveness of the developed software modules for the logic circuits are not the fault of the international classical catalogs and ISCAS85 ISCAS89, who confirmed to achieved high performance characteristics.

REFERENCES

- Скобцов Ю. А. Моделирование, тестирование и диагностика цифровых устройств / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский, В. Ю. Скобцов : учебное пособие. – М. : Национальный открытый университет «ИНТУИТ», 2012. – 439 с.
- Rubio A. An approach to the analysis and detection of crosstalk faults in digital VLSI circuits / A. Rubio, N. Itazaki, X. Xu, K. Kinoshita // IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems. – 1994. – Vol. 13, № 3. – P. 387–394.
- Chen W. Y. Analytic Models for Crosstalk Delay and Pulse Analysis under Non-Ideal Inputs / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // International Test Conference, Washington, Nov. 1997 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 1997. – P. 809–818. DOI:10.1109/TEST.1997.639695.
- Chen W. Y. Test generation for Cross-Induced Delay / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // International Test Conference, Atlantic City, 28–30 September 1999 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 1997. – P.191–200. DOI:10.1109/TEST.1999.805609
- Chen W. Y. Test generation for Cross-Induced Faults: Framework and computational results / W. Y. Chen, S. K. Gupta, M. A. Breuer // Journal of Electronic Testing : Theory and Applications. – 2002. – Vol. 16. – P. 17–28.
- Krstic A. Delay Testing Considering Cross-Induced Effects / A. Krstic, J.-J. Liou, Y.-M. Jiang, K.-T. Cheng // International Test Conference, Baltimore, 30 October-01 November 2001 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2001. – P. 558–567. DOI:10.1109/TEST.2001.966674.
- Bai X. HyAC. A Hybrid Structural SAT Based ATPG for Crosstalk / X. Bai, S. Dey, A. Krstic // International Test Conference, Washington, 30 September–2 October 2003 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2003. – P. 112–121. DOI:10.1109/TEST.2003.1270831.
- Arunachalam A. A Novel Algorithm for Testing Crosstalk Induced Delay Faults in VLSI Circuits / A. Arunachalam, R. Arunachalam // International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings. – Los Alamitos: IEEE, 2005. – P. 479–484.
- Li H. Selection of Crosstalk-induced Faults in Enhanced Delay test / H. Li, X. Li // Journal of Electronic Testing: Theory and Applications. – 2005. – Vol. 21, № 2. – P. 181–195.
- Palit A. K. Test Pattern Generation for Crosstalk Faults in DSM chips using Modified PODEM / A. K. Palit, K. K. Duganapalli, W. Anheier // Electronics System integration Technology Conference, Greenwich, 1–4 September 2003 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2003. – P. 393–398. DOI:10.1109/ESTC.2008.4684311.
- Chun S. XPDF-ATPG: An Efficient Test Pattern Generation for Crosstalk-Induced Faults/ S. Chun, Y. Kim, M.-H. Yang, S. Kang // Asian Test Symposium, Sapporo, 23–24 November 2008 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2008. – P. 83–88.
- Ganeshpure K. P. On ATPG for Multiple Aggressor Crosstalk Faults in Presence of Gate Delays / K. P. Ganeshpure, S. Kundu // International Test Conference, Santa Clara, 23–25 October 2007 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2007. – P. 1–7.
- Chary Sh. Automatic path delay test generation for combined Resistive Vias Resistive bridges and Capacitive Crosstalk delay faults / Sh. Chary, M. L. Bushnell // International conference on VLSI Design, Hyderabad, 3–7 January 2006. – Los Alamitos : IEEE, 2006. – P. 413–418.
- Phadoongsidhi M. SCINDY: Logic Crosstalk Delay Fault Simulation in Sequential Circuits / M. Phadoongsidhi, K. K. Saluja // International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings. – Los Alamitos : IEEE, 2005. – P. 820–823.
- Скобцов Ю. А. Эволюционные вычисления : учебное пособие / Ю. А. Скобцов, Д. В. Сперанский. – М. : Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2015. – 331 с.
- Skobtsov Yu. A. Evolutionary test generation methods for digital devices / Yu. A. Skobtsov, V. Yu. Skobtsov // Design of Digital Systems and Devices / [eds.: M.Adamski et al.]. – Berlin: Springer-Verlag, 2011. – P. 331–361. – (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 79).
- Шалыто А. А. Автоматное программирование / А. А. Шалыто, Н. И. Поликарпова. – Спб. : Питер, 2009. – 176 с.

Article was submitted 30.04.2015.
After revision 26.06.2015.

Скобцов Ю. О.¹, Скобцов В. Ю.², Шалыто А. А.³

¹Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрою АСУ Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, провідний науковий співробітник лабораторії проблем захисту інформації Об'єднаного інституту проблем інформатики НАН Беларусі, Мінськ, Беларусь

³Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедри технології програмування Університету інформаційних технологій, механіки та оптики, Санкт-Петербург, Росія

ПОБУДОВА ТЕСТІВ І МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПЕРЕХРЕСНИХ ПОШКОДЖЕНЬ

Розглянуто основні моделі перехресних несправностей (crosstalkfaults): 1) індуковані позитивні і негативні імпульси, 2) індуковані затримки. Мета роботи – підвищення ефективності методів побудови перевіряльних тестів цифрових систем на основі еволюційного підходу і моделей неконстантних несправностей. Формалізована постановка задачі генерації перевіряльного тесту для одиночних перехресних несправностей – індукованих імпульсів і затримок. Показано, що ця задача зводиться до розв'язання системи логічних рівнянь в багатозначному алфавіті. Визначено 8-значний багатозначний алфавіт і функції основних вентилів у цьому алфавіті. Отримав розвиток метод моделювання перехресних несправностей в 8-значному алфавіті. На цій основі розроблено генетичний алгоритм побудови перевіряльних тестів для одиночних перехресних несправностей. Розглянуто задачу генерації перевіряльного тесту для несправності індуковані затримка. Запропоновано генетичний алгоритм побудови перевіряльних тестів для несправності індуковані затримка. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для генерації тестів для перехресних несправностей, яке дозволяє підвищити якість перевіряльних тестів за рахунок використання еволюційних методів та моделей неконстантних несправностей . Проведено апробацію розроблених методів на схемах міжнародних каталогів ISCAS85 , ISCAS89 , яка показала збільшення повноти тестів на 15%.

Ключові слова: побудова тестів, перехресні несправності, генетичний алгоритм, багатозначна логіка, моделювання пошкоджень.

Скобцов Ю. А.¹, Скобцов В. Ю.², Шалыто А. А.³

¹Д-р техн. наук професор, зав. кафедрою АСУ Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем защиты информации Объединенного института проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

³Д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой технологии программирования Университета информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

ПОСТРОЕНИЕ ТЕСТОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПЕРЕКРЕСТНЫХ НЕИСПРАВНОСТЕЙ

Рассмотрены основные модели перекрестных неисправностей (crosstalkfaults): 1) индуцированные положительные и отрицательные импульсы, 2) индуцированные задержки. Цель работы – повышение эффективности методов построения проверяющих тестов цифровых систем на основе эволюционного подхода и моделей неконстантных неисправностей. Формализована постановка задачи генерации проверяющего теста для одиночных перекрестных неисправностей – индуцированных импульсов и задержек. Показано, что эта задача сводится к решению системы логических уравнений в многозначном алфавите. Определен 8-значный многозначный алфавит и функции основных вентилей в этом алфавите. Получил развитие метод моделирования перекрестных неисправностей в 8-значном алфавите. На этой основе разработан генетический алгоритм построения проверяющих тестов для одиночных перекрестных неисправностей. Рассмотрена задача генерации проверяющего теста для неисправности индуцированная задержка Предложен генетический алгоритм построения проверяющих тестов для неисправности индуцированная задержка со многими линиями-агрессорами. Разработан алгоритмическое и программное обеспечение для генерации тестов для перекрестных неисправностей, которое позволяет повысить качество проверяющих тестов за счет использования эволюционных методов. Проведена апробация разработанных методов на схемах международных каталогов ISCAS85, ISCAS89, которая показала увеличение полноты тестов на 15%.

Ключевые слова: генерация тестов, перекрестные неисправности, генетический алгоритм, многозначная логика, моделирование неисправностей.

REFERENCES

- Skobtsov Yu. A., Spieransy D. V., Skobtsov V. Yu. Modelirovaniye, testirovaniye diagnostika tsifrovyykh ustroystv. Moscow, National Open University «INTUIT», 2012, 439 p.
- Rubio A., Itazaki N., Xu X., Kinoshita K. An approach to the analysis and detection of crosstalk faults in digital VLSI circuits, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 1994, Vol.13, No. 3, pp. 387–394.
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Analytic Models for Crosstalk Delay and Pulse Analysis under Non-Ideal Inputs, *International Test Conference, Washington, Nov. 1997 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 1997, pp. 809–818. DOI:10.1109/TEST.1997.639695.
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Test generation for Cross-Induced Delay, *International Test Conference, Atlantic City, 28–30 September 1999 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 1997, pp. 191–200. DOI:10.1109/TEST.1999.805609
- Chen W. Y., Gupta S. K., Breuer M. A. Test generation for Cross-Induced Faults: Framework and computational results, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2002, Vol. 16, pp. 17–28.
- Krstic A., Liou J.-J., Jiang Y.-M., Cheng K.-T. Delay Testing Considering Cross-Induced Effects, *International Test Conference, Baltimore, 30 October 01 November 2001 : proceedings*. Los Alamitos: IEEE, 2001, pp. 558–567. DOI:10.1109/TEST.2001.966674.
- Bai X. Dey S., Krstic A. HyAC. A Hybrid Structural SAT Based ATPG for Crosstalk, *International Test Conference, Washington, 30 September – 2 October 2003 : proceedings*. – Los Alamitos: IEEE, 2003, pp. 112–121. DOI:10.1109/TEST.2003.1270831.
- Arunachalam A., Arunachalam R. A Novel Algorithm for Testing Crosstalk Induced Delay Faults in VLSI Circuits, *International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2005, pp. 479–484.
- Li H., Li X. Selection of Crosstalk-induced Faults in Enhanced Delay test, *Journal of Electronic Testing: Theory and Applications*, 2005, Vol. 21, No. 2, pp. 181–195.
- Palit A. K., Duganapalli K. K., Anheier W. Test Pattern Generation for Crosstalk Faults in DSM chips using Modified PODEM, *Electronics System integration Technology Conference, Greenwich, 1–4 September 2003 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2003, pp. 393–398. DOI:10.1109/ESTC.2008.4684311.
- Chun S. Kim Y., Yang M.-H., Kang S. XPDF-ATPG: An Efficient Test Pattern Generation for Crosstalk-Induced Faults, *Asian Test Symposium, Sapporo, 23–24 November 2008 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2008, pp. 83–88.
- Ganeshpure K. P., Kundu S. On ATPG for Multiple Aggressor Crosstalk Faults in Presence of Gate Delays, *International Test Conference, Santa Clara, 23–25 October 2007 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2007, pp. 1–7.
- Chary Sh., Bushnell M. L. Automatic path delay test generation for combined Resistive Vias Resistive bridges and Capacitive Crosstalk delay faults, *International conference on VLSI Design, Hyderabad, 3–7 January 2006*. Los Alamitos, IEEE, 2006, pp. 413–418.
- Phadoongsidhi M., Saluja K. K. SCINDY: Logic Crosstalk Delay Fault Simulation in Sequential Circuits, *International Conference on VLSI Design, Kolkata, 3–7 January 2005 : proceedings*. Los Alamitos, IEEE, 2005, pp. 820–823.
- Skobtsov Yu. A., Spieransky D. V. Evolutsionnye vychisleniya. Moscow, National Open University «INTUIT», 2015, 331 p.
- Skobtsov Yu. A., Skobtsov V. Yu. Evolutionary test generation methods for digital devices, *Design of Digital Systems and Devices*. [eds.: M. Adamski et al.]. Berlin, Springer-Verlag, 2011, pp. 331–361. – (Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 79).
- Shalyto A. A., Polikarpova N. I. Avtomatnoe programmirovaniye. Sankt-PeterburgPiter, 2009, 176 p.

¹Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп’ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп’ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Старший викладач кафедри комп’ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

DEVS-ОРИЄНТОВАНА МЕТОДИКА ВАЛІДАЦІЇ КОМПОЗИТНИХ ВЕБ-СЕРВІСІВ

Запропоновано методику валідації композитних веб-сервісів за рахунок синтезу імітаційних дискретно-подійних моделей на основі формалізму DEVS. Це дозволяє виконувати автоматизовану перевірку придатності таких систем до цільового використання при проектуванні шляхом імітаційного моделювання. В якості вхідних даних використано формальну специфікацію на основі темпоральної логіки TLA, що дозволяє математично строго представляти функціональні характеристики композитних сервісів у форматі обчислювальних процесів. За аналітичну модель в основі TLA-специфікації взято структуру Кріпке. У межах методики запропоновано правила синтезу із вихідної TLA-специфікації DEVS-моделі композитного сервісу, призначеної бути засобом валідації. Результатуюча DEVS-модель складається із моделей атомарних сервісів, моделі клієнта композитного сервісу та моделі координатора атомарних сервісів, що функціонує згідно специфікації WS-BPEL.

Для перевірки методики проведено експериментальні дослідження, що підтвердили адекватність результатуючої DEVS-моделі. Перевірку здійснено згідно запропонованого підходу, що полягає у порівнянні результатів валідації шляхом імітаційного моделювання із результатами валідації шляхом тестування. За результатами проведених досліджень обґрунтовано доцільність використання запропонованої методики при проектуванні композитних сервісів, що базується на зменшенні часових витрат на валідацію. Наголошено на дoreчності використання методики при ітераційній розробці.

Ключові слова: SOA, WS-BPEL, композитний веб-сервіс, специфікація, верифікація, валідація, TLA, DEVS.

НОМЕНКЛАТУРА

- AWS – Atomic Web Service;
CPU – Central Processing Unit;
CWS – Composite Web Service;
DEVS – Discrete Event System Specification;
JAX-WS – технологія створення атомарних веб-сервісів;
ODE – Orchestration Director Engine;
RAM – Random-access Memory;
SOA – Service-oriented Architecture;
TA – Timed Automata;
TLA – Temporal Logic of Actions;
UML – Unified Modeling Language;
WS-BPEL – Web Services Business Process Execution Language;
ОП – обчислювальний процес;
activate – повідомлення активації моделі MG;
AP – множина атомарних висловлювань (літералів);
Atoms – множина атомарних моделей у складі результатуючої моделі CWS;
break – функція видалення міжпортових зв’язків DEVS-моделі CWS;
Calc – умовне позначення TLA-специфікації окремого ОП;
Cnd – умовне позначення специфікації розмітки L(s);
D – множина допустимих значень змінних станів;
e – час, що пройшов від останнього переходу $(s, s') \in R$;
ev – повідомлення активації моделі MA_i ;
F – статистичний критерій Фішера;

$f_1(x)$ – функція залежності часових витрат на моделювання від затримок AWS;

$f_2(x)$ – функція залежності оціочних значень показника ξ_{nf}^s від затримок AWS;

$f_3(x)$ – функція залежності фактичних значень показника ξ_{nf}^t від затримок AWS;

Init – умовне позначення TLA-специфікації розмітки $L(s_0)$ структури Кріпке;

IP – множина вхідних портів складеної (результатуючої) DEVS-моделі CWS;

job_j – *j*-а заявка на обслуговування;

L – функція розмітки станів системи переходів;

L(s) – розмітка поточного стану системи переходів;

L(s') – розмітка наступного стану системи переходів;

m – кількість AWS у складі CWS;

m' – фактична кількість AWS у складі CWS, необхідна для окремого ОП;

MA_i – базова DEVS-модель *i*-го AWS;

MC – базова модель координатора AWS;

MG – базова модель клієнта (генератора заявок на обслуговування);

OP – множина вихідних портів складеної (результатуючої) DEVS-моделі CWS;

R – множина переходів між станами;

res₄ – шуканий результат експериментальних обчислень;

rs – повідомлення-результат роботи моделі MA_i ;

S – множина станів системи переходів;

s₀ – початковий стан системи переходів;

- s – поточний стан системи переходів;
- s' – наступний стан системи переходів;
- set – функція встановлення міжпортових зв'язків DEVS-моделі CWS;
- ST – множина міток станів атомарних DEVS-моделей;
- t – статистичний критерій Ст'юдента;
- ta – функція просування модельного часу;
- $UNCHANGED$ – ключове слово для визначення псевдоподій у специфікації;
- V – множина змінних станів системи переходів;
- X – темпоральний оператор часового зсуву;
- $\delta_{ext}^{MA_i}$ – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MA_i ;
- δ_{ext}^{MC} – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MC ;
- δ_{int}^{MG} – зовнішня функція переходів DEVS-моделі MG ;
- $\delta_{int}^{MA_i}$ – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MA_i ;
- δ_{int}^{MC} – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MC ;
- δ_{int}^{MG} – внутрішня функція переходів DEVS-моделі MG ;
- λ^{MA_i} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MA_i ;
- λ^{MC} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MC ;
- λ^{MG} – функція одержання результату роботи DEVS-моделі MG ;
- ξ_f^s – показник функціональної характеристики CWS при моделюванні;
- ξ_{nf}^s – показник нефункціональної характеристики CWS при моделюванні;
- ξ_f^t – показник функціональної характеристики CWS при тестуванні;
- ξ_{nf}^t – показник нефункціональної характеристики CWS при тестуванні.

ВСТУП

На сьогодні при організації різноманітних бізнес-процесів (у загальному випадку – обчислювальних процесів) інтенсивно використовуються технології створення розподілених програмних систем на основі архітектури SOA. Відповідно до принципів SOA, функціонування таких систем може бути реалізоване шляхом централізованого координування основних компонентів (надалі – сервісів або атомарних сервісів) [1]. Безпосередньо системи прийнято називати композитними сервісами (CWS). Розповсюдженім засобом створення сервісів є технологія JAX-WS [2].

Для перевірки коректності функціонування названих компонентів може бути проведено модульне тестування [3]. Перевірка узгодженості взаємодії сервісів при здійсненні допустимих сценаріїв ОП можлива за рахунок формальної верифікації специфікацій. Зазначені перевірки спрямовані на встановлення відповідності проектованої SOA-системи заданим вимогам. Підтвердження цього шляхом сумісного проведення модульних тестувань та формальної верифікації, однак, не дозволяє формулювати судження відносно задовільності функціонування сис-

теми в реальних умовах. Така потреба виникає у зв'язку із доцільністю врахування при проектуванні також і нефункціональних характеристик сервісів: вартості, часу відгуку, імовірності безвідмовної роботи тощо.

Врахування названих характеристик при проектуванні можливе за рахунок проведення валідації, реалізованої шляхом імітаційного моделювання. Для цього створено багато математичних апаратів. Серед них – формалізм DEVS Б. Зейглера (Bernard P. Zeigler) [4], теорія часових автоматів (ТА) [5], ланцюги Маркова, мережі Петрі та ін. При цьому актуальним, на нашу думку, є застосування одного з таких формалізмів до процесу проектування CWS для зменшення супутніх розробіч часових витрат. У зв'язку із цим поняття верифікації та валідації будемо розглядати в роботі як взаємодоповнюючі [6].

Мета роботи – розробка методики валідації CWS, яка дозволяла би здійснювати перевірку придатності такої системи до цільового використання при проектуванні після проведення формальної верифікації.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення сформульованої мети в роботі вирішується задача синтезу імітаційної DEVS-моделі CWS з вихідної формальної TLA-специфікації функціональних характеристик.

Нехай маємо формальну TLA-специфікацію композитного сервісу, який складається із m атомарних сервісів [7]. Представимо таку специфікацію аналітично структурою Кріпке на множині атомарних висловлювань AP [8]:

$$\langle S, \{s_0\}, R, L \rangle, \quad (1)$$

де $s_0 \in S$, $R \subseteq S^2$, $L : S \rightarrow 2^{AP}$.

Множину AP при цьому сформуємо із елементів множини $V \times D$, де $V = \{v_i | i = 1, 2, \dots, m\}$, а $D = \{0, 1, 2\}$: $0 \in D$ – AWS простоює (обчислення ще не почато), $1 \in D$ – AWS функціонує (обчислення виконується), $2 \in D$ – AWS простоює (обчислення завершено).

Тоді вирішувана задача полягає в одержанні на основі структури (1) структури

$$\langle IP, OP, Atomics, set, break \rangle, \quad (2)$$

яка є представленням результатуючої складеної DEVS-моделі CWS як засобу валідації [9].

Вирішення поставленої задачі вважатимемо успішним, якщо синтезована DEVS-модель композитного сервісу буде адекватною, а результати валідації на основі цієї моделі – достовірними. За показник достовірності візьмемо близькість результатів валідації шляхом імітаційного моделювання та шляхом тестування. При цьому валідація шляхом моделювання має бути менш витратною за часом.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Темпоральну логіку TLA Л. Лемпорта (Leslie Lamport) обрано у якості формалізму з позицій достатності виразних можливостей та зручності внесення змін до специфікації CWS [10]. Тобто кожний визначений сценарій ОП, що зумовлює відповідну функціональну характеристику CWS, можна подати на основі TLA окремою темпоральною формулою [11].

Вже існують певні спроби сполучення TLA- та DEVS-формалізмів [12]. Вони базуються на твердженні про активну адаптацію науковою спільнотою можливостей TLA з метою верифікації. Акцентується увага, що DEVS-моделі є малопоширеними, проте більш гнучкими та наочними. При цьому обґрутовується важливість синтезу TLA-специфікацій для DEVS-моделей.

У порівнянні із цим, DEVS-модель в нашій роботі розглядається саме як засіб валідації, похідний від TLA-специфікації – засобу верифікації. Обґрутування доцільності використання названого засобу валідації було здійснене нами раніше [13].

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Визначимо поняття події, що ініціює зміну стану системи переходів (1), тобто спричиняє деякий переход $(s, s') \in R$, у двох інтерпретаціях: з позиції вихідної формальної TLA-специфікації функціональних характеристик CWS та з позиції результатуючої синтезованої DEVS-моделі. У першому випадку – це координуючий вплив на атомарний сервіс у складі CWS з метою просування ОП згідно певного сценарію. У другому випадку – це надходження повідомлення активації моделі AWS на відповідний вхідний порт з метою виконання окремої обчислювальної процедури у межах ОП.

Композитний сервіс розглядатимемо як систему, а атомарний сервіс у його складі – як компонент системи. Розгляд AWS як компонента (а не елемента) зумовлено наявністю в нього інтерфейсу (множини методів або функцій), з якими можна взаємодіяти безпосередньо. Зауважимо, що при організації окремого ОП ми асоціюватимемо із AWS тільки один елемент його інтерфейсу.

Визначення подій у двох інтерпретаціях (TLA- та DEVS-контекстах) необхідне для встановлення співвідношення (один до одного) між вхідними та результатуючими концептами, відповідно. Визначення подій в TLA-контексті розкриває рівень деталізації вихідної специфікації. Це означає, що при верифікації нас не цікавить питання виявлення помилок, пов’язаних із специфікою роботи окремого AWS самого по собі (виокремлено від системи). Це питання, згідно нашого підходу до проектування, має бути вирішено раніше – шляхом модульного тестування, передуючи здійсненню верифікації (рис. 1). Тобто при верифікації вже оперуємо припущенням, що компоненти системи функціонують безвідмовно та безпомилково.

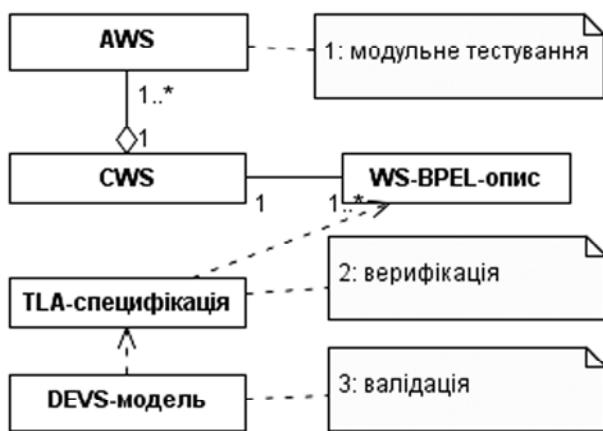


Рисунок 1 – Запропонований підхід до проектування композитних сервісів

На рис. 1 для встановлення зв’язку між сущностями AWS та CWS нами використано відношення агрегації (а не композиції) мови UML. Мета цього – підкреслити автономність атомарного сервісу, який у загальному випадку може входити до складу й інших композитних сервісів. Передумовою до здійснення верифікації є успішність модульного тестування кожного із компонентів системи. Під модулем при цьому розуміється окремий елемент інтерфейсу атомарного сервісу. Певний набір із елементів різних AWS (по одному від кожного) із встановленим порядком виклику методів задається згідно стандарту WS-BPEL [14]. Названий стандарт регламентує взаємодію компонентів композитного сервісу згідно моделі централізованого координування – моделі оркестровки.

Отже, розгляdatимемо композитний сервіс як поліморфну сутність, функціональні характеристики якої визначаються наступними факторами – складом задіяних атомарних сервісів, інтерфейсами останніх, а також порядком виклику (координування) елементів інтерфейсів. Зазначені фактори враховуються у TLA-специфікації. Специфікація, у свою чергу, формується з одного або декількох WS-BPEL-описів (рис. 1). Кожний такий опис задає сценарій ОП для одержання відповідної функціональної характеристики системи. Це означає, що TLA-специфікація є формальною моделлю в загальному випадку декількох сценаріїв функціонування CWS [15]. Кожний із сценаріїв характеризується сукупністю темпоральних ознак. Для встановлення цих ознак нами використано темпоральний оператор X . Ознаки представлено у якості подій, що ініціюють продовження функціонування CWS згідно певного сценарію. Події формалізуємо в імплікативній формі, модифіковані оператором [7]:

$$\neg(v_i = d) \vee X(v_i = d + 1), \quad d = 0, 1; \quad d \in D. \quad (3)$$

Враховуючи специфіку виразів можливостей TLA, події запропонуємо класифікувати на значимі події, псевдоподії та неприпустимі події. Значимі події представлено у вигляді (3). Вони є засобами формалізації переходів $(s, s') \in R$ структури (1).

Значиму подію охарактеризуємо симетрично різницею

$$L(s)\Delta L(s') = \{(v_i = d), (v_i = d + 1)\} \subseteq AP, \quad (4)$$

де розмітки станів $L(s)$ та $L(s')$ є, відповідно, перед- та постумовими виникнення подій.

Потреба фіксації в специфікації також і псевдоподій зумовлена потребою просування модельного часу для DEVS-моделей атомарних сервісів, які при валідації продовжують або функціонувати, або простоювати:

$$\neg(v_i = d) \vee X(v_i = d), \quad d = 0, 1, 2. \quad (5)$$

Вираз (5) названо нами шаблоном псевдоподій, бо, попри імплікативну форму, він вже не характеризується множиною (4). В (3) $v_i \in V$ змінює своє значення в наступний момент модельного часу, а в (5) – ні.

Наприклад, якщо розглядати сценарій послідовних координуючих впливів на m компонентів CWS (тобто

$|V| = m$), то для просування ОП в формальній моделі кожна значима подія має супроводжуватися $m - 1$ псевдоподією.

Грунтуючись на вищезазначеному, запропонуємо формат представлення концептів значимої події та псевдоподії в TLA-специфікації:

$$(IF\ Cnd\ THEN\ (v'_i := v_i + 1) ELSE\ (v'_i := v_i)) \wedge \\ \wedge\ UNCHANGED\ << v_1, v_2, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_m >>. \quad (6)$$

Верифікація специфікацій на основі конструкцій (6) полягає у виявленні недопустимих подій – подій, що ініціюють недопустимі переходи структури (1):

$$\neg(v_i = d) \vee X(v_i = d - 1), \quad d = 1, 2. \quad (7)$$

Варто відзначити, що події (7) також характеризуються множинами (4). Відмінність їх від подій (3) полягає в наступному: передумови для (3) є постумовами для (7) і навпаки.

За умови, якщо формальну верифікацію специфікації на основі конструкцій (6) здійснено успішно – встановлено, що атомарні сервіси функціонують узгоджено та несуперечливо (коректно), переходимо до валідації (рис. 1). При цьому шляхом імітаційного DEVS-моделювання здійснимо оцінювання показників функціональних характеристик CWS, а також агрегованих значень показників нефункціональних характеристик. Для цього синтезуємо імітаційну DEVS-модель (2), архітектура та поведінка якої визначаються змістом вихідної TLA-специфікації. З цією метою запропонуємо правила синтезу названої моделі:

1) правила синтезу базових моделей AWS (табл. 1);

2) правила синтезу допоміжних базових моделей – моделі клієнта CWS (генератора заявок на обслуговування) та моделі координатора атомарних сервісів у складі CWS – для слідування моделі оркестровки згідно стандарту WS-BPEL (табл. 2);

Таблиця 1 – Правила синтезу DEVS-моделей атомарних сервісів

Мета		Вихідні TLA-конструкції	Результатуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація	значимих подій	на основі (3)	виклик функцій $ta : ST \rightarrow R_{0,\infty}^+$ та: – при $d = 0$ – $\delta_{ext}^{MA_i} : (event_i, st_0, e) \mapsto st_1$; – при $d = 1$ – $\delta_{int}^{MA_i} : st_1 \mapsto st_2 ; \lambda^{MA_i} : st_2 \mapsto res_i$.
	псевдоподій	на основі (5)	виклик функцій $ta : ST \rightarrow R_{0,\infty}^+$.

Таблиця 2 – Правила синтезу DEVS-моделей клієнта та координатора

Мета	Вихідні TLA-конструкції	Результатуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація початкового стану	$Init$	$\delta_{ext}^{MG} : (activate, st_0, e) \mapsto st_1$.
Фіксація ОП	$Calc$	$\delta_{ext}^{MC} : (job_j, st_0, e) \mapsto st_1, j = 1, 2, \dots, n$.

Таблиця 3 – Правила одержання елементів результатуючої DEVS-моделі CWS

Мета	Вихідні TLA-конструкції	Результатуючі дії над DEVS-елементами
Фіксація значимих подій	згідно (3) при $d = 0$	$set : (MC, event_i) \mapsto (MA_i, event_i)$.
	згідно (3) при $d = 1$	$set : (MA_i, res_i) \mapsto (MC, res_i)$.
Фіксація ОП	$Calc$	$set : (MG, job_j) \mapsto (MC, job_j)$.

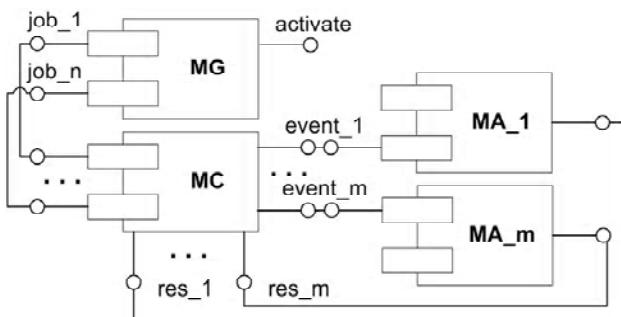


Рисунок 2 – Архітектура синтезованого засобу валідації

Модель, представлена на рис. 2, функціонує наступним чином:

1) на вхідний порт моделі (9) надходить повідомлення активації, що ініціює генерування заявок job_j . Кожна j -а заявка представляє специфікацію окремої функціональної характеристики CWS. Заявки генеруються із заданим законом розподілу;

2) на j -й вхідний порт моделі (10) надходить заявка job_j , що зумовлює $m' \leq m$ повідомень $event_i$ (оскільки певні AWS за окремого ОП можуть бути зайвими);

3) кожна із m моделей (8) виконує власну частину обчислень згідно j -го ОП. Результати обчислень відправляються до моделі (10) у вигляді повідомень res_i .

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експериментальні дослідження запропонованої методики здійснено на апаратній платформі наступної конфігурації: частота CPU 3 ГГц, обсяг RAM – 2 ГБ.

Щоб стверджувати відносно достовірності результатів валідації згідно запропонованої методики, а саме – відносно адекватності синтезованої результуючої DEVS-моделі CWS, проведемо експерименти за наступними сценаріями:

1) валідація шляхом тестування – AWS реалізуємо за технологією JAX-WS. Координування здійснимо централізовано – згідно моделі оркестровки. Таку перевірку розглядатимемо як один із завершальних кроків розробки CWS;

2) валідація шляхом моделювання – використаємо результуючу DEVS-модель CWS, синтезовану згідно запропонованих правил, у якості засобу валідації. Така перевірка є завершальним кроком проектування (рис.1).

У першому випадку за вихідні дані візьмемо WS-BPEL-опис CWS, у другому – відповідну формальну TLA-специфікацію. Порівняємо результати валідацій зазначеними шляхами (рис. 3).

На рис. 3 process.bpel – вихідний WS-BPEL-опис; spec.tla – відповідна TLA-спеціфікація; TLA-to-DEVS – програмна реалізація запропонованих правил синтезу (табл. 1–3); model.java – синтезована результуюча DEVS-модель CWS як засіб валідації; BPEL Engine – програмний засіб (sun-bpel-engine) централізованого координування AWS при валідації шляхом тестування.

Якщо, згідно рис. 3, $\xi_f^t = \xi_f^s$, а $\xi_{nf}^t \approx \xi_{nf}^s$, стверджуватимемо, що результуюча модель (2) є адекватною, а запропонована методика дозволяє одержувати достовірні

результати валідації при проектуванні CWS. При цьому вважатимемо використання запропонованої методики при проектуванні доцільним, якщо часові витрати на валідацію за сценарієм 2) будуть істотно меншими за часові витрати за сценарієм 1).

У моделі (9) реалізуємо нормальні закон розподілу заявок на обслуговування, що генеруються. DEVS-моделі реалізуємо на мові програмування Java, а моделювання здійснюватимемо у середовищі DEVS Suite.

Вихідні значення для розрахунку часових витрат одержуватимемо як середнє арифметичне 10^2 замірів. У якості нефункціональної характеристики розглядатимемо час відгуку сервісу. Для AWS такі затримки визначимо послідовністю $0, 1 \cdot 10^{-1}, 2 \cdot 10^{-1}, \dots, 5 \cdot 10^{-1}$ с: 0 – компоненти розгорнуто локально, $1 \cdot 10^{-1}$ – вони є рівно-віддаленими (значно), $2 \cdot 10^{-1}, \dots, 5 \cdot 10^{-1}$ – окрім територіальної віддаленості моделюються також додаткові затримки, зумовлені інтенсивними обчислennями. Затримки реалізуємо на основі Java-методу sleep.

Для перевірки методики розглянемо синтетичний сценарій обчислення значення π через арктангенси [16]:

$$\pi = 48 \cdot \arctg\left(\frac{1}{18}\right) + 32 \cdot \arctg\left(\frac{1}{57}\right) - 20 \cdot \arctg\left(\frac{1}{239}\right).$$

Вираз розглядатимемо як функціональну характеристику CWS, а значення-результат його обчислення – як шукане значення показника такої характеристики. Вираз також розглядатимемо як аналітичне представлення ОП. Для реалізації характеристики залучимо чотири AWS: три з них – для обчислення арктангенсів, четвертий – для одержання результатуючого значення (рис. 4).

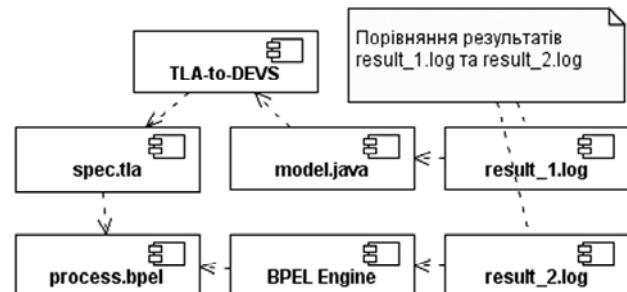


Рисунок 3 – Схема підходу до перевірки методики

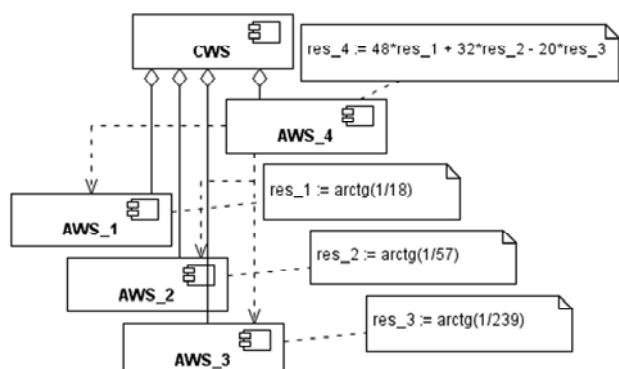


Рисунок 4 – Архітектура композитного сервісу

На рис. 4 res_1 , res_2 та res_3 – часткові результати – артефакти протікання ОП – контейнери показників функціональних характеристик атомарних сервісів AWS_1 , AWS_2 та AWS_3 , відповідно; res_4 – контейнер показника функціональної характеристики атомарного сервісу AWS_4 , який також є показником названої характеристики CWS – контейнером шуканого результату, що залежить від значень res_1 , res_2 та res_3 .

5 РЕЗУЛЬТАТИ

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що на визначеному діапазоні вхідних даних часові витрати на валідацію шляхом моделювання згідно запропонованої методики в середньому у 3,4 рази менші за витрати, пов’язані із валідацією шляхом тестування (рис. 5). Таке зменшення часових витрат нами охарактеризоване як суттєве.

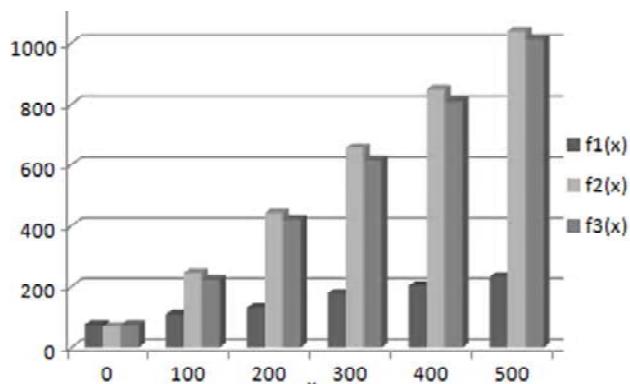


Рисунок 5 – Результати проведених експериментальних досліджень

На рис. 5 значення наведено в мс: x – заданий час відгуку кожного із чотирьох AWS у складі CWS; $f_1(x)$ – часові витрати на моделювання на основі результуючої моделі (2); $f_2(x)$ – оціночні значення показника ξ_{nf}^s ; $f_3(x)$ – фактичні значення показника ξ_{nf}^t . При цьому перевірено рівність $\xi_f^t = \xi_f^s$, що підтвердило коректність запропонованих правил синтезу. Перевірку адекватності результуючої DEVS-моделі CWS здійснено на основі статистичних критеріїв t та F для довірчої імовірності 0,95.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Попри те, що валідація шляхом моделювання згідно запропонованої методики виглядає більш пріоритетно за валідацією шляхом тестування за показником супутніх часових витрат, не менш важливим вбачається питання корисності такої перевірки. Корисність, у свою чергу, варто, на нашу думку, розглядати як певний компроміс за трьома наступними критеріями: адекватність результуючої DEVS-моделі композитному сервісу, достовірність результатів валідації та зменшення часових витрат. Останній критерій набуває особливої значимості у контексті актуальної на сьогодні ітераційної розробки. При цьому нами розглядається доцільність збільшення саме повноти відповідності TLA-специфікацій WS-BPEL-описові сервісу, що, зокрема, підвищить достовірність результатів формальної верифікації. Це, проте, ускладнить як саму запропоновану методику, так і інтеграцію її до процесу проєктування.

З позиції ітераційної розробки перспективним може бути використання комбінованого підходу до валідації, за якого, наприклад, на першій та заключній ітераціях здійснюється перевірка шляхом тестування, а на інших – шляхом моделювання. Моделювання дозволить зменшити загальні часові витрати, а тестування – одержати більш достовірні вихідні дані показників нефункціональних характеристик AWS та підтвердити придатність розробленого CWS до цільового використання.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу синтезу імітаційної DEVS-моделі CWS з вихідної формальної TLA-спеціфікації функціональних характеристик.

Наукова новизна отриманих в роботі результатів полягає в наступному: було запропоновано DEVS-орієнтовану методику валідації CWS, призначену до використання при проєктуванні. Це дозволило зменшити супутні валідації часові витрати, що було підтверджено результатами проведених експериментальних досліджень. Вони показали, що на тестовому діапазоні значень нефункціональних характеристик компонентів CWS синтезована результуюча DEVS-модель є адекватною, а правила її одержання – коректними: у порівнянні із валідацією шляхом тестування, валідація шляхом імітаційного моделювання згідно запропонованої методики супроводжувалася зменшенням часових витрат в середньому у 3,4 рази. Таке зменшення охарактеризоване нами як суттєве. Отже, поставлену задачу можна вважати вирішеною.

Практичне значення отриманих результатів полягає в автоматизації процедури валідації CWS при проєктуванні згідно запропонованої методики за рахунок програмної реалізації запропонованих правил синтезу DEVS-моделей.

Перспективи подальших досліджень полягають у адаптації запропонованої методики до більш деталізованих вихідних формальних TLA-спеціфікацій CWS, що, за рахунок поліпшення повноти таких специфікацій, дозволить одержувати більш достовірні результати валідації.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи «Дослідження і розробка методів підвищення ефективності комп’ютерних систем та мереж, пошук шляхів удосконалення навчального процесу» кафедри комп’ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges / [M. P. Papazoglou, P. Traverso, S. Dustdar, F. Leymann] // IEEE Computer. – 2007. – Vol. 40, No. 11. – P. 38–45. DOI: 10.1109/MC.2007.400.
2. Vohra D. Java 7 JAX-WS Web Services: A practical, focused mini book for creating Web Services in Java 7 / D. Vohra. – Birmingham-Mumbai: Packt Publishing Ltd., 2012. – 64 p.
3. Freeman S. Growing Object-Oriented Software, Guided by Tests / S. Freeman, N. Pryce. – New York : Addison-Wesley, 2010. – 384 p.
4. Wainer G. A. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications / G. A. Wainer, P. J. Mosterman. – New York : CRC Press, 2010. – 534 p.

5. Kindermann R. Beyond Lassos: Complete SMT-Based Bounded Model Checking for Timed Automata / R. Kindermann, T. Junttila, I. Niemela // Lecture Notes in Computer Science. Formal Techniques for Distributed Systems. – 2012. – Vol. 7273. – P. 84–100. DOI: 10.1007/978-3-642-30793-5_6.
6. Системи управління якістю. Основні положення та словник термінів (ISO 9000:2005, IDT) : ДСТУ ISO 9000:2007. – [Чинний від 2008-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України. – 29 с. – (Національний стандарт України).
7. Шкарупило В. В. Модель TLA-спецификации композитного веб-сервиса с множеством динамик / В. В. Шкарупило // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2013. – № 1. – С. 94–100. DOI: 10.15588/1607-3274-2013-1-15.
8. Карпов Ю. Г. MODEL CHECKING. Верификация параллельных и распределенных программных систем / Ю. Г. Карпов. – СПб. : БХВ-Петербург, 2010. – 560 с.
9. Шкарупило В. В. DEVS-модель как средство валидации композитных веб-сервисов распределенной системы / В. В. Шкарупило, С. Ю. Скрупський, Р. К. Кудерметов // Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво. – 2011. – № 7. – С. 61–67.
10. Lamport L. Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers / L. Lamport. – Boston: Addison-Wesley, 2002. – 364 р.
11. Шкарупило В. В. WS-BPEL-модификация метода TLC-верификации / В. В. Шкарупило // Східно-європейський журнал передових технологій. – Харків: НВП «Технологічний центр», 2013. – № 4/2 (64). – С. 23–28.
12. Cristia M. ATLA+ Encoding of DEVS Models / M. Cristia // Proc. Int. Modeling and Simulation Multiconference (Buenos Aires, Argentina, February 8–10, 2007). – P. 17–22.
13. Шкарупило В. В. Сравнительный анализ подходов к реализации процесса автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: комп'ютерні системи та компоненти. – Чернівці: ЧНУ, 2011. – Т. 2, № 4. – С. 80–85.
14. Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 [Electronic resource] : OASIS Standard, April 11, 2007. – Access mode: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>. – Title from screen.
15. Шкарупило В. В. Концептуальная модель процесса автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов, Т. А. Паромова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка. – Донецьк : ДонНТУ, 2012. – № 15 (203). – С. 231–238.
16. Шкарупило В. В. Методика автоматизированного синтеза композитных веб-сервисов / В. В. Шкарупило, Р. К. Кудерметов // Інформатика і комп'ютерні технології : VII Міжнар. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих учених, 22–23 листопада 2011 р. : тези доп. – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – Т. 1. – С. 382–384.

Стаття надійшла до редакції 11.02.2014.
Після доробки 23.02.2015.

Шкарупило В. В.¹, Кудерметов Р. К.², Польская О. В.³

¹Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

³Старший преподаватель кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

DEVS-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ВАЛИДАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ ВЕБ-СЕРВИСОВ

Предложена методика валидации композитных веб-сервисов путем синтеза имитационных дискретно-событийных моделей на основе формализма DEVS. Это позволяет осуществлять автоматизированную проверку пригодности таких систем к целевому использованию при проектировании путем имитационного моделирования. В качестве входных данных использована формальная спецификация на основе темпоральной логики TLA, что позволяет математически строго представлять функциональные характеристики композитных сервисов в формате вычислительных процессов. В качестве аналитической модели в основе TLA-спецификации взята структура Крипке. В рамках методики предложены правила синтеза из исходной TLA-спецификации DEVS-модели композитного сервиса, предназначенный быть средством валидации. Результатирующая DEVS-модель состоит из моделей атомарных сервисов, модели клиента композитного сервиса и модели координатора атомарных сервисов, функционирующего согласно спецификации WS-BPEL.

Для проверки методики проведены экспериментальные исследования, подтвердившие адекватность результатирующей DEVS-модели. Проверка выполнена согласно предложенному подходу, состоящему в сравнении результатов валидации путем имитационного моделирования с результатами валидации путем тестирования. По результатам проведенных исследований обоснована целесообразность использования предложенной методики при проектировании композитных сервисов, которая заключается в уменьшении временных затрат на валидацию. Акцентировано внимание на уместности использования методики при итерационной разработке.

Ключевые слова: SOA, WS-BPEL, композитный веб-сервис, спецификация, верификация, валидация, TLA, DEVS.

Shkarupyo V. V.¹, Kudermetov R. K.², Polska O. V.³

¹PhD, Senior Lecturer of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²PhD, Associate Professor, Head of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³Senior Lecturer of Computer Systems and Networks department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

DEVS-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МЕТОДИКА ВАЛИДАЦИИ КОМПОЗИТНЫХ ВЕБ-СЕРВИСОВ

A technique for Composite Web Services validity checking has been proposed. It is based on discrete-event DEVS-models synthesis, which provides the ability to conduct the automated validation by way of simulation during the design process. Temporal Logic of Actions has been chosen as the basis for input data – formal specification of Composite Web Service. It allows to specify the functional properties of such systems mathematically strictly. Functional properties has been represented as computational processes. The Kripke structure has been used as TLA-specification analytical model. Our technique leans on the proposed rules, aimed at simulation DEVS-model synthesis from given TLA-specification. The resulting coupled Composite Web Service DEVS-model consists of atomic web services models, model of client, simulated as job-requests generator, and coordinator model. Coordinator represents the WS-BPEL-engine, functioning in accordance with centralized orchestration model.

A case study has been conducted to verify the proposed technique. Its artifacts confirmed the adequacy of resulting DEVS-model. The technique verification is based on the proposed approach: simulation-driven validation results are compared with the ones, obtained with test-driven validation. Technique expediency has been grounded by Composite Web Services validity checking time costs reduction.

Keywords: SOA, WS-BPEL, Composite Web Service, Specification, Verification, Validation, TLA, DEVS.

REFERENCES

- Papazoglou M. P., Traverso P., Dustdar S., Leymann F. Service-Oriented Computing: State of the Art and Research Challenges. *IEEE Computer*, 2007, Vol. 40, No. 11, P. 38–45. DOI: 10.1109/MC.2007.400.
- Vohra D. Java 7 JAX-WS Web Services: A practical, focused mini book for creating Web Services in Java 7. Birmingham-Mumbai, Packt Publishing Ltd., 2012, 64 p.
- Freeman S., Pryce N. Growing Object-Oriented Software, Guided by Tests. New York, Addison-Wesley, 2010, 384 p.
- Wainer G. A., Mosterman P. J. Discrete-Event Modeling and Simulation: Theory and Applications. New York, CRC Press, 2010, 534 p.
- Kindermann R., Juntila T., Niemela I. Beyond Lassos: Complete SMT-Based Bounded Model Checking for Timed Automata, *Lecture Notes in Computer Science. Formal Techniques for Distributed Systems*, 2012, Vol. 7273, pp. 84–100. DOI: 10.1007/978-3-642-30793-5_6.
- Systemy upravlinnia yakistiu. Osnovni polozhennia ta slovnyk terminiv (ISO 9000:2005, IDT) : DSTU ISO 9000:2007. [Chynnyi vid 2008-01-01]. Kiev, Derzhspozhyvstandart Ukrayiny, 29 p. (Natsionalnyi standart Ukrayiny).
- Shkarupylo V. V. Model' TLA-spezifikacii kompozitnogo veb-servisa s mnohestvom dinamik, *Radioelektronika, informatyka, upravlinnia*, 2013, No. 1, pp. 94–100. DOI: 10.15588/1607-3274-2013-1-15.
- Karpov Yu. G. MODEL CHECKING. Verifikasiya parallel'nyx i raspredelennyx programmnyx sistem. Sankt-Peterburg, BXV-Peterburg, 2010, 560 p.
- Shkarupylo V. V., Skrupskyi S. Iu., Kudermetov R. K. DEVS-model' kak sredstvo validacii kompozitnyx veb-servisov raspredelennoj sistemy, *Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii: osvita, nauka, vyrobnytstvo*, 2011, No. 7, pp. 61–67.
- Lamport L. Specifying Systems: The TLA+ Language and Tools for Hardware and Software Engineers. Boston, Addison-Wesley, 2002, 364 p.
- Shkarupylo V. V. WS-BPEL-modifikaciya metoda TLC-verifikacii, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv, NVP «Tekhnolohichnyi tsentr», 2013, No. 4/2 (64), pp. 23–28.
- Cristia M. ATLA+ Encoding of DEVS Models, *Proc. Int. Modeling and Simulation Multiconference (Buenos Aires, Argentina, February 8–10, 2007)*, pp. 17–22.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K. Sravnitel'nyj analiz podxodov k realizacii processa avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Naukovyi visnyk Chernivetskoho natsionalnoho universytetu imeni Yuriiia Fedkovycha. Seriya: kompiuterni systemy ta komponenty*. Chernivtsi, ChNU, 2011, Vol. 2, No. 4, pp. 80–85.
- Web Services Business Process Execution Language Version 2.0 [Electronic resource] : OASIS Standard, April 11, 2007. Access mode: <http://docs.oasis-open.org/wsbpel/2.0/wsbpel-v2.0.pdf>. Title from screen.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K., Paromova T. A. Konceptual'naya model' processa avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Informatyka, kibernetika ta obchysliuvalna tekhnika*. Donetsk, DonNTU, 2012, No. 15 (203), pp. 231–238.
- Shkarupylo V. V., Kudermetov R. K. Metodika avtomatizirovannogo sinteza kompozitnyx veb-servisov, *Informatyka i kompiuterni tekhnolohii : VII Mizhnar. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv ta molodykh uchenykh, 22–23 lystopada 2011 r. : tezy dop*. Donetsk, DonNTU, 2011, Vol. 1, pp. 382–384.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 681.5.013

Дорофеев Ю. И.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры системного анализа и управления Национального технического университета «Харьковский политехнический институт», Харьков, Украина

ДЕСКРИПТОРНЫЙ ПОДХОД К СИНТЕЗУ ОГРАНИЧЕННОГО РОБАСТНОГО ГАРАНТИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЗОВАННОЙ ФУНКЦИИ ЛЯПУНОВА

Решена задача синтеза робастного гарантирующего управления запасами для сетей поставок с параметрической структурной неопределенностью в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и наличия несимметричных ограничений на значения состояний и управлений. Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Для подавления влияния внешних возмущений, моделирующих изменения спроса, одновременно с обеспечением робастной устойчивости замкнутой системы применен метод инвариантных эллипсоидов, который был усовершенствован посредством использования дескрипторного описания системы и построения параметризованной функции Ляпунова, что позволяет уменьшить степень влияния неопределенности значений транспортных запаздываний на результат синтеза управления. С помощью математического аппарата линейных матричных неравенств задача синтеза управления представлена в виде последовательности задач полуопределенного программирования, для решения которых применяются свободно распространяемые специализированные программные пакеты. В рамках предложенной методики возможен выбор оптимальных значений страховых запасов ресурсов, поскольку рассмотренное решение задает, фактически, алгоритмическую зависимость между уровнем страховых запасов и оптимальным значением критерия качества. Рассмотрен численный пример.

Ключевые слова: управление запасами, робастное управление, метод инвариантных эллипсоидов, дескрипторный подход, параметризованная функция Ляпунова, линейное матричное неравенство.

НОМЕНКЛАТУРА

$\langle+\rangle$ – псевдообращение Мура-Пенроуза;

$0_{n \times n}$ – нулевая матрица соответствующей размерности;

A – матрица динамики расширенной модели сети поставок;

B – матрица влияния управлений расширенной модели сети поставок;

B_t – матрицы влияния управлений исходной модели сети поставок;

C – матрица выходов расширенной модели сети поставок;

D – множество допустимых значений внешних возмущений;

E – матрица влияния возмущений исходной модели сети поставок;

G – матрица влияния возмущений расширенной модели сети поставок;

I_n – единичная матрица соответствующей размерности;

© Дорофеев Ю. И., 2015

DOI 10.15588/1607-3274-2015-4-13

$K(k)$ – нестационарная матрица коэффициентов обратной связи;

U – множество допустимых значений управляющих воздействий;

W_ξ – положительно определенная диагональная весовая матрица критерия качества;

W_u – положительно определенная диагональная весовая матрица критерия качества;

X – множество допустимых значений состояний;

d^{\max} – вектор верхних граничных значений внешнего спроса;

d^{\min} – вектор нижних граничных значений внешнего спроса;

$d(k)$ – вектор внешних возмущающих воздействий;

k – номер дискретного интервала времени;

m – размерность вектора управляющих воздействий;

n – количество узлов сети поставок;

u^{\max} – вектор граничных значений управляющих воздействий;

$u(k)$ – вектор управляющих воздействий;

q – размерность вектора внешних возмущений;

r – количество узлов сети, интервалы запаздывания которых варьируются;

x^{\max} – вектор граничных значений состояний;

$x(k)$ – вектор состояний исходной модели сети поставок;

ε – малая положительная константа;

$\xi(k)$ – вектор состояний расширенной модели сети поставок;

Λ – максимальное значение интервалов запаздывания материальных потоков в сети;

ЛМН – линейное матричное неравенство;

ПФЛ – параметризованная функция Ляпунова.

ВВЕДЕНИЕ

Задача управления запасами возникает в системах производства-хранения-распределения ресурсов, когда с целью удовлетворения потребительского спроса создаются запасы материальных ресурсов. Примерами могут служить производственные, транспортные системы, системы распределения ресурсов (воды, электроэнергии) и т.п., в состав которых входят поставщики сырья, производственные узлы, хранилища ресурсов и продавцы конечной продукции, тогда как потребители, формирующие заказы на поставку ресурсов, рассматриваются в качестве источников внешних возмущений. Существуют различные типы топологии подобных систем, которые определяются взаимным размещением производственных звеньев, промежуточных складов и потребителей. Если некоторые виды сырья или полуфабрикатов используются в нескольких процессах, проходящих одновременно, система приобретает эшелонированную структуру, вследствие чего рассматриваемые системы называют сетями поставок.

Предполагается, что каждый узел сети поставок в реальном времени принимает заказы от узлов, являющихся потребителями его продукции, а также от внешних потребителей, и формирует заказы узлам, которые являются для него поставщиками ресурсов. Управление запасами заключается в определении моментов времени и размеров заказов на их восполнение. Выбор стратегии управления запасами определяется характером внешнего спроса. На практике зачастую нет оснований для того, чтобы рассматривать спрос в качестве случайных, либо гармонических, либо убывающих с течением времени внешних возмущений – какая-либо дополнительная информация, кроме той, что внешний спрос является ограниченным, отсутствует.

Спецификой задачи управления запасами является наличие запаздываний по управлению, обусловленных задержками в пополнении запасов относительно моментов формирования заказов. В процессе функционирования сети поставок величины запаздываний могут отличаться от своих номинальных значений. В результате возникает необходимость обеспечения робастности системы управления запасами относительно возможных вариаций значений внешнего спроса и величин запаздывания.

Другой особенностью рассматриваемой задачи является необходимость учета структурных ограничений на объемы хранилищ и размеры заказов. В теории управления традиционно рассматривают ограничения, заданные в какой-либо норме. Однако, для задач управления запасами характерно требование неотрицательности значений переменных, что приводит к необходимости учета несимметричных ограничений на значения управляющих воздействий и состояний.

Одним из наиболее распространенных подходов к синтезу ограниченного стабилизирующего управления является построение квадратичной функции Ляпунова и использование математического аппарата ЛМН. Основным недостатком такого подхода является консерватизм полученных результатов [1], который проявляется в том, что с практической точки зрения получаемые границы робастности оказываются неоправданно заниженными. Причиной является использование единой функции Ляпунова для всех возможных вариантов реализации неопределенности модели системы и внешних воздействий.

Для уменьшения степени консерватизма используют параметризованную функцию Ляпунова. Однако, при этом полученные ЛМН содержат произведение нестационарной матрицы динамики системы на матрицу, которая участвует в построении функции Ляпунова. Для преодоления указанного недостатка применяется дескрипторный подход, который позволяет добиться разделения матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, что ведет к существенному уменьшению степени консерватизма результатов синтеза управления.

Целью работы является синтез робастной стратегии управления запасами гарантированной стоимости, которая строится на основе дескрипторного подхода и может использоваться для определения в каждый момент времени размеров заказа ресурсов с учетом несимметричных ограничений на их значения в виде функции от уровня запаса ресурсов в узлах системы, которые позволяют удерживать состояния в ограниченном компактном множестве при любых допустимых возмущениях.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для математического описания управляемой сети поставок используется дискретная модель в пространстве состояний, уравнения которой описывают изменение уровня запасов каждого вида ресурсов с течением времени. В качестве переменных состояний рассматриваются наличные уровни запаса ресурсов. Управляющими воздействиями являются размеры заказов на поставку ресурсов, формируемые узлами в текущем периоде. Размеры спроса на ресурсы, поступающие из внешней среды, выступают в качестве внешних возмущений.

Для описания запаздываний используется модель дискретной задержки, поскольку предполагается, что номинальные значения длительности транспортировки и переработки ресурсов известны и кратны некоторому периоду дискретизации. Также предполагается, что структура сети известна, а состояния доступны непосредственному измерению. Тогда математическая модель сети поставок задается разностным уравнением с запаздыванием:

$$x(k+1) = x(k) + \sum_{t=0}^{\Lambda} B_t u(k-t) + E d(k). \quad (1)$$

Предполагается, что для каждого узла сети заданы максимально допустимые уровни запаса ресурсов и максимальные размеры заказов. Тогда в процессе функционирования системы должны выполняться ограничения:

$$\begin{aligned} x(k) \in X &= \left\{ x \in \mathbb{R}^n : 0 \leq x \leq x^{\max} \right\}, \\ u(k) \in U &= \left\{ u \in \mathbb{R}^m : 0 \leq u \leq u^{\max} \right\}. \end{aligned} \quad (2)$$

Будем предполагать, что внешние возмущения удовлетворяют ограничениям:

$$d(k) \in D = \left\{ d \in \mathbb{R}^q : 0 \leq d^{\min} \leq d \leq d^{\max} \right\}.$$

Выполним преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздывания на основе расширения вектора состояний [2] путем включения в него векторов, определяющих размеры ранее заказанных ресурсов, находящихся в процессе транспортировки и переработки:

$$\xi(k) = \left[x^T(k), u^T(k-1), u^T(k-2), \dots, u^T(k-\Lambda) \right]^T. \text{ Тогда уравнения расширенной модели примут вид:}$$

$$\xi(k+1) = A\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \quad x(k) = C\xi(k), \quad (3)$$

где матрицы $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $B \in \mathbb{R}^{N \times m}$, $G \in \mathbb{R}^{N \times q}$, $C \in \mathbb{R}^{n \times N}$, $N = n + m\Lambda$ имеют соответствующую блочную структуру [3].

Рассмотрим построение матрицы динамики A расширенной модели в том случае, когда величины запаздывания управляемых потоков Λ_i , $i = \overline{1, n}$ отличаются от своих номинальных значений. В этом случае матрица становится нестационарной и в каждый момент времени $k \geq 0$ может принимать какое-либо значение из множества

$$A(\theta) = \left\{ A \in \mathbb{R}^{N \times N} : A = A_0 + \sum_{i=1}^L \theta_i(k) A^{(i)}, \theta(k) \in \Theta \right\}, \quad (4)$$

где $L = 2^r$; $\theta_i(k)$, $i = \overline{1, L}$ – набор параметров, которые описывают структурную неопределенность модели и удовлетворяют следующим требованиям:

$$\Theta = \left\{ \theta \in \mathbb{R}^L : \theta_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^L \theta_i(k) = 1 \right\}. \quad (5)$$

Таким образом, модель сети в условиях неопределенности значений запаздывания управляемых потоков может рассматриваться как выпуклый многогранник, который задается списком вершин $\{(A^{(1)}, B, G, C), (A^{(2)}, B, G, C), \dots, (A^{(L)}, B, G, C)\}$, и может быть представлена в виде модели с параметрической структурной неопределенностью следующего вида:

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A(\theta) \in \Omega = \text{Co}\{A^{(1)}, \dots, A^{(L)}\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\text{Co}\{\cdot\}$ – выпуклая оболочка; $A^{(i)}$, $i = \overline{1, L}$ – i -я вершина выпуклого множества Ω .

Запишем критерий качества в случае бесконечного временного горизонта в виде:

$$J_\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \left((\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u^T(k) W_u u(k) \right), \quad (7)$$

$$\text{где } 0 \prec W_\xi \in \mathbb{R}^{N \times N}, 0 \prec W_u \in \mathbb{R}^{m \times m}, \xi^* = \underbrace{[x^{*T}, \dots, x^{*T}]^T}_{\Lambda+1} -$$

составной вектор, у которого компоненты вектора x^* определяют размеры страховых запасов ресурсов в узлах сети и вычисляются на основании верхних граничных значений внешнего спроса с учетом запаздываний и продуктивной модели Леонтьева:

$$x^* = (I_n - \Pi)^{-1} \hat{d}, \quad \hat{d}_i = \begin{cases} \Lambda_i d_i^{\max}, & i = \overline{1, q}, \\ 0, & i = \overline{q+1, n}, \end{cases} \quad (8)$$

где $\Pi \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – продуктивная матрица, значение элемента Π_{ij} которой равно количеству единиц ресурса i , необходимому для производства единицы ресурса j .

Первое слагаемое в выражении (7) определяет размеры штрафов за отклонение текущих уровней запаса ресурсов от страховых, второе – стоимость производства и транспортировки ресурсов.

Для системы (6) с параметрической неопределенностью (4), (5) рассматривается задача синтеза робастной стратегии управления запасами, которая для любого допустимого спроса $d(k) \in D \quad \forall k \geq 0$ обеспечивает:

1) полное и своевременное удовлетворение спроса, то есть выполнение первого из ограничений (2) на значения состояний;

2) робастную устойчивость замкнутой системы при ограничениях (2) на значения управлений;

3) гарантированную стоимость управления, которая означает, что значение критерия качества (7) не превышает некоторого граничного значения.

В качестве дополнительного условия выдвигается требование снижения степени влияния изменений неопределенного вектора параметров $\theta(k)$ на результат синтеза управления.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Анализ различных подходов к управлению запасами можно найти в работе [4] и обширной библиографии к ней. Среди многообразия моделей управления запасами выделяют два основных типа: модель критических уровней и модель периодической проверки. В первом случае предполагается непрерывный контроль за состоянием запасов и размещение заказов фиксированного размера при снижении текущих запасов до некоторых критических уровней. Второй тип модели предполагает проверку уровня запасов через равные промежутки времени и размещение заказа, размер которого определяется в соответствии с выбранной стратегией.

В данной работе рассматривается модель периодической проверки, а задача управления запасами сформулирована как задача подавления влияния неслучайных ограниченных внешних возмущений, методы решения которой рассмотрены в работе [5].

Одним из подходов к данной проблематике в теории робастного управления является концепция инвариантных множеств [6]. Среди различных форм инвариантных множеств особо выделяются эллипсоиды вследствие их

простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова. При этом для синтеза оптимального регулятора требуется решить эквивалентную задачу поиска наименьшего по некоторому критерию инвариантного эллипсоида замкнутой динамической системы. В работе [5] на основе техники ЛМН устанавливается достаточное условие устойчивости замкнутой системы – это существование квадратичной функции Ляпунова, построенной на решениях системы.

После того, как были развиты вычислительные методы, основанные на идеях выпуклой оптимизации, и для их реализации были разработаны соответствующие алгоритмы и программное обеспечение [7], техника ЛМН используется в качестве общего метода анализа и синтеза динамических систем как в непрерывном, так и в дискретном времени. Однако, применение указанного подхода приводит к консервативным результатам. Это означает, что максимально допустимая величина неопределенности, при которой сохраняется робастность системы, определяется наихудшим элементом семейства. Иными словами, подход рассчитан на наихудшую возможную неопределенность, реализация которой на практике может быть крайне маловероятной.

Для преодоления указанного недостатка предлагается использовать так называемую ПФЛ (см., например, [8]). Исследования показали, что условия устойчивости, полученные на основе ПФЛ являются менее консервативными, чем те, при получении которых использовалась функция Ляпунова, не зависящая от параметра. Необходимо отметить, что большинство работ, авторы которых используют ПФЛ, посвящены анализу и синтезу динамических систем в непрерывном времени. Среди работ, в которых предлагается применять ПФЛ для систем в дискретном времени, следует отметить [9].

В настоящее время подход на основе использования ПФЛ стал мощным инструментом для анализа и синтеза линейных систем с неопределенностью различного рода. В работе [10] предложено расширение указанного подхода на основе дескрипторного описания системы, которое первоначально было предложено для исследования устойчивости и синтеза управления в системах с запаздыванием. Дескрипторный подход обладает двумя основными преимуществами: во-первых, введение дополнительных ослабляющих переменных позволяет значительно уменьшить консерватизм результатов; во-вторых, подход может быть применен не только для анализа устойчивости систем с неопределенностью, заданной в виде многогранника, но и для решения задачи синтеза оптимального регулятора.

Однако, полученные результаты напрямую неприменимы к задаче управления запасами в сетях поставок, поскольку рассматриваемая модель системы не содержит внешних возмущений, авторы не учитывают ограничения на значения состояний и управлений, а также не вводят критерий качества, позволяющий оценить стоимость полученного управления.

В результате возникает необходимость расширения метода инвариантных эллипсоидов для задач управления запасами на основе дескрипторного подхода с использованием параметризованной функции Ляпунова.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Выполним аппроксимацию множества D значений внешнего спроса эллипсоидом наименьшего объема, который задается уравнением

$$E(d^*, Q_d) = \left\{ d \in \mathbb{R}^q : (d(k) - d^*)^\top Q_d^{-1} (d(k) - d^*) \leq 1 \right\} \quad (9)$$

Матрица $Q_d \in \mathbb{R}^{q \times q}$ и вектор $d^* \in \mathbb{R}^q$ координат центра эллипса определяются в результате решения задачи полуопределенного программирования аналогично тому, как это сделано в работе [11].

Будем строить закон управления в виде линейной динамической обратной связи по сигналу рассогласования между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов

$$u(k) = K(k)(\xi(k) - \xi^*). \quad (10)$$

Тогда расширенную модель замкнутой системы для управления (10) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A_f(k, \theta)(\xi(k) - \xi^*) + A(0)\xi^* + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A_f(k, \theta) = A(0) + BK(k), \quad A(0) \in \Omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Задача синтеза управления эквивалентна решению минимаксной задачи

$$u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} \max_{d(k) \in E(d^*, Q_d), A(0) \in \Omega} J_\infty(k). \quad (12)$$

Выполним преобразование системы (6) с помощью дескрипторной системы следующего вида

$$\begin{bmatrix} I_N & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_N \\ A(0) & -I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ B \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ G \end{bmatrix} d(k). \quad (13)$$

Пусть

$$P(k, \theta) = \begin{bmatrix} P_1(k, \theta) & 0_{N \times N} \\ P_2(k) & P_3(k) \end{bmatrix},$$

где $P_i \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $i = 1, 2, 3$, $P_1(k, \theta)$ – аффинная функция от вектора параметров θ такая, что $P_1(k, \theta) = P_1^T(k, \theta) = \sum_{i=1}^L \theta_i P_{1i}(k)$, $P_{1i}(k) \succ 0$, $i = \overline{1, L}$, $P_3(k) = P_3^T(k)$.

Определим модифицированную параметризованную функцию Ляпунова, которая построена на решении системы (11), в следующем виде

$$V(\xi(k) - \xi^*, \theta) = (\xi(k) - \xi^*)^\top P_1(k, \theta)(\xi(k) - \xi^*). \quad (14)$$

Динамическая система (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) является робастно устойчивой, если $V(\xi(k) - \xi^*, \theta) > 0$ и $\Delta V(\xi(k) - \xi^*, \theta) = V(\xi(k+1) - \xi^*, \theta) - V(\xi(k) - \xi^*, \theta) < 0 \quad \forall \theta \in \Theta$ при $(\xi(k) - \xi^*) \neq 0$.

Введем обозначения $E = \begin{bmatrix} I_N & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \end{bmatrix}$,
 $\bar{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} & I_N \\ A(\theta) & -I_N \end{bmatrix}$, $\tilde{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ A(\theta) - I_N \end{bmatrix}$, $\bar{B} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ B \end{bmatrix}$,
 $\bar{G} = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ G \end{bmatrix}$, $\bar{\xi}(k) = \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix}$, $\bar{\xi}^* = \begin{bmatrix} \xi^* \\ \xi^* \end{bmatrix}$.

Вычислим первую по k разность ПФЛ (14) в силу системы (11) с учетом преобразования (13):

$$\begin{aligned} \Delta V(\xi(k) - \xi^*, \theta) &= (\xi(k+1) - \xi^*)^T P_1(k, \theta) (\xi(k+1) - \xi^*) - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} \xi(k+1) - \xi^* \\ 0_{N \times 1} \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \begin{bmatrix} \xi(k+1) - \xi^* \\ 0_{N \times 1} \end{bmatrix} - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) \end{bmatrix} - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)(\xi(k) - \xi^*) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) + \xi^* + (A(\theta) - I_N)\xi^* \end{bmatrix}^T P(k, \theta) \times \\ &\quad \times \begin{bmatrix} y(k) - \xi^* \\ A(\theta)(\xi(k) - \xi^*) + Bu(k) + Gd(k) - y(k) + \xi^* + (A(\theta) - I_N)\xi^* \end{bmatrix} - \\ &\quad - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) = \\ &= -\frac{1}{2} \left[(\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*)^T (P(k, \theta) + P^T(k, \theta)) \times \right. \\ &\quad \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ &\quad \left. - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta) E^T(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \right]. \end{aligned}$$

Потребуем, чтобы значение ПФЛ (14) с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, которая определяется значением показателя качества (7):

$$\begin{aligned} &\frac{1}{2} \left[(\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*)^T (P(k, \theta) + P^T(k, \theta)) \times \right. \\ &\quad \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ &\quad \left. - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta) E^T(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \right] \leq \\ &\leq - \left((\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u^T(k) W_u u(k) \right). \end{aligned}$$

Если последнее неравенство выполняется, то можно показать, что ПФЛ (14) $\forall k \geq 0$ определяет верхнее граничное значение критерия качества (7):

$$\max_{d(\theta) \in E(d^*, Q_d), A(\theta) \in \Omega} J_\infty(k) \leq V(\xi(k) - \xi^*, \theta).$$

Тогда задача (12) эквивалентна задаче минимизации ПФЛ (14) $u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} V(\xi(k) - \xi^*, \theta)$, для решения которой применим метод инвариантных эллипсоидов [4]. Кратко изложим идеи метода.

Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E(\xi^*, Q(k, \theta)) = \left\{ \xi \in \mathbb{R}^N : (\xi(k) - \xi^*)^T Q^{-1}(k, \theta) (\xi(k) - \xi^*) \leq 1 \right\}, \quad (15)$$

называется инвариантным по состоянию для системы (11), если из условия $\xi(0) \in E(\xi^*, Q(0, \theta))$ следует, что $\xi(k) \in E(\xi^*, Q(k, \theta)) \forall k \geq 0$. Другими словами, любая траектория системы, начавшись в инвариантном эллипсоиде, остается в нем для любого момента времени $k \geq 0$.

Эллипсоид (15) может рассматриваться в качестве аппроксимации множества достижимости замкнутой системы (11), то есть позволяет характеризовать влияние внешних возмущений и неопределенности параметров модели на траекторию замкнутой системы. Тогда минимизация в некотором смысле инвариантного эллипса (15) соответствует робастному управлению системой (11).

Сравнение выражений (14) и (15) позволяет сделать вывод, что если выполняется тождество $P_1(k, \theta) = Q^{-1}(k, \theta)$, то эллипсоид (15) представляет собой множество, находящееся внутри поверхности уровня ПФЛ (14).

Тогда задача робастной стабилизации заключается в вычислении в каждый момент времени $k \geq 0$ матрицы $K(k)$ такой, чтобы регулятор (10) обеспечивал минимизацию по некоторому критерию эллипса (15) при ограничениях (2). Выберем в качестве критерия сумму квадратов полусосей эллипса, то есть след матрицы $Q(k, \theta)$. Тогда целевая функция оптимизационной задачи будет иметь вид

$$\sum_{i=1}^L \text{trace}(P_{li}^{-1}(k)) \rightarrow \min, \quad (16)$$

то есть является нелинейной. Однако, задача (16) эквивалентна следующей задаче:

$$\sum_{i=1}^L \text{trace}(H_i(k)) \rightarrow \min \quad (17)$$

при ограничениях $\begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad H_i(k) \succ 0$, $H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}, i = \overline{1, L}$.

Указанная эквивалентность доказывается с помощью неравенств $H_i(k) \succeq P_{li}(k), i = \overline{1, L}$ и леммы Шура [8].

Тогда результат решения задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами в сетях поставок на основе параметризованной функции Ляпунова с помощью дескрипторного подхода может быть представлен в виде следующей теоремы.

Теорема. Рассмотрим систему (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) и ограничениями (2), и пусть матрицы $\hat{S}(k)$ и $\hat{Y}(k)$ получены в результате решения оптимизационной задачи (17) при ограничениях

на матричные переменные $P_{li}(k) = P_{li}^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $i = \overline{1, L}$, $P_2(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$, $S(k) \in \mathbb{R}^{m \times m}$; $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$; $Z^{(ii)} \in \mathbb{R}^{(7N+3q+m) \times (7N+3q+m)}$, $i = \overline{1, L}$; $Z^{(ij)} = Z^{(ji)T}$, $i = \overline{1, L-1}$, $j = \overline{i+1, L}$ и скалярный параметр $\alpha(k)$

$$\begin{bmatrix} Z^{(11)} & Z^{(12)} & \dots & Z^{(1L)} \\ Z^{(21)} & Z^{(22)} & \dots & Z^{(2L)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z^{(L1)} & Z^{(L2)} & \dots & Z^{(LL)} \end{bmatrix} \leq 0,$$

$$\alpha(k) > 0, \quad \begin{bmatrix} P_2(k)BB^T & BS(k) \\ S^T(k)B^T & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (18)$$

$$P_{li}(k) \succ 0, \quad H_i(k) \succ 0, \quad \begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0,$$

$$\begin{bmatrix} Q_x & C \\ C^T & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, L}, \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} Y^T(k)\varepsilon e_m(\xi(k) - \xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \leq 0,$$

$$\begin{bmatrix} Y^T(k)u^{\max}(\xi(k) - \xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (20)$$

где $Q_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$ – матрица эллипсоида наименьшего объема, который аппроксимирует множество X ; $e_m = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$,

Если задача минимизации линейной функции (17) при ограничениях (18)–(20), которая является задачей полуопределенного программирования, имеет решение, то: 1) для любого начального состояния $x(0) \geq x^{\max}$, $u(k) = 0_{m \times 1} \forall k \leq 0$ и $\forall A(\theta) \in \Omega$, а также внешнего возмущения $d(k) \in E(d^*, Q_d)$ система (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) является робастно устойчивой при ограничениях (2); 2) среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей

$$K(k) = \hat{S}^{-1}(k)\hat{Y}(k) \quad (21)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантному эллипсоиду (15) для замкнутой системы (11) в момент времени k .

Из-за ограниченности объема статьи доказательство теоремы опускаем.

Первое из ЛМН (18) гарантирует стабилизацию замкнутой системы (11) при $\forall d(k) \in E(d^*, Q_d)$ и $\forall A(\theta) \in \Omega$. Последнее из ЛМН (19), а также ЛМН (20) обеспечивают выполнение заданных ограничений (2). Отметим, что именно наличие ЛМН (20) приводит к необходимости использования нестационарной обратной связи, поскольку матрицы неравенств зависят от текущего значения вектора состояний $\xi(k)$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В качестве примера рассмотрим сеть поставок, которая изучалась в работе [2]. Модель сети описывается графом $G = (\{1, 2, 3\}, \{(2, 1), (2, 3), (3, 1)\})$. Заданы значения времени выполнения заказа в узлах сети: $T_1 = T_2 = 2$, $T_3 = 1$; и времени транспортировки ресурсов между узлами сети: $T_{2,1} = T_{3,1} = T_{2,3} = 1$.

Представим управляемые потоки u_1 и u_3 , описывающие сборочные процессы, в виде гипердуг, а также добавим поток u_2 , который описывает поставки сырья извне (см. рис. 1). Дуги d_1 и d_2 , изображенные пунктирными линиями, представляют внешний спрос. Значение времени транспортировки и количество единиц продук-

$$Z^{(ij)} = \begin{bmatrix} -P_l(k) & A^{(i)T}P_2(k)+Y(k)B^T & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & A^{(i)T}P_2(k)+Y(k)B^T & 0_{N \times q} & W_\zeta & Y^T(k)W_u \\ P_2^T(k)A^{(i)}+B^TY(k) & 4P_l(k)-2(P_2(k)+P_2^T(k)) & P_2^T(k)(A^{(j)}-I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & -2P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & (A^{(i)}-I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & (A^{(i)}-I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ P_2^T(k)A^{(i)}+B^TY(k) & -2P_2^T(k) & P_2^T(k)(A^{(j)}-I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & P_2^T(k) & P_2^T(k)G & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & Q_d^T P_2(k) & \alpha k I_q & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} \\ W_\zeta & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & -W_\zeta & 0_{N \times N} \\ W_u Y(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & -W_u \end{bmatrix}$$

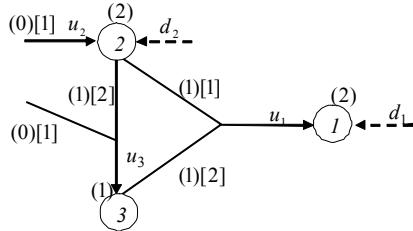


Рисунок 1 – Графическое представление модели сети поставок ции Π_{ij} , которое требуется в соответствии с технологическим процессом, указаны для каждого управляемого потока в круглых и квадратных скобках, соответственно. Возле каждого узла в круглых скобках указаны значения времени выполнения заказа T_i . Специфика рассматриваемой системы в том, что на узел 1 действует только внешний спрос; на узел 2 действует как внешний, так и внутренний спрос со стороны узлов 1 и 3; на узел 3 – только внутренний спрос со стороны узла 1.

По формуле $\Lambda_i = \max\{T_{j,i} + T_i, i, j = \overline{1,3}, j \neq i\}$ определим величины запаздывания управляемых потоков для всех узлов сети, в результате получим $\Lambda = 3$. Тогда размерность расширенной модели сети равна $N = 12$.

Заданы максимальные вместительности хранилищ узлов сети и объемы транспортировок $x^{\max} = [120, 672, 240]^T$, $u^{\max} = [25, 130, 55]^T$, а также граничные значения внешнего спроса $d^{\min} = [7, 6]^T$, $d^{\max} = [20, 18]^T$.

Пусть время транспортировки ресурсов между узлами 2 и 3 в процессе функционирования сети может увеличиваться на один период, т.е. $T_{2,3} \in \{1, 2\}$. Тогда величина запаздывания управляемых потоков узла 3 принимает значение из множества $\Lambda_3 \in \{2, 3\}$. В результате получим $A(\theta) \in \Omega = \text{Co}\{A^{(1)}, A^{(2)}\}$, где

$$A^{(1)} = \begin{bmatrix} I_3 & B_1 & B_2^{(1)} & B_3^{(1)} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}, \quad A^{(2)} = \begin{bmatrix} I_3 & B_1 & B_2^{(2)} & B_3^{(2)} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & I_3 & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$B_2^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_2^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3^{(1)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_3^{(2)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(варьируемые элементы матриц подчеркнуты).

В соответствии с (8) уровни страховых запасов равны $x^* = [60, 336, 120]^T$. Следуя [12], вычислим параметры эллипсоида, аппроксимирующего множество значений внешнего спроса: $Q_d = \text{diag}(84,5, 72,0)$, $d^* = [13,5, 12,0]^T$; а также матрицу эллипсоида Q_x , аппроксимирующую множество X допустимых значений состояний. В качестве начального состояния выбраны значения страховых запасов $x(0) = x^*$, а значения диаго-

нальных весовых матриц равны $[W_\xi]_{ii} = 2,0, i = \overline{1,12}$, $[W_u]_{jj} = 0,1, j = \overline{1,3}$.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Моделирование осуществлялось в течение 15 периодов. Результаты моделирования получены путем численного решения последовательности задач (17) при ограничениях (18)–(20) в условиях скачкообразно изменяющегося внешнего спроса с помощью свободно распространяемого пакета CVX [12]. Результаты представлены на рис. 2 – рис. 4, где a – значения наличного и страхового уровней запаса; b – значения внешнего спроса и объемов заказа.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Вначале наблюдается переходный процесс, обусловленный тем, что в момент начала моделирования каналы транспортировки ресурсов не были загружены. В 4, 9 и 14 периодах значение матрицы динамики выбиралось равным $A^{(2)}$, в остальных периодах – $A^{(1)}$, следствием чего являются скачкообразные изменения объемов заказов в указанных периодах, особенно заметные для 1 и 3 узлов. В процессе моделирования фазовая траектория замкнутой системы не выходит за пределы инвариантных эллипсоидов, размеры которых зависят от выбранных значений весовых матриц W_ξ и W_u , определяющих критерий качества системы.

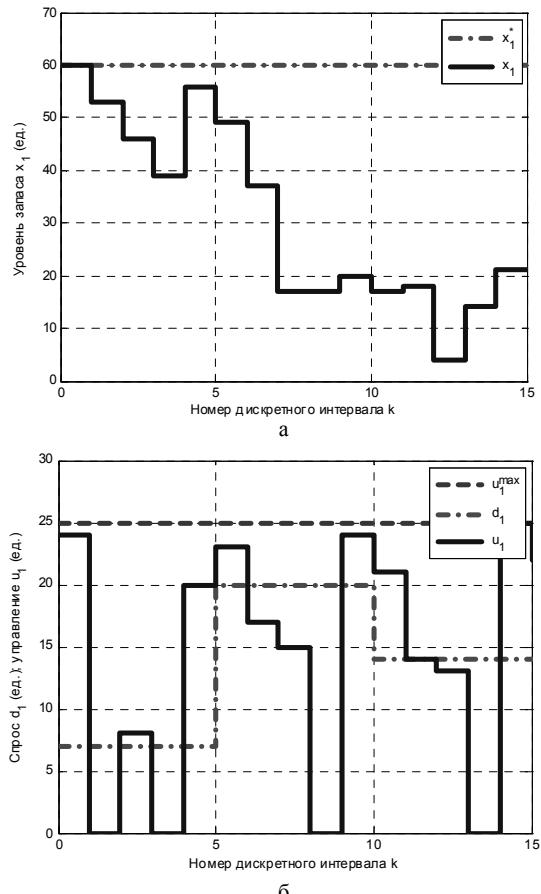


Рисунок 2 – Графики переходных процессов для узла 1

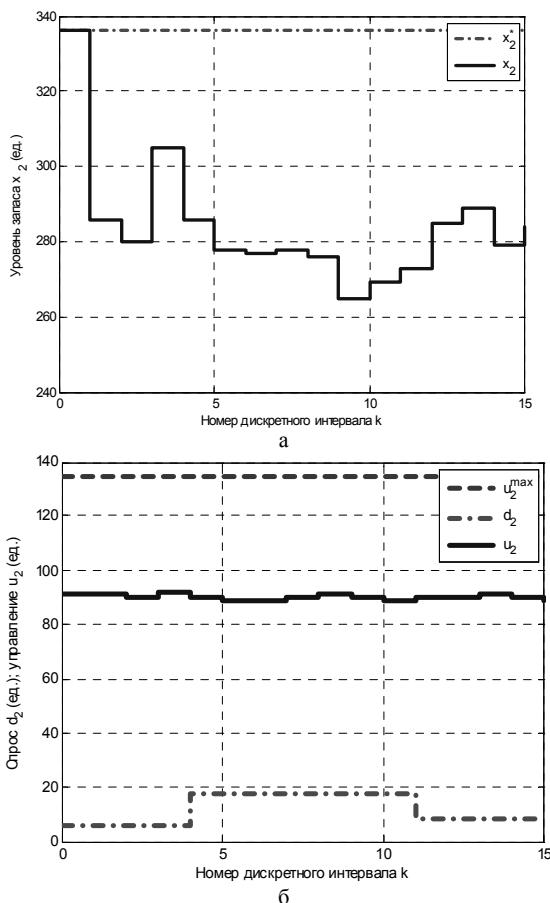


Рисунок 3 – Графики переходных процессы для узла 2

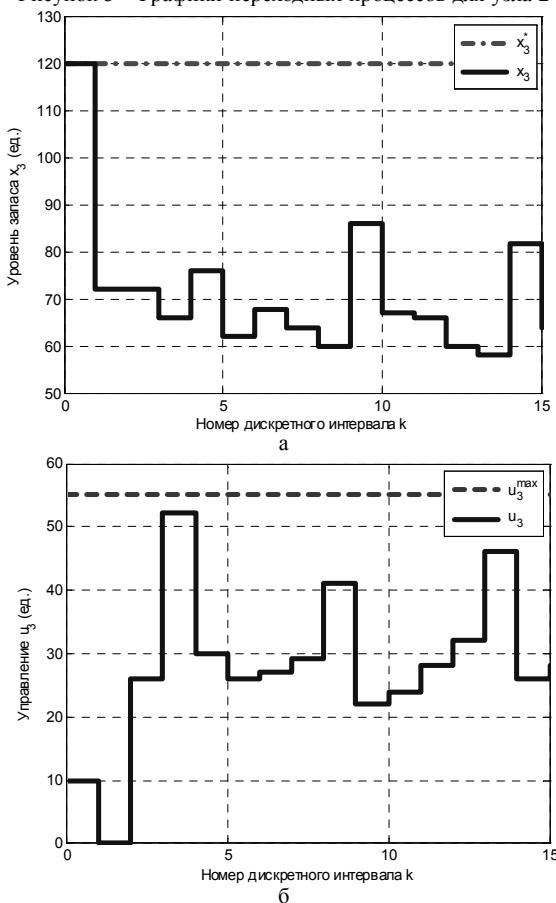


Рисунок 4 – Графики переходных процессы для узла 3

Результаты моделирования показали, что полученная стратегия управления запасами обеспечивает отсутствие дефицита ресурсов в сети, гарантированную стоимость управления, а также робастную устойчивость замкнутой системы при заданных ограничениях на состояния и управления.

ВЫВОДЫ

В статье предложен подход к решению задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами для сетей поставок с параметрической структурной неопределенностью в условиях действия неизвестного, но ограниченного внешнего спроса и наличия несимметричных ограничений на значения состояний и управлений. Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Подход основан на использовании метода инвариантных эллипсоидов и параметризованной функции Ляпунова. Использование математического аппарата ЛМН позволило сформулировать задачу синтеза управления в виде последовательности задач полуопределенного программирования, для решения которых применяются свободно распространяемые специализированные программные пакеты. С помощью дескрипторного описания системы удалось добиться уменьшения консерватизма полученных результатов, поскольку матрицы неравенств не содержат произведения нестационарной матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, а при вычислении матрицы коэффициентов обратной связи используются матрицы, не зависящие явно от неопределенных параметров модели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» «Развитие теории и методов синтеза децентрализованного робастного управления распределенными сетями поставок в условиях неопределенности» (номер государственной регистрации 0111U002285).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Щербаков П. С. Приближенные методы в параметрической робастности линейных систем управления : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.01 / Щербаков Павел Сергеевич. – М. : , 2004. – 215 с.
- Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich // IEEE Transactions on Robotics and Automation. – 2000. – Vol. 16, No. 3. – P. 313–317.
- Дорофеев Ю. И. Построение математических моделей управляемых сетей поставок с учетом запаздываний потоков / Ю. И. Дорофеев, А. А. Никульченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 1. – С. 16–27.
- Лотоцкий В. А. Модели и методы управления запасами / В. А. Лотоцкий, А. С. Мандель. – М. : Наука, 1991. – 188 с.
- Поляк Б. Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б. Т. Поляк, М. В. Хлебников, П. С. Щербаков. – М. : ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
- Blanchini R. Set-theoretic methods in control / R. Blanchini, S. Miani. – Boston: Birkhäuser, 2008. – 494 p.
- Чурилов А. Н. Исследование линейных матричных неравенств. Путеводитель по программным пакетам / А. Н. Чурилов, А. В. Гессен. – СПб: С.-Петербург. гос. ун-т, 2004. – 148 с.

8. Feron E. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions / E. Feron, P. Apkarian, P. Gahinet // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1996. – Vol. 41. – P. 1041–1046.
9. Oliveira M. C. A new discrete-time robust stability condition / M. C. Oliveira, J. Bernussou, J. C. Geromel // System & Control Letters. – 1999. – Vol. 37. – P. 261–265.
10. Zhang W. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach / W. Zhang, H. Su, Y. Liang, Z. Han // Latin American Applied Research. – 2011. – Vol. 41, No. 4. – P. 359–364.
11. Дорофеев Ю. И. Синтез системы оптимального управления запасами с дискретным ПИД-регулятором с использованием ЛМН / Ю. И. Дорофеев // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х. : ХУПС, 2014. – Вип. 4(41). – С. 34–41.
12. Grant M. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 beta / M. Grant, Boyd S // [Electronic resource]. – Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

Стаття поступила в редакцію 15.10.2015.

После дороботки 19.10.2015.

Дорофеев Ю. И.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу і управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

ДЕСКРИПТОРНИЙ ПІДХІД ДО СИНТЕЗУ ОБМЕЖЕНОГО РОБАСТНОГО ГАРАНТУЮЧОГО КЕРУВАННЯ ЗАПАСАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРИЗОВАНОЇ ФУНКЦІЇ ЛЯПУНОВА

Вирішено задачу синтезу робастного гарантуючого керування запасами для мереж поставок з параметричною структурною невизначеністю в умовах дії невідомого, але обмеженого зовнішнього попиту та наявності несиметричних обмежень на значення станів і керуючих дій. Закон керування будується у вигляді лінійного динамічного зворотного зв'язку за сигналом нев'язки між готівковими і страховими рівнями запасу ресурсів. Для подавлення впливу зовнішніх збурень, що моделюють зміни попиту, одночасно із забезпеченням робастності стійкості замкнутої системи застосований метод інваріантних еліпсоїдів, який був удосконалений за допомогою використання дескрипторного опису системи та побудови параметризованої функції Ляпунова, що дозволяє зменшити ступінь впливу невизначеності значень транспортних запізнівань на результат синтезу керування. За допомогою математичного апарату лінійних матричних нерівностей задача синтезу управління представлена у вигляді послідовності задач напіввизначеного програмування, для вирішення яких застосовуються вільно поширювані спеціалізовані програмні пакети. В рамках запропонованої методики можливий вибір оптимальних значень страхових запасів ресурсів, оскільки розглянуте рішення задає, фактично, алгоритмічну залежність між рівнем страхових запасів і оптимальним значенням критерію якості. Розглянуто чисельний приклад.

Ключові слова: керування запасами, робастне керування, метод інваріантних еліпсоїдів, дескрипторний підхід, параметрезована функція Ляпунова, лінійна матрична нерівність.

Dorofieiev Yu. I.

PhD, Associate professor, Associate professor of department of system analysis and control, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine

DESCRIPTOR APPROACH TO THE SYNTHESIS OF CONSTRAINED ROBUST GUARANTEED INVENTORY CONTROL USING PARAMETER-DEPENDENT LYAPUNOV FUNCTION

The problem of robust guaranteed inventory control synthesis for supply networks with parametric uncertainty under action of unknown, but bounded external demand and availability of non-symmetrical constraints on the values of states and controls is solved. The control law is constructed in the form of a linear dynamic feedback with respect to deviation between cash and safety stock levels of resources. In order to suppress the influence of external perturbations, modeling changes in demand, while ensuring robust stability of the closed system the method of invariant ellipsoids is used, which has been improved through the use descriptor system approach and building parameter-dependent Lyapunov function, which reduces the impact degree of uncertainty of the transport time-delays on the result of the synthesis control. With the help of the linear matrix inequalities technique the control synthesis problem is presented as a series of semidefinite programming, for solving which is used open source software. In the framework of the proposed method is possible to choose the optimal values of safety stock levels of resources, as the resulting solution determines, in fact, an algorithmic relationship between the levels of safety stocks and the optimal value of the quality criterion. The numerical example is considered.

Keywords: inventory control, robust control, invariant ellipsoids method, descriptor approach, parameter dependent Lyapunov function, linear matrix inequality.

REFERENCES

1. Shherbakov P. S. Priblizhennye metody v parametricheskoy roboustnosti linejnyh sistem upravlenija : dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk : 05.13.01 / Shherbakov Pavel Sergeevich. Moscow, 2004, 215 p.
2. Blanchini F., Pesenti R., Rinaldi F., Ukovich W. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, Vol. 16, No. 3, pp. 313–317.
3. Dorofieiev Yu. I., Nikulchenko A. A. Postroenie matematicheskikh modelей upravlyaemyh setej postavok s uchetom zapazdyvaniy potokov, *Sistemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii*, 2013, No. 1, pp. 16–27.
4. Lotockij V. A., Mandel' A. S. Modeli i metody upravlenija zapasami. Moscow, Nauka, 1991, 188 p.
5. Poljak B. T., Hlebnikov M. V., Shherbakov P. S. Upravlenie linejnimi sistemami pri vnesnih vozmushchenijah: tekhnika linejnyh matrichnyh neravenstv. Moscow, LENAND, 2014, 560 p.
6. Blanchini R., Miani S. Set-theoretic methods in control. Boston, Birkhäuser, 2008, 494 p.
7. Churilov A. N., Gessen A. B. Issledovanie linejnyh matrichnyh neravenstv. Putevoditel' po programmnym paketam. Sankt-Peterburg, SPbGU, 2004, 148 p.
8. Feron E., Apkarian P., Gahinet P. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, Vol. 41, pp. 1041–1046.
9. Oliveira M. C., Bernussou J., Geromel J. C. A new discrete-time robust stability condition, *System & Control Letters*, 1999, Vol. 37, pp. 261–265.
10. Zhang W., Su H., Liang Y., Han Z. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach, *Latin American Applied Research*, 2011, Vol. 41, No. 4, pp. 359–364.
11. Dorofieiev Yu. I. Sintez sistemy optimal'nogo upravlenija zapasami s diskretnym PID-reguljatorom s ispol'zovaniem LMN, *Zbirnik naukovih prac' Kharkiv'skogo universitetu Povitrijanij Sil*. Kharkiv, KhUPS, 2014, Vip. 4(41), pp. 34–41.
12. Grant M., Boyd S. CVX: MATLAB software for disciplined convex programming, version 2.0 beta [Electronic resource]. Access mode: <http://cvxr.com/cvx>.

УДК 519.6:004.8

Красношлык Н. А.

Канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной математики и информатики Черкасского национального университета имени Богдана Хмельницкого, Черкассы, Украина

РЕШЕНІЕ ЗАДАЧІ ГЛОБАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДИФІЦІРОВАННЫМ АЛГОРІТМОМ ЛЕТУЧИХ МЫШЕЙ

В работе рассмотрен алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации. Данный метаэвристический алгоритм относится к алгоритмам роевого интеллекта, которые интенсивно развиваются в последние годы. Целью работы является усовершенствование алгоритма летучих мышей, исследование эффективности его работы и применение для решения оптимизационных задач. Предложен модифицированный вариант канонического алгоритма, в котором для вычисления скорости движения летучих мышей применена методика алгоритма роя частиц. Проведены вычислительные эксперименты по сравнению точности и скорости сходимости канонического и модифицированного алгоритмов. Установлено, что предложенный вариант алгоритма является более эффективным при нахождении глобального минимума унимодальных и мультимодальных тестовых функций. Исследована зависимость эффективности работы модифицированного алгоритма летучих мышей от задаваемых параметров. В качестве варьируемых параметров выбраны начальные значения громкости и интенсивности звукового сигнала, испускаемого летучими мышами. Модифицированный алгоритм применен для решения практической задачи минимизации стоимости расходных материалов, необходимых для изготовления сосуда высокого давления. Проведено сопоставление полученного решения данной оптимизационной задачи с результатами других авторов, которые применяли как классические, так и популяционные алгоритмы.

Ключевые слова: алгоритм летучих мышей, популяционный алгоритм, роевой интеллект, глобальная оптимизация.

НОМЕНКЛАТУРА

A_i – громкость звукового сигнала;
 $A_i^{(t+1)}$ – громкость сигнала i -ой летучей мыши на $(t+1)$ итерации;
 $\bar{A}(t)$ – среднее значение громкости звуковых сигналов всех летучих мышей;
 c_1, c_2 – заданные константы;
 $f(x)$ – целевая функция;
 $F(x)$ – вспомогательная целевая функция;
 $g_j(x)$ – ограничения-неравенства;
 i – номер летучей мыши;
 L – длина цилиндрической части сосуда высокого давления;
 m – размерность пространства;
 N – количество летучих мышей в популяции;
 r_i – интенсивность звукового сигнала;
 $r_i^{(t+1)}$ – интенсивность сигнала i -ой летучей на $(t+1)$ итерации;
 $rand$ – случайное число из интервала $[0, 1]$;
 R – внутренний радиус цилиндрической оболочки сосуда высокого давления;
 t – номер итерации алгоритма;
 $tMax$ – максимальное число итераций алгоритма;
 T_s – толщина стенки цилиндра сосуда высокого давления;
 T_h – толщина сферической головки сосуда высокого давления;
 v_i – скорость летучей мыши;
 $v_i^{(t)}$ – скорость перемещения i -ой летучей мыши на итерации t ;
 x_i – текущее положение летучей мыши;
 $x_i^{(t)}$ – положение i -ой летучей мыши на итерации t ;

x_{\min} – минимальное значение координаты летучей мыши;
 x_{\max} – максимальное значение координаты летучей мыши;
 x^* – точка глобального минимума;
 \bar{x} – положение летучей мыши, в котором найдено лучшее глобальное решение;
 \hat{x}_i – положение летучей мыши, в котором найдено ее лучшее решение;
 X – множество допустимых решений;
 α – заданный коэффициент из интервала $[0,1]$;
 β – случайное число из интервала $[0,1]$;
 γ – заданный коэффициент;
 ε – случайное число из интервала $[-1,1]$;
 μ_j – константы штрафа;
 ξ_1, ξ_2 – случайные числа из интервала $[0,1]$;
 χ – коэффициент сжатия;
 ω_i – частота звукового сигнала;
 ω_{\min} – минимальное значение частоты звукового сигнала;
 ω_{\max} – максимальное значение частоты звукового сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Решение многих актуальных проблем в различных прикладных и фундаментальных науках сводится к задачам глобальной оптимизации. Существующие численные методы оптимизации можно условно разделить на две группы: детерминистические и стохастические. Детерминистические методы, как правило, требуют нахождение градиента целевой функции и зависят от выбора начальных значений, при фиксированном значении которых всегда приводят к тому же результату. Однако целевая функция в задачах глобальной оптимизации может быть недифференцируемой либо разрывной, или же нелинейной либо мультимодальной, усложняя тем

самым решение задачи. Для эффективного решения подобных задач широко используют стохастические методы, которые не накладывают дополнительных ограничений на поставку задачи.

Стochasticкие поисковые алгоритмы начали интенсивно развиваться в 1980-х гг., в литературе их также называют метаэвристическими, популяционными, многоагентными и алгоритмами роевого интеллекта (Swarm intelligence) [1]. Данные алгоритмы предполагают одновременную обработку нескольких возможных вариантов решения оптимизационной задачи. Еще одной особенностью подобных алгоритмов является их бионическая природа. Многоагентные алгоритмы описывают динамику поведения групп различных социальных животных, птиц, насекомых и прочих агентов некоторой биологической системы, которые локально взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Коллективное поведение группы агентов позволяет им решать различные сложные практические задачи в природе, что свидетельствует про эффективность алгоритмов роевого интеллекта, моделирующих их поведение. Поэтому актуальной является задача построения и исследования популяционных алгоритмов, а также расширение области их применения [2].

Среди многообразия популяционных алгоритмов можно выделить следующие группы: алгоритмы, инспирированные живой природой (nature-inspired algorithms); алгоритмы, инспирированные неживой природой; алгоритмы, инспирированные человеческим обществом и другие [3]. К наиболее известным алгоритмам, вдохновленным живой природой, относятся: муравьиный алгоритм (Ant Colony Optimization, 1992), метод роя частиц (Particle Swarm Optimization, 1995), бактериальная оптимизация (Bacterial Optimisation, 2002), алгоритм пчелиного роя (Bees Algorithm, 2005), алгоритм светлячков (Firefly Algorithm, 2007), поиск косяком рыб (Fish School Search, 2008), алгоритм кукушки (Cuckoo Search, 2009), алгоритм летучих мышей (Bat Algorithm, 2010) и др. Алгоритмы, инспирированные неживой природой, имитируют процессы, происходящие в физике, химии и др., в частности это: стохастический диффузионный поиск (Stochastic Diffusion Search, 1989), дифференциальная эволюция (Differential Evolution, 1997), электромагнитный алгоритм (ElectroMagnetism-like Algorithm, 2003), гармонический поиск (Harmony Search, 2008), алгоритм гравитационного поиска (Gravitational Search, 2009) и др. К алгоритмам, инспирированные человеческим обществом, принадлежат: алгоритм эволюции разума (Mind Evolutionary Computation, 1998), культурный алгоритм (Cultural Algorithm, 1994) и др.

Объектом данного исследования является процесс решения задачи глобальной оптимизации при помощи алгоритмов роевого интеллекта. Одним из новых алгоритмов данного типа является алгоритм, инспирированный поведением летучих мышей (алгоритм летучих мышей), предложенный Xin-She Yang в 2010 г. [4]. Этот алгоритм является потенциально более мощным, чем алгоритм роя частиц, генетический алгоритм, а так же гармонический поиск. Более того, гармонический поиск и алгоритм роя частиц являются особыми случаями алгоритма летучих мышей при соответствующих упрощениях [5].

Предметом исследования выступает метаэвристический алгоритм летучих мышей решения оптимизационных задач.

Целью данной работы является усовершенствование алгоритма летучих мышей, исследование эффективности его работы и применение для решения задач глобальной оптимизации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дана целевая функция $f(x)$, определенная на множестве допустимых решений $X \subseteq R^m$.

Требуется найти глобальный условный минимум функции $f(x)$ на множестве X :

$$f(x^*) = \min_{x \in X \subseteq R^m} f(x), \quad (1)$$

где $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$, $X = \{x \mid x_i \in [x_{\min}, x_{\max}], i \in \overline{1, m}\}$.

Задача поиска максимума функции $f(x)$ сводится к задаче поиска минимума:

$$f(x^*) = \max_{x \in X \subseteq R^m} f(x) = -\min_{x \in X \subseteq R^m} (-f(x)).$$

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Алгоритм летучих мышей относится к биоинспирированным алгоритмам роевого интеллекта, который основывается на их уникальных эхолокационных возможностях. Большинство видов летучих мышей обладают совершенными средствами эхолокации, которые используются ими для обнаружения добычи и препятствий. Для этого во время полета они испускают частотно-модулированные звуковые сигналы и улавливают эхо, отраженное от окружающих объектов и предметов. В разных семействах летучих мышей параметры испускаемых звуковых импульсов различаются, определяя тем самым стратегии их охоты и поведения.

Рассматриваемый алгоритм летучих мышей в целом является достаточно эффективным, однако, как и любой другой популяционный алгоритм, он не является универсальным методом решения всех оптимизационных задач. Для усовершенствования и расширения области применения алгоритма на данный момент предложено немало его модификаций. Так, автор алгоритма в 2011 г. обобщил его для многоэкстремальных оптимизационных задач, и получил многокритериальный алгоритм летучих мышей (Multi-objective Bat Algorithm) [6]. Nakamura R. и др. в 2012 г. разработали бинарный алгоритм летучих мышей (Binary Bat Algorithm) для решения задач комбинаторной оптимизации [7]. Многие модификации алгоритма летучих мышей, получают путем гибридизации как с различными популяционными алгоритмами, так и с абсолютно другими методами. Среди таких алгоритмов, например: гибридный алгоритм летучих мышей (Hybrid Bat Algorithm), который получен Fister I. J. и др. в 2013 г. [8] в результате гибридизации с алгоритмом дифференциальной эволюции; комбинированный алгоритм летучих мышей и гармонического поиска, предложили G. Wang и L. Guo [9] и т. д.

Следует отметить, что вариации алгоритма летучих мышей применяются для решения широкого круга задач.

дач, в частности это: любые оптимизационные задачи, а также задачи классификации и кластеризации объектов, анализ данных, обработка изображений, нечеткая логика и др. С обзором различных модификаций алгоритма и примерами его практического применения можно ознакомиться в [10]. Таким образом, рассматриваемый популяционный алгоритм, инспирированный поведением летучих мышей, представляет интерес для дальнейших исследований.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными составляющими алгоритма являются: особенности перемещения летучих мышей в пространстве, и характеристики испускаемых ими звуковых сигналов.

Работа алгоритма основывается на следующей модели поведения летучих мышей [4]:

1. Все летучие мыши используют эхолокацию, чтобы определять расстояние, а также различать еду/добычу и препятствия.

2. Текущее положение каждой летучей мыши обозначим x_i , из него она перемещается случайным образом со скоростью v_i . В процессе движения летучие мыши испускают звуковые сигналы, имеющие частоту ω_i и громкость A_i . При этом они могут изменять как частоту, так и интенсивность испускаемых импульсов $r_i \in [0,1]$, в зависимости от близости к цели.

3. Громкость звукового сигнала изменяется от большего начального значения A_0 до меньшего заданного A_{\min} .

Положения всех летучих мышей в начальный момент задаются случайным образом. Дальнейшее перемещение каждой из них происходит согласно следующей миграционной процедуре:

$$\omega_i = \omega_{\min} + (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \beta, \quad (2)$$

$$v_i^{(t+1)} = v_i^{(t)} + (x_i^{(t)} - \bar{x}) \cdot \omega_i, \quad (3)$$

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + v_i^{(t+1)}, \quad (4)$$

где $\omega_i \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]$.

Для определения новых положений летучих мышей, каждая из них осуществляет локальный поиск в окрестности своего текущего положения путем случайного блуждания:

$$x_i^{(new)} = x_i^{(old)} + \varepsilon \cdot \bar{A}(t). \quad (5)$$

Эволюция параметров, характеризующих испускаемые звуковые сигналы, осуществляется по формулам:

$$A_i^{(t+1)} = \alpha \cdot A_i^{(t)}, \quad (6)$$

$$r_i^{(t+1)} = r_i^{(0)} \cdot (1 - e^{-\gamma t}), \quad (7)$$

здесь рекомендуемые значения констант α и γ равны 0,9.

Согласно (6)–(7), с увеличением числа итераций громкость испускаемых звуковых сигналов будет уменьшаться,

а их интенсивность увеличиваться, моделируя этим приближение летучей мыши к цели:

$$A_i^{(t)} \rightarrow 0, r_i^{(t)} \rightarrow r_i^{(0)} \text{ при } t \rightarrow \infty.$$

Алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации (1) представим в виде следующего псевдокода:

1. Инициализация популяции: задать начальное положение x_i и скорость v_i каждой i -ой летучей мыши, $i = \overline{1, N}$.
2. Инициализация характеристик звуковых импульсов: задать частоту ω_i , интенсивность r_i и громкость A_i для каждой i -ой летучей мыши, $i = \overline{1, N}$.
3. Пока $t \leq t_{\text{Max}}$
4. Для $i = \overline{1, N}$
5. Перемещение каждой i -ой летучей мыши по формулам (2)–(4).
6. Если $rand > r_i$
7. Выполнение локального поиска в окрестности текущего положения путем случайного блуждания по формуле (5).
8. Конец если.
9. Если $rand < A_i$ и $f(x_i^{(new)}) < f(\bar{x})$
10. Новое положение принято $x_i^{(t+1)} \leftarrow x_i^{(new)}$.
11. Уменьшить A_i и увеличить r_i согласно (6)–(7).
12. Конец если
13. Обновить \bar{x} .
14. Конец для.
15. Увеличить счетчик числа итераций $t \leftarrow t + 1$.
16. Конец пока.

В каноническом варианте алгоритма случайно выбираются те летучие мыши, которые осуществляют локальный поиск, в результате которого обновляется каждая из их координат. Чтобы повысить эффективность поиска в многомерном случае, можно по аналогии выбирать случайно пространственные координаты, подлежащая изменению. Такая модификация предполагает внесение изменений в 7 строке алгоритма на следующие:

для $j = \overline{1, m}$

если $rand > r_i$

$$x_{ij}^{(new)} = x_{ij}^{(old)} + \varepsilon \cdot \bar{A}(t)$$

конец если

конец для

Также в процессе миграции летучих мышей целесообразно использовать информацию не только о глобальном лучшем решении, выбранном среди всех, но и о лучшем решении, найденном каждой летучей мышью. Модифицируем способ вычисления скорости перемещения летучих мышей, используя подход, предложенный M. Clerc и J. Kennedy для алгоритма роя частиц [11]. Результатирующая скорость каждой летучей мыши определяется следующими формулами:

$$\chi = \frac{2}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, \quad \varphi = c_1 + c_2,$$

$$\begin{aligned} \bar{v}_i^{(t+1)} &= \chi(v_i^{(t)} + c_1 \varepsilon_1 (\bar{x}_i - x_i^{(t)}) + c_2 \varepsilon_2 (\bar{x} - x_i^{(t)})), \\ v_i^{(t+1)} &= \bar{v}_i^{(t)} + (x_i^{(t)} - \bar{x}) \cdot \omega_i, \end{aligned}$$

где $c_1 = c_2 = 2,05$.

Представленные модификации позволили получить более эффективный вариант алгоритма летучих мышей для нахождения глобального минимума целевой функции.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для проведения вычислительных экспериментов выбрали ряд тестовых функций:

1. Функция де Джонга:

$$f_1(x) = \sum_{i=1}^m x_i^2, \quad -10 \leq x_i \leq 10.$$

Глобальный минимум функции $f_1(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

2. Функция Розенброка:

$$f_2(x) = \sum_{i=1}^{m-1} \left((x_i - 1)^2 + 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 \right), \quad -5 \leq x_i \leq 5.$$

Глобальный минимум функции $f_2(x^*) = 0$ при $x^* = (1, 1, \dots, 1)$.

3. Функция Растрогина:

$$f_3(x) = \sum_{i=1}^m \left(x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) \right) + 10m, \quad -5 \leq x_i \leq 5.$$

Глобальный минимум функции $f_3(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

4. Функция Экли:

$$\begin{aligned} f_4(x) &= 20 + e - 20 \exp \left(-\frac{1}{5} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \cos(2\pi x_i) \right), \\ &\quad -20 \leq x_i \leq 20. \end{aligned}$$

Глобальный минимум функции $f_4(x^*) = 0$ при $x^* = (0, 0, \dots, 0)$.

Среди представленных функций выбраны как уни-модальные функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$, так и мульти-модальные функции $f_3(x)$ и $f_4(x)$.

Для иллюстрации практического применения алгоритма рассмотрим инженерную задачу оптимизации конструкции цилиндрического сосуда высокого давления. Целевая функция определяет стоимость расходных материалов, необходимых для его изготовления. Дизайн конструкции сосуда определяется следующими параметрами: толщина стенки цилиндра $T_s(x_1)$, толщина сфери-

ческой головки $T_h(x_2)$, внутренний радиус цилиндрической оболочки $R(x_3)$, длина цилиндрической части $L(x_4)$ (см. рис. 1) [12].

В результате получаем задачу нелинейной оптимизации:

$$f(x) = 0,6224x_1x_3x_4 + 1,7781x_2x_3^2 + 3,1661x_1^2x_4 + 19,84x_1^2x_3 \rightarrow \min, \quad (8)$$

$$g_1(x) = -x_1 + 0,0193x_3 \leq 0, \quad (9)$$

$$g_2(x) = -x_2 + 0,00954x_3 \leq 0, \quad (10)$$

$$g_3(x) = -\pi x_3^2 x_4 - \frac{4}{3} \pi x_3^3 + 12960000 \leq 0, \quad (11)$$

$$g_4(x) = x_4 - 240 \leq 0, \quad (12)$$

$$x_1 \geq 1 \times 0,0625, \quad x_2 \leq 99 \times 0,0625, \quad x_3 \geq 10, \quad x_4 \leq 200. \quad (13)$$

В задаче (8)–(13) переменные x_1 и x_2 являются дискретными величинами, которые должны быть кратны 0,0625 в соответствии имеющейся толщиной листового проката стали.

Для решения представленной задачи используем метод штрафов и перейдем к следующей задаче:

$$F(x) = f(x) + \sum_{j=1}^4 \mu_j \cdot \max(0, g_j^2(x)) \rightarrow \min.$$

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Канонический и модифицированный алгоритмы реализованы в среде MATLAB R2012b. При сравнении результатов решения задачи (1) каноническим алгоритмом летучих мышей (BA) и модифицированным (MdBA), каждый алгоритм применялся для каждой функции 50 раз. Использованы следующие значения констант и параметров:

$t_{\text{Max}} = 1000$, $N = 30$, $\omega_{\min} = 0$, $\omega_{\max} = 2$, $A_i^{(0)} = 0,8$, $r_i^{(0)} = \text{rand}$, $\alpha = 0,9$, $\gamma = 0,9$. Полученные результаты для набора тестовых функций приведены в табл. 1.

Алгоритм летучих мышей содержит ряд варьируемых параметров, от значения которых, может сильно зависеть его эффективность. Исследуем зависимость эффективности работы модифицированного алгоритма от значений громкости $A_i^{(0)}$ и интенсивности $r_i^{(0)}$ звукового сигнала.

В первой серии экспериментов зафиксировали $r_i^{(0)} = 0,5$, а значение громкости изменяли в диапазоне от 0,1 до 1 при $m = 10$. В следующих экспериментах полагали $A_i^{(0)} = 0,5$, а интенсивность сигнала изменяли также от 0,1 до 1. Результаты вычислительных экспериментов представлены в табл. 2–3.

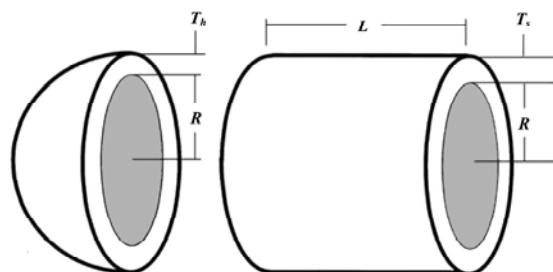


Рисунок 1 – Конструкция сосуда высокого давления

Таблица 1 – Результаты вычислительных экспериментов для тестовых функций

Функция	Размерность пространства, m	Алгоритм	Лучшее полученное значение целевой функции	Среднее среди полученных значений целевой функции	Худшее полученное значение целевой функции
$f_1(x)$	5	BA	7,5366e-03	3,9121e-01	1,3720e+00
		MdBA	1,7115e-10	4,7063e-09	3,6887e-08
	10	BA	4,3757e-01	1,8943e+00	4,0154e+00
		MdBA	1,0420e-07	5,1940e-07	1,7923e-06
	20	BA	2,2767e+00	5,6863e+00	9,1286e+00
		MdBA	1,5330e-06	7,8947e-06	2,5199e-05
$f_2(x)$	5	BA	2,8084e+00	3,2013e+01	1,0299e+02
		MdBA	2,5161e-06	2,3596e-01	3,9309e+00
	10	BA	5,8462e+01	2,2555e+02	5,6098e+02
		MdBA	3,4659e-03	8,7276e-01	9,6060e+00
	20	BA	1,6786e+02	8,7887e+02	1,7818e+03
		MdBA	7,0456e+00	1,1763e+01	1,9499e+01
$f_3(x)$	5	BA	6,0018e+00	1,6457e+01	2,7852e+01
		MdBA	3,8424e-01	2,3481e+00	6,9647e+00
	10	BA	3,3129e+01	5,3871e+01	7,2348e+01
		MdBA	1,9900e+00	6,7658e+00	1,5919e+01
	20	BA	1,0428e+02	1,4207e+02	1,6817e+02
		MdBA	5,9703e+00	1,7632e+01	3,6819e+01
$f_4(x)$	5	BA	5,7667e-01	2,3916e+00	3,8869e+00
		MdBA	1,8981e-05	3,3047e-02	1,6462e+00
	10	BA	2,0987e+00	3,2280e+00	4,0536e+00
		MdBA	3,7299e-04	2,4011e-02	1,1552e+00
	20	BA	2,6300e+00	4,2518e+00	3,5454e+00
		MdBA	1,5550e-03	2,1306e-01	2,1712e+00

Таблица 2 – Зависимость решения от начального значения громкости сигнала

	$A_i^{(0)}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f_1(x)$	7,96e-08	8,45e-08	1,10e-07	1,26e-07	1,57e-07	1,58e-07	1,69e-07	2,18e-07	2,09e-07	2,51e-07
$f_2(x)$	1,21e+01	6,28e+00	9,73e+00	8,11e+00	6,97e+00	4,85e+00	3,97e+00	3,71e+00	5,35e+00	4,95e+00
$f_3(x)$	6,94e+00	9,35e+00	9,55e+00	1,01e+01	1,23e+01	1,29e+01	1,53e+01	1,54e+01	1,47e+01	1,70e+01
$f_4(x)$	3,48e-04	3,76e-04	4,20e-04	4,45e-04	4,63e-04	4,78e-04	5,16e-04	5,63e-04	2,36e-02	9,68e-02

Таблица 3 – Зависимость решения от начального значения интенсивности сигнала

	$r_i^{(0)}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$f_1(x)$	2,18e-07	1,97e-07	1,75e-07	1,57e-07	1,41e-07	5,41e-07	5,06e-04	8,84e-02	1,36e+00	1,19e+01
$f_2(x)$	8,77e-01	9,63e-01	7,90e-01	1,56e+00	5,84e+00	1,67e+01	2,65e+01	1,47e+02	3,89e+02	4,27e+03
$f_3(x)$	1,74e+01	1,29e+01	1,19e+01	1,18e+01	1,47e+01	1,33e+01	1,21e+01	2,80e+01	4,98e+01	6,74e+01
$f_4(x)$	1,20e+00	2,22e-01	1,70e-01	6,38e-02	5,11e-04	3,38e-02	9,47e-02	1,65e+00	3,77e+00	5,19e+00

Рассмотрим изменение значения целевой функции в процессе поиска экстремума для функций Растроигина и Экли, соответствующие графики приведены на рис. 2. В каноническом и модифицированном алгоритмах полагали $m = 10$, и с учетом результатов табл. 2–3

$$A_i^{(0)} = 0,35, r_i^{(0)} = 0,4.$$

Модифицированный алгоритм летучих мышей применен для решения задачи о дизайне сосуда высокого давления (8)–(13) и получено следующее лучшее решение:

$$f(x^*) = 6059,1316103768,$$

$$x^* = (0,8125, 0,4375, 42,0984440172, 176,6366206192).$$

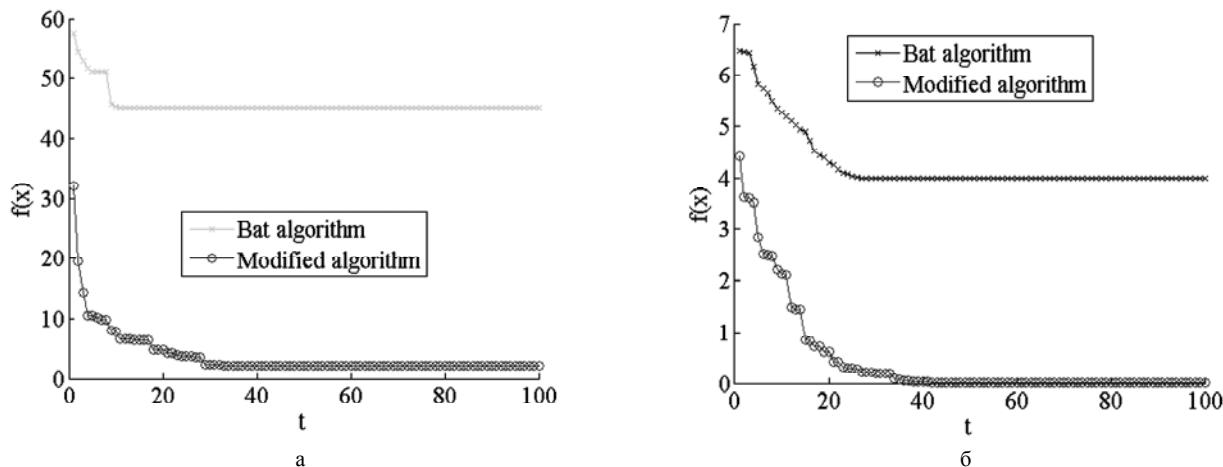


Рисунок 2 – Графики изменения значений функции:
 а – Растигина, б – Экли

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты вычислительных экспериментов показали, что модифицированный алгоритм летучих мышей является более эффективным по сравнению с каноническим вариантом для решения задачи глобальной оптимизации. Графики изменения значений целевой функции показали, что модифицированный алгоритм характеризуется более высокой скоростью сходимости и точностью нахождения оптимального значения. Недостатком модифицированного алгоритма является время его выполнения, которое больше времени выполнения канонического алгоритма. Исследована зависимость эффективности модифицированного алгоритма от таких параметров алгоритма как громкость и интенсивность звукового сигнала. Можно сделать вывод, что влияние данных параметров сильно зависит от вида целевой функции. Поэтому оптимальные значения громкости и интенсивности сигнала должны выбираться в каждом конкретном случае индивидуально, при этом отправными могут быть такие значения: $A_i^{(0)} = 0,25 \dots 0,35$, $r_i^{(0)} = 0,3 \dots 0,4$.

Решением задачи о минимизации расходов на изготовление сосуда высокого давления занимались многие авторы, применяя различные методы. Сопоставление результатов решения данной оптимизационной задачи предложенным модифицированным алгоритмом летучих мышей с некоторыми уже известными результатами приведено в табл. 4.

Из данных, представленных в табл. 4 видно, что лучшие результаты при решении задачи (8)–(13) получены с использованием популяционных алгоритмов. Значение целевой функции, полученное модифицированным алгоритмом летучих мышей меньше значений, полученных многими другими алгоритмами, использующими принципы роевого интеллекта. Это свидетельствует об эффективности предложенного алгоритма. Однако, на сегодняшний день известны новые результаты с лучшим решением, например, найденное алгоритмом серых волков [20]. Тем не менее, модифицированный алгоритм летучих мышей является достаточно конкурентоспособным для решения практических задач и предполагает дальнейшее развитие.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена задача нахождения глобального минимума целевой функции при помощи алгоритма, инспирированного поведением летучих мышей, который относится к алгоритмам роевого интеллекта.

Канонический алгоритм летучих мышей усовершенствован за счет применения методики алгоритма роя частиц для вычисления скорости движения агентов. Результаты вычислительных экспериментов показали, что модифицированный алгоритм летучих мышей характеризуется более высокой скоростью сходимости и точностью нахождения оптимального значения целевой функции.

Таблица 4 – Результаты решения задачи о дизайне сосуда высокого давления

Авторы	Метод	$f(x^*)$
E. Sandgren (1988) [13]	Метод ветвей и границ	8129,1036
B. Kannan, S. Kramer (1994) [14]	Метод множителей Лагранжа	7198,0428
Q. He, L. Wang (2007) [15]	Алгоритм роя частиц	6061,0777
E. Mezura-Montes и др. (2007) [16]	Модифицированный метод дифференциальной эволюции	6059,701660
L. Cagnina и др. (2008) [12]	Алгоритм роя частиц	6059,714335
H. Bernardino и др. (2008) [17]	Генетический алгоритм, скрещенный с алгоритмом искусственной иммунной системы (GA-AIS)	6059,85
A. Kaveh, S. Talatahari (2010) [18]	Муравьиный алгоритм	6059,7258
B. Akay, D. Karaboga (2012) [19]	Алгоритм искусственной пчелиной колонии	6059,714339
S. Mirjalili и др. (2014) [20]	Алгоритм серых волков	6051,5639
Данная работа	Модифицированный алгоритм летучих мышей	6059,131610

При помощи модифицированного алгоритма решена практическая задача о минимизации расходов на изготовление сосуда высокого давления. Найденное решение является одним из лучших, среди многих вариантов решений, полученных другими авторами с применением различных популяционных алгоритмов.

Таким образом, предложенный модифицированный алгоритм летучих мышей является эффективным методом поиска экстремума целевой функции любой сложности. Учитывая универсальность и преимущества данного алгоритма, дальнейшие исследования будут направлены на его применение в методах кластеризации, в частности для k-means.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ

1. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой : учебное пособие / А. П. Карпенко. – Москва : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 448 с.
2. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережжих моделей : монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
3. Карпенко А. П. Популяционные алгоритмы глобальной поисковой оптимизации. Обзор новых и малоизвестных алгоритмов / А. П. Карпенко // Приложение к журналу «Информационные технологии». – 2012. – № 7. – С. 1–32.
4. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm / X. S. Yang // Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010). – 2010. – Vol. 284. – P. 65–74.
5. Частикова В. А. Алгоритм летучих мышей для решения задачи глобальной оптимизации / В. А. Частикова, Е. Ф. Новикова // Научные труды КубГТУ (электронный сетевой политехнический журнал) [Электронный ресурс]. – № 2. – 2015. – Режим доступа : <http://ntk.kubstu.ru/file/348>.
6. Yang X. S. Bat algorithm for multi-objective optimization / X. S. Yang // International Journal of Bio-Inspired Computation. – 2011. – Vol. 3, № 5. – P. 267–274. DOI:10.1504/IJBIC.2011.042259.
7. M BBA: a binary bat algorithm for feature selection / [Nakamura R., Pereira L., Costa K. and other] // Conference on graphics, patterns and images (25th SIBGRAPI), August 22–25, 2012 : IEEE Publication. – P. 291–297. DOI:10.1109/SIBGRAPI.2012.47.
8. Fister I. J. A hybrid bat algorithm / I. J. Fister, D. Fister, X. S. Yang // Electrotechnical Review. – 2013. – Vol. 80, № 1–2. – P. 1–7.
9. Wang G. A Novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization / Gaige Wang, Lihong Guo // Journal of Applied Mathematics : Hindawi Publishing Corporation [Электронный ресурс]. – Vol. 2013. DOI: 0.1155/2013/696491.
10. Yang X. S. Bat algorithm: literature review and applications / Xin-She Yang, Xingshi He // International Journal of Bio-Inspired Computation. – 2013. – Vol. 5. – № 3. – P. 141–149. DOI:10.1504/IJBIC.2013.055093.
11. Clerc M. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space / M. Clerc, J. Kennedy // IEEE Transactions on Evolutionary Computation. – 2002. – Vol. 6. – № 1. – P. 58–73. DOI:10.1109/4235.985692.
12. Cagnina L. C. Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer / L. C. Cagnina, S. C. Esquivel, C. A. C. Coello // Informatica. – 2008. – Vol. 32, № 3. – P. 319–326.
13. Sandgren E. Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design / E. Sandgren // Proceedings of the ASME Design Technology Conference : Kissimine. – 1988. – P. 95–105.
14. Kannan B. An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design / B. Kannan, S. N. Kramer // Journal of mechanical design. – 1994. – Vol. 116, № 2. – P. 405–411. DOI:10.1115/1.2919393.
15. He Q. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems / Qie He, Ling Wang // Engineering applications of artificial intelligence. – 2007. – Vol. 20, № 1. – P. 89–99.
16. Multiple trial vectors in differential evolution for engineering design / Mezura-Montes E., Coello Coello C. A., Velázquez-Reyes J., Muñoz-Dávila L. // Engineering Optimization. – 2007. – Vol. 39, № 5. – P. 567–589.
17. Bernardino H. S. Anewhybrid AIS-GA for constrained optimization problems in mechanical engineering / H. S. Bernardino, H. J. C. Barbosa, A. C. C. Lemonge, L. G. Fonseca // Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 1–6 June 2008. – P. 1455–1462. DOI:10.1109/CEC.2008.4630985.
18. Kaveh A. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems / A. Kaveh, S. Talatahari // Engineering Computations. – 2010. – Vol. 27, № 1. – P. 155–182.
19. Akay B. Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization / Bahriye Akay, Dervis Karaboga // Journal of intelligent manufacturing. – 2012. – Vol. 23, № 4. – P. 1001–1014.
20. Mirjalili S. Grey wolf optimizer / S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, A. Lewis // Advances in engineering software. – 2014. – Vol. 69. – P. 46–61.

Статья поступила в редакцию 03.09.2015.

После доработки 11.10.2015.

Красношлик Н. О.

Канд. техн. наук, доцент кафедри прикладної математики та інформатики Черкаського національного університету імені Богдана Хмельницького, Черкаси, Україна

РОЗ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ ГЛОБАЛЬНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ МОДИФІКОВАНИМ АЛГОРИТМОМ КАЖАНІВ

У роботі розглянуто алгоритм кажанів для розв’язування задачі глобальної оптимізації. Даний метаєвристичний алгоритм відноситься до алгоритмів ройового інтелекту, які інтенсивно розвиваються в останні роки. Метою роботи є удосконалення алгоритму кажанів, дослідження ефективності його роботи і застосування для розв’язування оптимізаційних задач. Запропоновано модифікований варіант канонічного алгоритму, в якому для обчислення швидкості руху кажанів застосована методика алгоритму рою часток. Проведено обчислювальні експерименти з порівняння точності і швидкості збіжності канонічного та модифікованого алгоритмів. Встановлено, що запропонований варіант алгоритму є більш ефективним при знаходженні глобального мінімуму унімодальних і мультимодальних тестових функцій. Досліджено залежність ефективності роботи модифікованого алгоритму кажанів від заданих параметрів. В якості варійованих параметрів обрані початкові значення гучності та інтенсивності звукового сигналу, що випускається кажанами. Модифікований алгоритм застосований для розв’язання практичної задачі мінімізації вартості витратних матеріалів, необхідних для виготовлення посудини високого тиску. Проведено співставлення отриманого розв’язку даної оптимізаційної задачі з результатами інших авторів, які використовувати як класичні, так і популяційні алгоритми.

Ключові слова: алгоритм кажанів, популяційний алгоритм, ройовий інтелект, глобальна оптимізація.

Krasnoshlyk N. O.

PhD, Associate professor of department of informatics and applied mathematics, Bohdan Khmelnytsky National University of Cherkasy, Cherkasy, Ukraine

A MODIFIED BAT ALGORITHM FOR SOLVING GLOBAL OPTIMIZATION PROBLEM

In this paper we consider a bat algorithm for solving the problem of global optimization. This metaheuristic algorithm applies to swarm intelligence algorithms, which are developing rapidly in recent years. The aim of the work is to improve the bat algorithm, study its efficiency and application for solving optimization problems. A modified version of the algorithm in which to calculate speed of the bats used the technique of particle swarm optimization is proposed. The computational experiments have been conducted to compare the accuracy and the speed of convergence of the canonical and the modified algorithms. It was found that the proposed version of the algorithm is more effective in finding the global minimum of unimodal and multimodal test functions. The dependence of the efficiency of modified bat algorithm from the set parameters is investigated. As variable parameters chosen initial values of the loudness and pulse emission rate emitted by bats. The modified algorithm is applied to solve practical problem of minimize the cost of pressure vessel design. The comparison of the solution of the optimization problem with the results of other authors who used both classical and population algorithms was conducted.

Keywords: bat algorithm, population algorithm, swarm intelligence, global optimization.

REFERENCES

1. Karpenko A. P. Sovremennye algoritmy poiskovoj optimizacii. Algoritmy, vydohnovlennye prirodoj : uchebnoe posobie. Moscow, Izdatel'stvo MGTU im. N. Je. Baumana, 2014, 448 p.
2. Subbotin S. O., Olijnyk A. O., Olijnyk O. O. Neiteratyvni, evoljucijni ta mul'tyagentni metody syntezu nechitkologichnyh i nejomerezhnyh modelej : monografija ; pid zag. red. S. O. Subbotina, Zaporizhzhja, ZNTU, 2009, 375 p.
3. Karpenko A. P. Populacionnye algoritmy global'noj poiskovoj optimizacii. Obzor novyh i maloizvestnyh algoritmov, *Prilozhenie k zhurnalu «Informacionnye tehnologii»*, 2012, No. 7, pp. 1–32.
4. Yang X. S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm, *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization* (NICSO 2010), 2010, Vol. 284, pp. 65–74.
5. Chastikova V. A., Novikova E. F. Algoritm letuchih myshej dlja reshenija zadachi global'noj optimizacii, *Nauchnye trudy KubGTU* (jelektronnyj setevoj politematiceskij zhurnal), No. 2, 2015, <http://ntk.kubstu.ru/file/348>.
6. Yang X. S. Bat algorithm for multi-objective optimization, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2011, Vol. 3, No. 5, pp. 267–274. DOI:10.1504/IJBIC.2011.042259.
7. Nakamura R., Pereira L., Costa K., Rodrigues D., Papa J., Yang X. BBA: a binary bat algorithm for feature selection, *Conference on graphics, patterns and images* (25th SIBGRAPI), August 22–25, 2012, IEEE Publication, pp. 291–297. DOI:10.1109/SIBGRAPI.2012.47.
8. Fister I. J., Fister D., Yang X. S. A hybrid bat algorithm, *Electrotechnical Review*, 2013, Vol. 80, No. 1–2, pp. 1–7.
9. Wang G., Guo L. A Novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization, *Journal of Applied Mathematics*, Hindawi Publishing Corporation [Электронный ресурс], Vol. 2013, <http://dx.doi.org/10.1155/2013/696491>.
10. Yang X. S., He X. Bat algorithm: literature review and applications, *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2013, Vol. 5, No. 3, pp. 141–149. DOI:10.1504/IJBIC.2013.055093.
11. Clerc M., Kennedy J. The particle swarm – explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2002, Vol. 6, No. 1, pp. 58–73. DOI:10.1109/4235.985692.
12. Cagnina L. C., Esquivel S. C., Coello C. A. C. Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer, *Informatica*, 2008, Vol. 32, No. 3, pp. 319–326.
13. Sandgren E. Nonlinear integer and discrete programming in mechanical design, *Proceedings of the ASME Design Technology Conference*, Kissimmee, 1988, pp. 95–105.
14. Kannan B., Kramer S. N. An augmented Lagrange multiplier based method for mixed integer discrete continuous optimization and its applications to mechanical design, *Journal of mechanical design*, 1994, Vol. 116, No. 2, pp. 405–411. DOI:10.1115/1.2919393.
15. He Q., Wang L. An effective co-evolutionary particle swarm optimization for constrained engineering design problems, *Engineering applications of artificial intelligence*, 2007, Vol. 20, No. 1, pp. 89–99.
16. Mezura-Montes E., Coello Coello C. A., Velázquez-Reyes J., Muñoz-Dávila L. Multiple trial vectors in differential evolution for engineering design, *Engineering Optimization*, 2007, Vol. 39, No. 5, pp. 567–589.
17. Bernardino H. S., Barbosa H. J. C., Lemonge A. C. C., Fonseca L. G. A new hybrid AIS-GA for constrained optimization problems in mechanical engineering, *Congress on Evolutionary Computation* (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 1–6 June 2008, pp. 1455–1462. DOI:10.1109/CEC.2008.4630985.
18. Kaveh A., Talatahari S. An improved ant colony optimization for constrained engineering design problems, *Engineering Computations*, 2010, Vol. 27, No. 1, pp. 155–182.
19. Akay B., Karaboga D. Artificial bee colony algorithm for large-scale problems and engineering design optimization, *Journal of intelligent manufacturing*, 2012, Vol. 23, No. 4, pp. 1001–1014.
20. Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A. Grey wolf optimizer, *Advances in engineering software*, 2014, Vol. 69, pp. 46–61.

Д-р техн. наук, профессор кафедры математики Пензенского государственного технологического университета,
Пенза, Россия

ОПТИМИЗАЦІЯ В УСЛОВІЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТІ МЕТОДОМ ДЕТЕРMINІЗАЦІЇ

В статье рассмотрены существующие подходы к оптимизации (оптимальному проектированию) систем в условиях неопределенности. Данна точная постановка задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров целевой функции и ограничений. В связи с этим изложены математическая теория сравнения интервалов, включающая точное определение максимального и минимального интервалов, условия существования таких интервалов и алгоритмы их отыскания. Предложена идея решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности ее параметров. Эта идея основана на правилах математической теории сравнения интервалов, позволяющих заменить сравнение интервалов и выделение максимального и минимального интервала сравнением их нижних и верхних границ. На базе предложенной идеи сформулирован и обоснован метод детерминизации, позволяющий решить задачу условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров путем ее сведения к двум полностью определенным задачам оптимизации того же типа. Сформулирована и доказана теорема, определяющая решение задачи условной оптимизации в условиях интервальной неопределенности параметров через решения двух указанных полностью определенных задач оптимизации. Также сформулирована и доказана теорема, определяющая необходимое и достаточное условие существования решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности. Построен четырехшаговый алгоритм решения задачи условной оптимизации при интервальной неопределенности параметров, который реализует метод детерминизации. Приведен пример работы алгоритма; в качестве решаемой задачи выбрана интервальная задача о назначениях. Проведено сравнение изложенного подхода к решению задач условной оптимизации с неполностью определенными параметрами с другими методами решения таких задач (детерминированный, вероятностный и нечеткий). Указаны достоинства и недостатки различных методов. Подчеркнуто, что предложенный подход позволяет сводить оптимизацию неполностью определенных функций к оптимизации полностью определенных функций строго математически, а не эвристически, как это делается в других известных подходах.

Ключевые слова: оптимизация, неопределенность, оптимизация при интервальной неопределенности, метод детерминизации.

НОМЕНКЛАТУРА

x_1, \dots, x_n – вещественные независимые переменные;
 y – вещественная зависимая переменная;
 F, F_1, F_2 – детерминированные целевые функции;
 a, a_i, b, b_i – вещественные числа;
 Φ, Φ_1, Φ_2 – детерминированные функции ограничений;
 $\tilde{F} = [F_1, F_2]$ – интервальная целевая функция;
 $\tilde{\Phi} = [\Phi_1, \Phi_2]$ – интервальные функции ограничений;
 $\tilde{a} = [a_1, a_2], \tilde{b} = [b_1, b_2]$ – интервальные числа;
 $\tilde{p} = [p_1, p_2], \tilde{q} = [q_1, q_2]$ – интервальные параметры;
 \vee – символ дизъюнкции (взятия максимума);
 \wedge – символ конъюнкции (взятия минимума);
 \cap – символ пересечения множеств.

ВВЕДЕНИЕ

Задачи оптимизации имеют огромное прикладное значение: на их основе строятся методы оптимального проектирования разнообразных систем – технических, экономических, социальных и т.д., обеспечивающие достижение наилучшего, в определенном смысле, результата работы создаваемой системы. В связи с этим к настоящему времени уже создано огромное число методов решения задач оптимизации, как универсальных, рассчитанных на применение к задачам различных классов, так и специализированных, позволяющих эффективно решать лишь отдельные узкие классы задач [1–6] (см. также работы автора последних лет [7–12]).

Но при всем различии существующих методов, они все обладают общим свойством – применимостью только

к тем задачам оптимизации, в которых оптимизируемая функция известна точно (детерминирована). Между тем, встречающиеся на практике задачи оптимизации и оптимального проектирования таковы, что их оптимизируемые функции обычно известны не точно, а с той или иной степенью неопределенности (недетерминированы). Это обычно вызывается тем, что 1) реальным процессам свойственна естественная неопределенность; 2) параметры большинства систем из-за погрешности вычислений (измерений) известны неточно; 3) параметры многих систем изменяются во времени.

В связи с этим, возникает проблема оптимизации неполностью определенных (недетерминированных) функций. Данная проблема достаточно сложна, по сравнению с традиционной оптимизацией полностью определенных (детерминированных) функций, поскольку для нее дополнительно необходимо: 1) обобщить понятие экстремума функции; 2) выяснить условия существования экстремума функции, связанные с ее недетерминированностью; 3) разработать специальные методы поиска экстремума таких функций.

Реально эта проблема еще сложнее, поскольку имеющаяся информация об оптимизируемой функции может быть не только неполностью определенной, но и неоднозначной, неточной, противоречивой и т.д. В такой ситуации некоторые авторы считают, что модели для описания сложных систем могут быть смысловыми, носящими содержательно-описательный, словесный характер. Такой взгляд представляется не вполне логичным. Действительно, математика, как известно, строится как полностью определенная, однозначная, точная и не-

противоречивая наука. Поэтому правильное применение математики к описанию сложных систем – неопределенных, неоднозначных, неточных противоречивых и т.д. – вполне может давать адекватные математические модели этих систем, лишенные неопределенности, неоднозначности, неточности и противоречивости. Для этого требуется всего лишь подобрать математический аппарат, который позволяет оперировать с неопределенностью и другими НЕ-свойствами исследуемой сложной системы так же точно и однозначно, как классическая математика оперирует с полностью определенными системами.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем рассматривать следующую ситуацию. Пусть, существует некоторая произвольная непрерывная функция n переменных

$$y = F(x_1, \dots, x_n), \quad (1)$$

причем все параметры (коэффициенты) ее явного представления известны точно и пусть она определена в области, определяемой системой ограничений

$$\Phi_i(x_1, \dots, x_n) \leq b_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (2)$$

Тогда относительно функции (1) можно сформулировать полностью определенную (детерминированную) задачу условной оптимизации

$$F(x_1, \dots, x_n) = \max, \text{ при } \Phi_i(x_1, \dots, x_n) \leq b_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (3)$$

Конечно, возможен и вариант задачи (3), где необходимо не максимизировать, а минимизировать функцию F . В современном математическом программировании есть множество методов эффективного решения задач (3), ориентирующихся на тип функций F и $\Phi_i, i = \overline{1, m}$.

Пусть теперь параметры $p_k, k = \overline{1, l}$ явного представления функции F известны не точно, а с точностью до интервалов возможных значений, т. е. имеют вид интервалов $\tilde{p}_k = [p_{k1}, p_{k2}]$. Далее, пусть аналогичным образом неточно заданы параметры q_s явного представления функций Φ_i в левых частях ограничений задачи, а также и параметры b_i в правых частях ограничений, т.е. $\tilde{q}_{si} = [q_{s1}, q_{s2}], s = \overline{1, t}, \tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}], i = \overline{1, m}$. Тогда функции F и $\Phi_i, i = \overline{1, m}$, также становятся интервальными (т. е. принимающими вид интервалов \tilde{F} и $\tilde{\Phi}_i, i = \overline{1, m}$), определяемыми с точностью до интервалов возможных значений, равно как и параметры $b_i, i = \overline{1, m}$ (т.е. принимающие вид интервалов $\tilde{b}_i, i = \overline{1, m}$). В итоге полностью определенная задача условной оптимизации (3) переходит в неполностью определенную – интервальную задачу

$$\tilde{F}(x_1, \dots, x_n) = \max, \text{ при } \tilde{\Phi}_i(x_1, \dots, x_n) \leq \tilde{b}_i, i = \overline{1, m} \}. \quad (4)$$

Конечно, возможен вариант задачи (4), где требуется не максимизировать, а минимизировать функцию \tilde{F} . Необходимо разработать методику решения оптимизационной задачи (4).

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Есть различные подходы к поиску оптимума неполностью определенных (недетерминированных) функций, различающиеся достоинствами и недостатками [13]. Первый из них – детерминированный – заключается в решении задачи оптимизации для определенных значений или сочетаний значений параметров оптимизируемой функции, взятых внутри заданных областей их неопределенности [13]. Можно взять наихудшее сочетание значений параметров внутри областей неопределенности (пессимистический подход) [13–16], их наилучшее сочетание (оптимистический подход) [17], центры областей неопределенности параметров (центральный подход) [18] и др. Основное достоинство подхода – простота интерпретации полученного решения, основной недостаток – слабо мотивированная ориентировка на какое-то одно значение (сочетание значений) параметров, которое на практике реализуется очень редко, что может обернуться неоправданной сложностью решения. Второй подход – вероятностный – состоит в решении задачи оптимизации для усредненных (ожидаемых, в смысле математического ожидания) значений параметров оптимизируемой функции или для таких значений параметров, которые обеспечивают достаточно высокую вероятность получения оптимума [19–22]. Этот подход предполагает задание вероятностных распределений указанных параметров внутри областей их неопределенности. Основное достоинство этого подхода – ориентировка получаемого решения хотя и на одно, но зато наиболее часто встречающееся (наиболее подходящее для получения оптимума) значение (сочетание значений) параметров функции, недостаток – необходимость знания вероятностных распределений параметров, что на практике часто невозможно. Третий подход – нечеткий – идеально близок второму, но в нем вместо вероятностных распределений параметров неполностью определенной функции, являющихся объективными характеристиками, используются нечеткие распределения параметров, получаемые эксперты путем, т.е. субъективно [12].

В наших работах [23–28] был предложен и детально описан применительно к различным оптимизационным задачам детерминационный подход к поиску оптимума неполностью определенных функций. Этот подход принципиально отличается от трех предыдущих тем, что оптимизация неполностью определенной функции проводится с учетом всего множества возможных значений недетерминированных параметров функции.

Указанный подход позволяет для любой функции, неопределенность которой заключается в том, что ее параметры известны нам лишь с точностью до интервалов возможных значений, свести нахождение оптимума такого типа функции к нахождению одноименных оптимумов двух полностью определенных функций. Таким образом, для нахождения оптимума неполностью определенных функций становится возможным применять многочисленные хорошо известные и эффективно работающие методы точного нахождения оптимума полностью определенных (детерминированных) функций. При этом собственно алгоритм нахождения оптимума неполностью определенной (недетерминированной)

функции оказывается полностью определенным, однозначным, точным и непротиворечивым. Другой причиной выбора неопределенности именно интервального типа было то, что интервальные оценки неизвестных параметров систем наиболее просты и доступны для получения. В этом заключаются основные достоинства предложенного нами подхода к оптимизации неполностью определенных функций – метода детерминизации. Разумеется, у нашего метода есть и другие достоинства, а также и недостатки. Они подробно рассмотрены в п. 6.

В настоящей работе детерминационный подход к оптимизации неполностью определенных функций излагается и обосновывается в наиболее общем виде, не зависящем от особенностей оптимизируемых функций.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$. Попытаемся сравнить эти интервалы по величине, рассматривая их как интервальные числа. Первое, что приходит в голову, – сравнить интервалы \tilde{a} и \tilde{b} на основе отношений в отдельных парах вещественных чисел (a_i, b_j) , где $a_i \in \tilde{a}, b_j \in \tilde{b}$. Но такой подход сразу ведет к провалу, поскольку в общем случае, при произвольных интервалах \tilde{a} и \tilde{b} , одни пары чисел (a_i, b_j) будут находиться в отношении $a_i > b_j$, а другие – в противоположном отношении: $a_i < b_j$. Поэтому единственное, что остается, – реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая их как целое, не подлежащее дроблению на части. Этот путь был реализован автором в 1990-е годы. Ниже приводится краткое изложение разработанных методов [23–28].

Итак, в соответствии с полученными только что выводами, операции взятия максимума \vee и минимума \wedge двух произвольных интервалов $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ введем в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a} \vee \tilde{b} = \{a \vee b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \quad \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \{a \wedge b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (5)$$

Взятие максимума (минимума) двух интервалов \tilde{a} и \tilde{b} определяется по формулам (5) как нахождение максимума (минимума) двух точечных величин a и b , при условии, что эти величины пробегают все возможные значения соответственно из интервалов \tilde{a} и \tilde{b} . Теперь для того чтобы интервалы \tilde{a} и \tilde{b} можно было сравнить по величине, установив отношение $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо, во-первых, чтобы введенные операции \vee, \wedge над этими интервалами существовали, во-вторых, чтобы эти операции давали в результате один из операндов – \tilde{a} или \tilde{b} , и, в-третьих, чтобы эти две операции были согласованы, в том смысле, что если большим (меньшим) является один из интервалов, то меньшим (большим) является другой из них. Сформулированное условие сравнимости двух интервалов по величине является, очевидно, не только необходимым, но и достаточным.

К счастью, нетрудно доказать, что условие согласованности операций \vee и \wedge над интервалами выполняется

всегда, т.е. для любой пары интервалов (\tilde{a}, \tilde{b}) . Очевидно также, что всегда выполняется условие существования введенных операций вычисления максимума и минимума двух интервалов, причем результатом операции оказывается некоторый, вообще говоря, новый интервал, который может отличаться как от \tilde{a} , так и от \tilde{b} . Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости интервалов \tilde{a} и \tilde{b} является условие, по которому операции $\tilde{a} \vee \tilde{b}$ и $\tilde{a} \wedge \tilde{b}$ должны иметь результатом один из интервалов – \tilde{a} или \tilde{b} . Последняя формулировка условия сравнимости интервалов открывает возможность получения его в конструктивной форме, пригодной для практического применения. Основной результат здесь формулируется следующим образом.

Теорема 1. Для того чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были сравнимы по величине (отношению \geq) и находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы границы этих интервалов подчинялись условиям

$$a_1 \geq b_1, \quad a_2 \geq b_2, \quad (6)$$

а для того чтобы они были сравнимы по величине (отношению \leq) и находились в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия

$$a_1 \leq b_1, \quad a_2 \leq b_2. \quad (7)$$

Эта теорема показывает, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} являются сравнимыми по отношению \geq или \leq (и находятся именно в этом отношении) только в том случае, когда в таком же отношении находятся их одноименные границы a_1, b_1 и a_2, b_2 . Иными словами, интервалы \tilde{a} и \tilde{b} находятся в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ только тогда, когда \tilde{a} сдвинут обеими границами вправо относительно \tilde{b} и находятся в противоположном отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$ только тогда, когда интервал \tilde{a} сдвинут обеими границами влево относительно \tilde{b} .

Значение теоремы 1 заключается в том, что она сводит сравнение двух интервалов и выбор большего (меньшего) из них к сравнению одноименных границ этих интервалов, являющихся вещественными числами. Так разрешается проблема сравнения интервалов.

Теорема 2. Для того чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были не сравнимы по величине (по отношению \geq и \leq), т.е. не находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно, чтобы выполнялись условия

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \quad \text{или} \quad (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \quad (8)$$

Эта теорема показывает, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} не сравнимы по отношениям \geq и \leq только в том случае, когда один из них полностью «накрывает» другой. Значение теоремы 2 заключается в том, что она показывает сущ-

ствование определенных случаев несравнимости интервалов по отношениям \geq и \leq , в отличие от вещественных чисел, которые всегда сравнимы по указанным отношениям. Несравнимость некоторых интервалов есть естественный результат того, что интервальные числа, в отличие от обычных вещественных чисел, задаются не точно, а с неопределенностью (число принимает некоторое значение в заданном интервале, но не уточняется, какое именно это значение). На основании теорем 1, 2 можно доказать следующие положения.

Теорема 3. Для того чтобы в системе интервалов $\tilde{a}(1) = [a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2) = [a_1(2), a_2(2)]$, ... существовал максимальный интервал (который находится со всеми остальными интервалами в отношении \geq), необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{array}{l} a_1(1) \geq a_1(2), a_1(1) \geq a_1(3), \dots \\ a_2(1) \geq a_2(2), a_2(1) \geq a_2(3), \dots \end{array} \right\}. \quad (9)$$

Конкретные условия (9) даны для случая, когда максимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что, очевидно, не ограничивает общности.

Теорема 4. Для того чтобы в системе интервалов $\tilde{a}(1) = [a_1(1), a_2(1)]$, $\tilde{a}(2) = [a_1(2), a_2(2)]$, ... существовал минимальный интервал (который находится со всеми остальными интервалами в отношении \leq), необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{array}{l} a_1(1) \leq a_1(2), a_1(1) \leq a_1(3), \dots \\ a_2(1) \leq a_2(2), a_2(1) \leq a_2(3), \dots \end{array} \right\}. \quad (10)$$

Аналогично теореме 3 условия (10) записаны для случая, когда минимальным является интервал $\tilde{a}(1)$, что не ограничивает общности.

Теоремы 3 и 4 показывают, что интервал является максимальным (минимальным) в системе интервалов только в том случае, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница – среди нижних границ всех интервалов – и верхняя граница – среди верхних границ всех интервалов.

Теперь мы можем легко описать принцип детерминизации. В интервальной задаче (4) целевая функция $\tilde{F}(x_1, \dots, x_n)$, функции $\Phi_i(x_1, \dots, x_n)$, $i = \overline{1, m}$, в левых частях ограничений и параметры \tilde{b}_i , $i = \overline{1, m}$, в их правых частях являются интервальными и поэтому могут быть записаны в виде интервалов

$$\begin{aligned} \tilde{F}(x_1, \dots, x_n) &= [F_1(x_1, \dots, x_n), F_2(x_1, \dots, x_n)], \\ \tilde{\Phi}_i(x_1, \dots, x_n) &= [\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n), \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n)], \quad i = \overline{1, m}, \\ \tilde{b}_i &= [b_{i1}, b_{i2}], \quad i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad (11)$$

После соответствующих замен сформулированную ранее задачу (4) можно переписать в явном интервальном виде

$$\begin{aligned} [F_1(x_1, \dots, x_n), F_2(x_1, \dots, x_n)] &= \max, \\ [\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n), \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n)] &\leq [b_{i1}, b_{i2}], \quad i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad (12)$$

который поддается решению. Действительно, согласно теореме 3 интервальное уравнение в (12) можно записать в виде эквивалентной пары обычных (детерминированных) уравнений

$$F_1(x_1, \dots, x_n) = \max, \quad F_2(x_1, \dots, x_n) = \max. \quad (13)$$

Далее, согласно приведенному выше утверждению теоремы 1 систему интервальных неравенств в условии оптимизационной задачи (12) можно записать в виде эквивалентной системы обычных (детерминированных) неравенств

$$\Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) \leq b_{i1}, \quad \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) \leq b_{i2}, \quad i = \overline{1, m}. \quad (14)$$

Соединяя пару уравнений оптимизации (13) с системой неравенств-ограничений (14) получим 2 детерминированные (полностью определенные) задачи условной оптимизации вида (3), при этом первую из новых задач назовем нижней граничной задачей исходной интервальной задачи (4), а вторую – ее верхней граничной задачей:

$$\begin{aligned} F_1(x_1, \dots, x_n) &= \max, & \Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i1}, i = \overline{1, m}, \\ \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i2}, i = \overline{1, m}, \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} F_2(x_1, \dots, x_n) &= \max, & \Phi_{i1}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i1}, i = \overline{1, m}, \\ \Phi_{i2}(x_1, \dots, x_n) &\leq b_{i2}, i = \overline{1, m}. \end{aligned} \quad \left. \right\} \quad (16)$$

Из выполненного нами построения следует, что пара детерминированных задач условной оптимизации (15), (16), рассматриваемых в совокупности, эквивалентна исходной интервальной задаче (4). Таким образом, для получения решения интервальной задачи (4) надо решить ее нижнюю (15) и верхнюю (16) граничные задачи, выделив соответствующие два множества точек решений, а затем взять какую-нибудь одну точку из пересечения этих множеств, которая и будет точкой решения интервальной задачи (4). В общем случае решения нижней (15) и верхней (16) граничных задач имеют вид $\{M_H(x), F_{1,\max}\}$, $\{M_B(x), F_{2,\max}\}$, где $M_H(x)$, $M_B(x)$ – множества точек решений $x = (x_1, \dots, x_n)$ нижней и верхней граничной задачи, $F_{1,\max}$, $F_{2,\max}$ – максимальные значения целевых функций этих задач. Так что решение x^*, \tilde{F}_{\max} интервальной задачи (4) составляется из решений ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач в виде

$$\{x^* \in M_H(x) \cap M_B(x), \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\}. \quad (17)$$

В качестве точки решения x^* в выражении (17) берется любая точка из пересечения множеств точек решения нижней (15) и верхней (16) граничных задач, а в качестве максимального значения целевой функции \tilde{F}_{\max} – интервал от максимального значения целевой функции нижней граничной задачи $F_{1,\max}$ до максимального значения целевой функции верхней задачи $F_{2,\max}$. Изложенные в данном разделе результаты можно суммировать в виде теоремы.

Теорема 5. Множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ интервальной задачи условной оптимизации (4) равно пересечению множеств точек решения ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач. Максимальное значение целевой функции задачи 4 равно интервалу, нижняя граница которого равна максимальному значению целевой функции нижней граничной задачи, а верхняя граница – максимальному значению целевой функции верхней граничной задачи.

Из теоремы 5 вытекает нижеследующая

Теорема 6. Для того чтобы интервальная задача условной оптимизации (4) имела решение, необходимо и достаточно, чтобы пересечение множеств точек решения ее нижней (15) и верхней (16) граничных задач было непусто.

Основное преимущество нашего подхода к решению интервальной задачи условной оптимизации заключается в возможности использования для этого традиционных, хорошо разработанных методов решения детерминированных задач условной оптимизации. Основанный на этом подходе метод решения интервальной задачи условной оптимизации естественно назвать методом детерминизации, поскольку он сводит решение недетерминированной задачи (4) к решению двух детерминированных задач (15) и (16).

4 РЕЗУЛЬТАТИ

Из изложенного в п. 3 следует, что для решения интервальной задачи условной оптимизации (4) методом детерминизации необходимо действовать по следующему алгоритму.

Шаг 1. Используя формулы интервальной математики, выражающие результаты элементарных преобразований интервалов [18]

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ [a_1, a_2] - [b_1, b_2] &= [a_1 - b_1, a_2 - b_1]; \\ k[a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] = [\min_{i,j}(a_i \cdot b_j), \max_{i,j}(a_i \cdot b_j)]; \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1], \end{aligned} \quad (18)$$

представляем целевую функцию \tilde{F} и функции ограничений $\tilde{\Phi}_i$ задачи (4) в интервальной форме. Так же представляем параметры b_i в ограничениях. Полученные выражения имеют вид (11).

Шаг 2. Используя интервальные представления целевой функции, функции ограничений и параметров, полученные на шаге 1, формируем нижнюю (15) и верхнюю (16) граничные задачи интервальной задачи условной оптимизации (4).

Шаг 3. Используя подходящие методы решения детерминированных задач условной оптимизации, получаем решения нижней $\{M_H(x), F_{1,\max}\}$ и верхней $\{M_B(x), F_{2,\max}\}$ граничных задач. Здесь $M_H(x)$ – множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ нижней граничной задачи, в которых ее целевая функция F_1 достигает максимума $F_{1,\max}$, а $M_B(x)$ – множество точек решения $x=(x_1, \dots, x_n)$ верхней граничной задачи, в которых целевая функция F_2 достигает $F_{2,\max}$.

Шаг 4. Выбирая в качестве точки решения задачи (4) любую точку x^* из пересечения множеств $M_H(x)$ и $M_B(x)$ и бера в качестве нижней границы максимума \tilde{F}_{\max} интервальной целевой функции \tilde{F} задачи (4) максимум $F_{1,\max}$ целевой функции нижней граничной задачи, а в качестве верхней границы \tilde{F}_{\max} интервальной целевой функции \tilde{F} задачи (4) – максимум $F_{2,\max}$ целевой функции верхней граничной задачи, получаем все решение задачи (4) в виде (17).

Изложенный алгоритм, как видно из приведенного выше его описания, дает решение интервальной задачи условной оптимизации (4) во всех случаях, когда пересечение множеств точек решения ее нижней и верхней граничных задач непусто. Но из теоремы 6 следует, что указанное пересечение непусто только тогда, когда интервальная задача условной оптимизации (4) имеет решение. Таким образом, предложенный алгоритм дает решение интервальной задачи условной оптимизации (4) во всех случаях, когда это решение существует.

Пример (интервальная задача о назначениях). Есть 3 работы и 3 исполнителя – кандидата на работы. Заданы издержки $\tilde{a}_{ij} = [a_{1,ij}, a_{2,ij}]$ выполнения j -й работы i -м исполнителем ($i, j = \overline{1, 3}$), представляющие собой интервальные величины и составляющие интервальную матрицу издержек $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\| = [[a_{1,ij}, a_{2,ij}]] = [A_1, A_2]$, где $A_1 = \|a_{1,ij}\|$ и $A_2 = \|a_{2,ij}\|$ есть нижняя и верхняя граничные матрицы издержек. Надо распределить работы так, чтобы каждый исполнитель был занят выполнением ровно одной работы, а суммарные издержки на все работы были минимальны.

Введем множество неизвестных булевых матриц назначений $X = \|x_{ij}\|, x_{ij} \in \{0, 1\}$, где $x_{ij} = 1$, если i -й исполнитель выполняет j -ю работу, и $x_{ij} = 0$ в противном случае. Тогда имеем

$$\tilde{F}(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \tilde{a}_{ij} x_{ij} = \min,$$

$$\text{при } \Phi_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, \quad j = \overline{1, 3},$$

$$\Phi_2(x_{ij}) \equiv \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, \quad i = \overline{1, 3}.$$

Эта задача представляет собой частный случай общей интервальной задачи (4). Поэтому для ее решения мы можем применить 4-шаговый алгоритм, описанный выше.

Шаг 1. С помощью формул (18) представляем целевую функцию \tilde{F} нашей оптимизационной задачи в интервальной форме

$$\tilde{F}(x_{ij}) \equiv \left[\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{1,ij} x_{ij}, \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{2,ij} x_{ij} \right].$$

Представлять в інтервальній формі функції $\tilde{\Phi}_1(x_{ij}), \tilde{\Phi}_2(x_{ij})$ обмежень задачі, рівно як і параметри в їх правих частках не потрібно, т. к. тут немає інтервальних параметрів.

Шаг 2. Используя полученные на шаге 1 представления, формируем нижнюю F_1 и верхнюю F_2 граничные задачи решаемой интервальной задачи

$$F_1(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{1,ij} x_{ij} = \min,$$

$$\text{при } \sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, j = \overline{1,3}, \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, i = \overline{1,3},$$

$$F_2(x_{ij}) \equiv \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 a_{2,ij} x_{ij} = \max,$$

$$\text{при } \sum_{i=1}^3 x_{ij} = 1, j = \overline{1,3}, \sum_{j=1}^3 x_{ij} = 1, i = \overline{1,3}.$$

Шаг 3. Решаем нижнюю і верхнюю граничные задачи інтервальної задачи, отримані тільки що на кроці 2 алгоритма. Для однозначності приймаємо наступне конкретне значення інтервальної матриці издержок

$$\tilde{A} = [A_1, A_2],$$

$$\text{где } A_1 = \left\| a_{1,ij} \right\| = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 2 \\ 1 & 2 & 2 \\ 2 & 2 & 2 \end{vmatrix}, \quad A_2 = \left\| a_{2,ij} \right\| = \begin{vmatrix} 2 & 3 & 3 \\ 4 & 4 & 3 \\ 3 & 4 & 4 \end{vmatrix}.$$

Існує всього шість різних значень матриць невідомих $X = \left\| x_{ij} \right\|$, що виконують обмеженням розв'язуваної задачі. Поэтому в даному випадку розв'язання легко знаходить перебором серед цих матриць. В результаті отримуємо розв'язання нижньої граничної задачі в вигляді $\{M_h(x), F_{1,\min}\}$, де множину розв'язків M_h

$$M_h(x) = \left\{ X_{1a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, X_{1b} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, X_{1c} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, X_{1d} = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} \right\},$$

а досягнуте мінімальне значення цільової функції $F_{1,\min} = 5$. Далі, повністю аналогічно отримуємо розв'язання верхньої граничної задачі $\{M_b(x), F_{2,\min}\}$. Іменем, множину розв'язків

$$M_b(x) = \left\{ X_{2a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, X_{2b} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix} \right\},$$

а відповідно досягнуте мінімальне значення цільової функції верхньої граничної задачі для початкової задачі становить $F_{2,\min} = 9$.

Шаг 4. Находим пересечение множеств решений нижней граничной задачи $M_h(x)$ и верхней граничной задачи $M_b(x)$

задач. Оно складається з однієї матриці назначень

$$X^* = X_{1b} = X_{2a} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix},$$

що є єдиним розв'язком всієї задачі. Достягнутий на цьому розв'язанні мінімум заданої інтервальної цільової функції становить $\tilde{F}_{\min} = [F_{1,\min}, F_{2,\min}] = [5, 9]$.

Оптимальне розв'язання поставленої задачі о назначенні 3 виконавців на 3 роботи таково: 1-й виконавець назначається на 1 роботу, 2-й – на 3 роботу, а 3-й – на 2 роботу. При цьому издержки оцінюються мінімальним інтервалом можливих значень, рівним [5, 9].

Інші приклади розв'язання оптимізаційних задач з інтервальними параметрами з використанням згаданого алгоритму дані в [7–9, 15, 19].

5 ОБСУДЖЕННЯ

Як вже говорилось у введенні, проблема оптимізації неповнотою определених функцій, по сравненню з традиційною оптимізацією повнотою определених функцій, потребує додатково 1) обобщення поняття екстремума функції; 2) висвітлення умов, що виконуються екстремумом функцій, пов'язаних з їх неповнотою определенностю; 3) розробки спеціальних методів пошуку екстремума таких функцій. Іменно за цю схему розроблено предложені в статті детермінізаційний підхід до оптимізації. Конкретно, обобщення поняття екстремума функції на випадок неповнотою определених (інтервальних) функцій дано в п. 3 (формули (5)). Далі, умови, що виконуються (не виконуються) екстремумом інтервальної функції дані в теоремах 1–4 того ж п. 3. І, наконець, в п. 3 розроблено спеціальний метод пошуку екстремума інтервальної функції. Необхідність проведення всієї цієї роботи виявляється очевидною. Действітельно, оптимізація повнотою определених функцій основана на порівнянні точно определених вещественных чисел, з виділенням більшого та меншого з них, причем на числової осі більше число сдвигнуто вправо відносно меншого. Однак для оптимізації неповнотою определених функцій такий підхід не працює, оскільки неточно определені числа (наприклад, інтервальнові), в відмінності від точно определених вещественных чисел, в загальному випадку не лежать в одному відношенні «сдвигнуто вправо (вліво) на вещественній осі» та не можуть порівнюватися напряму, з виділенням більшого та меншого. Внаслідок цього для таких функцій приходиться обобщяти поняття екстремума. Далі, недостатність інформації, якою характеризуються неповнотою определені числа та функції, при досягненні некоторого достатньо високого рівня може привести до несправністі таких чисел та неможливості виділити з них більше та менше та, як наслідок, – до відсутності екстремума таких функцій. У зв'язку з цим виникає необхідність знаходити умов, що виконуються екстремумом неповнотою определеною функцією. Наконець, внаслідок іншого, більшого, чим для повнотою определеної функції, поняття екстремума неповнотою определеної функції та можливості, що виконуються екстремумом, викликаною неповнотою інформації, приходиться розробляти спеціальні методи пошуку екстремума таких функцій. Важко зрозуміти, що неможливість в определених випадках знайти екстремум не-

полностью определенной функции с помощью любого адекватного, в частности, предложенного в статье, алгоритма не связана с качеством алгоритма, а является следствием объективной реальности, а именно, отсутствия в указанных случаях экстремума вследствие недостатка информации о функции.

В тех же случаях, когда информация о функции достаточна и потому ее экстремум существует, предложенный алгоритм позволяет найти этот экстремум (см. п. 4). Требовать от алгоритма большего, очевидно, нельзя.

Охарактеризуем теперь другие существующие подходы к оптимизации неполностью определенных функций. Кратко об основных достоинствах и недостатках этих подходов уже говорилось во введении. Рассмотрим вопрос подробнее. Начнем с детерминированного подхода. При этом подходе исходная задача оптимизации неполностью определенной функции фактически заменяется другой задачей – оптимизации полностью определенной функции. Причем конструирование этой новой задачи путем выбора определенных значений параметров внутри областей неопределенности параметров функции исходной задачи производится на основе чисто эвристических соображений и не опирается ни на какие математически ясные обобщения понятия экстремума на случай неполноты определенных функций. Вследствие этого новая задача оказывается, как правило, математически неэквивалентной исходной задаче, а интерпретация ее решения в терминах исходной задачи – проблематичной. Кроме того, из-за сложности некоторых критериев оптимизации, используемых в новой задаче (\max_{\min}, \min_{\max}), трудоемкость алгоритмов поиска экстремума неполнотой определенных функций при детерминированном подходе может оказаться высокой. Зато при этом подходе обычно не возникает проблемы выяснения условий существования экстремума функций, т.к. полностью определенные функции практически всегда имеют экстремум.

Теперь о вероятностном подходе. При первом варианте данного подхода исходная задача оптимизации неполнотой определенной функции заменяется, как и в случае детерминированного подхода, другой задачей – оптимизации полностью определенной функции, которая теперь получается из исходной функции путем замены ее случайных параметров их математическими ожиданиями (центрами). Сразу ясно, что эта новая задача неэквивалентна исходной задаче в еще большей степени, чем при детерминированном подходе, поскольку она, не опираясь ни на какие обобщения понятия экстремума для неполнотой определенных функций, не учитывает не только неопределенность возможных значений параметров указанной функции, но и случайный характер реализации конкретных значений параметров функции на практике. Во втором варианте вероятностного подхода исходная задача оптимизации неполнотой определенной функции с интервальными параметрами заменяется задачей оптимизации неполнотой определенной функции со случайными параметрами. Последние получаются из интервальных параметров исходной задачи принятием гипотезы о равномерном распределении значений параметров внутри своих интервалов. Принятие указанной гипотезы сразу упрощает выбор экстремального интервала. Так, для выбора большего из двух интервалов \tilde{a} и \tilde{b} достаточно лишь вычислить вероятности $P(\tilde{a} > \tilde{b})$ и $P(\tilde{b} > \tilde{a})$ и взять тот интервал, для которого вероятность превышения им второго интервала больше. Этот подход гарантирует существование решения, полученного с помощью гипотезы мо-

дельной задачи оптимизации функции со случайными параметрами. Но беда заключается в том, что модельная задача неэквивалентна исходной задаче оптимизации функции с интервальными параметрами, так как одно лишь задание неопределенности функции в форме интервалов возможных значений ее параметров не предполагает задания какой-то дополнительной информации, например, в виде вероятностных распределений внутри интервалов. Все, что ранее было сказано о вероятностном подходе, можно повторить для нечеткого подхода, с заменой термина «вероятностное распределение параметров неполнотой определенной функции» термином «нечеткое распределение параметров».

На практике для решения разнообразных задач оптимизации неполнотой определенных функций, в зависимости от условий, могут применяться различные подходы. В общем случае рекомендуется начинать с детерминационного подхода, поскольку он базируется на точном определении понятия максимума и минимума неопределенного числа (интервала), что упрощает интерпретацию полученного решения и делает его более прозрачным. Если детерминационный подход не приводит к решению, вследствие недостаточной информации об оптимизируемой функции, целесообразно эту информацию пополнить путем сужения интервалов возможных значений параметров этой функции с помощью дополнительных измерений, наблюдений, привлечения более квалифицированных экспертов, после чего снова применить данный подход. Если и это не помогло получить решение, рекомендуется перейти к использованию остальных подходов. В первую очередь, целесообразно попытаться применить вероятностный подход, который достаточно прост в реализации. При этом надо иметь в виду, что используемые в этом подходе вероятностные распределения параметров оптимизируемой неполнотой определенной функции должны быть известны с достаточной точностью, так как в противном случае найденное предположительно оптимальное значение функции может оказаться далеким от настоящего оптимума. Надо еще учитывать, что при вероятностном подходе получение оптимума функции вообще строго не гарантировается, а лишь «обещается» с определенной вероятностью, притом не обязательно близкой к единице, что не всегда приемлемо. Поэтому на практике часто применяют детерминированный подход к оптимизации неполнотой определенных функций. Этот подход, в отличие от детерминационного подхода, всегда обеспечивает существование оптимума неполнотой определенной функции, и, в отличие от вероятностного подхода, гарантирует получение этого оптимума. К сожалению, при этом подходе, как уже говорилось ранее, вследствие преобразования исходной неполнотой определенной функции в полностью определенную (детерминированную) новая задача оптимизации оказывается неэквивалентна исходной, а интерпретация ее решения в терминах исходной задачи проблематичной. Например, выбор минимального из двух интервалов $\tilde{a} = [4,5]$, $\tilde{b} = [3,15]$ с помощью детерминированного подхода по критерию оптимальности «нижняя граница интервала минимальна» дает решение $\min(\tilde{a}, \tilde{b}) = \tilde{b} = [3,15]$. Однако это решение невозможно интерпретировать практически, поскольку оно противоречит эвристическим представлениям о проблеме. Так, любой автомобилист уверенно предпочтет как более экономическую машину с расходом топлива от 4 до 5 л на 100 км машине с расходом топлива от 3 до 15 л!

6 ЗАКЛЮЧЕННЯ

В данной статье показано, что проблема оптимизации неполностью определенных функций достаточно просто разрешима, если указанную неопределенность задавать в интервальной форме и использовать при этом конструктивную теорию сравнения величин интервалов, сводящую это сравнение к сравнению одноименных границ интервалов. Тем самым задача нахождения оптимума неполностью определенной функции сводится к более простой задаче отыскания одноименного оптимума двух полностью определенных (детерминированных) функций. Наш подход (его естественно назвать детерминизацией) примечателен тем, что позволяет вполне строго свести оптимизацию неполностью определенных функций к хорошо известным и эффективным методам оптимизации полностью определенных функций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юдин Д. Б. Задачи и методы линейного программирования / Д. Б. Юдин, Е. Г. Гольдштейн. – М. : Советское радио, 1964. – 735 с.
2. Вентцель Е. С. Введение в исследование операций / Е. С. Вентцель. – М. : Советское радио, 1964. – 390 с.
3. Уайлд Д. Дж. Методы поиска экстремума / Д. Дж. Уайлд. – М. : Наука, 1967. – 268 с.
4. Корбут А. А. Дискретное программирование / А. А. Корбут, Ю. Ю. Финкельштейн. – М. : Наука, 1969. – 280 с.
5. Моисеев Н. Н. Методы оптимизации / Н. Н. Моисеев, Ю. П. Иванилов, Е. М. Столярова. – М. : Наука, 1978. – 352 с.
6. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ / В. И. Левин. – М. : Наука, 1987. – 304 с.
7. Левин В. И. Моделирование задач оптимизации в условиях интервальной неопределенности / В. И. Левин // Известия Пензенского гос. пед. ун-та. Серия «Физико-математические и технические науки». – 2011. – № 26. – С. 589–595.
8. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Автоматика и вычислительная техника. – 2012. – № 4. – С. 157–163.
9. Левин В. И. Методы оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности параметров / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2012. – № 4. – С. 52–59.
10. Левин В. И. Оптимальное проектирование в условиях неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Онтология проектирования. – 2013. – № 3 (9). – С. 41–52.
11. Левин В. И. Методология оптимизации в условиях неопределенности методом детерминизации / В. И. Левин // Информационные технологии. – 2014. – № 5. – С. 14–21.
12. Левин В. И. Оптимизация в условиях неопределенности / В. И. Левин // Вестник Тамбовского ун-та. Серия «Естественные и технические науки». – 2014. – Т. 19. Вып. 3. – С. 844–851.
13. Первозванский А. А. Математические модели в управлении производством / А. А. Первозванский. – М. : Наука, 1975. – 616 с.
14. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function / M. Libura // Control and Cybernetics. – 1980. – Vol. 9, № 4. – P. 189–202.
15. Тимохин С. Г. О задачах линейного программирования в условиях неточных данных / С. Г. Тимохин, А. В. Шапкин, // Экономика и математические методы. – 1981. – Т. 17, № 5. – С. 955–963.
16. Рошин В. А. Вопросы решения и исследования одного класса задач неточного целочисленного программирования / В. А. Рошин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // Кибернетика. – 1989. – № 2. – С. 42–46.
17. Семенова Н. В. Решение одной задачи обобщенного целочисленного программирования / Н. В. Семенова // Кибернетика. – 1984. – № 5. – С. 25–31.
18. Вощинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Вощинин, Г. Р. Сотиров. – М. : Изд-во МЭИ, 1989. – 224 с.
19. Ащепков Л. Т. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления / Л. Т. Ащепков, Д. В. Давыдов. – М. : Наука, 2006. – 285 с.
20. Давыдов Д. В. Интервальные методы и модели принятия решений в экономике. Диссерт. докт. экон. наук / Д. В. Давыдов. Дальневосточный гос. ун-т. – Владивосток, 2009. – 343 с.
21. Островский Г. М. Технические системы в условиях неопределенности. Анализ гибкости и оптимизация / Г. М. Островский, Ю. М. Волин. – М. Бином, 2008. – 325 с.
22. Островский Г. М. Оптимизация технических систем / Г. М. Островский, Н. Н. Зиятдинов, Т. В. Лаптева. – М. : Кнорус, 2012. – 252 с.
23. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1992. – № 7. – С. 97–106.
24. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. – 1994. – № 7. – С. 111–122.
25. Левин В. И. Интервальное дискретное программирование / В. И. Левин // Кибернетика и системный анализ. – 1994. – № 6. – С. 92–103.
26. Левин В. И. Оптимизация расписаний в системах с неопределенными временами обработки. I, II / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1995. – № 2. – С. 99–110; № 3. – С. 106–116.
27. Левин В. И. Задача трех станков с неопределенными временами обработки // Автоматика и телемеханика / В. И. Левин. – 1996. – № 1. – С. 109–120.
28. Левин В. И. Интервальная модель общей задачи линейного программирования. Однородный случай / В. И. Левин // Вестник Тамбовского университета. Естественные и технические науки. – 1998. – Т. 3. – № 4. – С. 401–407.

Статья поступила в редакцию 23.09.2015.

После доработки 16.07.2015

Левін В. І.

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

ОПТИМІЗАЦІЯ В УМОВАХ НЕВІЗНАЧЕНОСТІ МЕТОДОМ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ

У статті розглянуті існуючі підходи до оптимізації (оптимального проектування) систем в умовах невізначеності. Дано точна завдання умовної оптимізації при інтервальної невізначеності параметрів цільової функції і обмежень. У зв'язку з цим викладені математична теорія порівняння інтервалів, що включає точне визначення максимального і мінімального інтервалів, умови існування таких інтервалів і алгоритми їх відшукання. Запропонована ідея рішення задачі умовної оптимізації при інтервальної невізначеності її параметрів. Ця ідея заснована на правилах математичної теорії порівняння інтервалів, що дозволяють замінити порівняння інтервалів і виділення максимального і мінімального інтервалу порівнянням їх нижніх і верхніх меж. На базі запропонованої ідеї сформульованій і обґрунтований метод детермінізації, що дозволяє вирішити задачу умовної оптимізації при інтервальної невізначеності параметрів шляхом її зведення до двом повністю певним завданням оптимізації того ж типу. Сформульована і доведена теорема, визначальна рішення задачі умовної оптимізації в умовах інтервальної невізначеності параметрів через рішення двох зазначених повністю певних завдань оптимізації. Також сформульована і доведена теорема, визначальна необхідна і достатня умова існування розв'язку задачі

умовної оптимізації при інтервальної невизначеності. Побудований чотирехшаговий алгоритм вирішення задачі умовної оптимізації при інтервальної невизначеності параметрів, який реалізує метод детермінізації. Наведено приклад роботи алгоритму; в якості розв'язуваної задачі обрана інтервальна задача про призначення. Проведено порівняння викладеного підходу до вирішення задач умовної оптимізації з неповністю визначеними параметрами з іншими методами вирішення таких завдань (детермінований, імовірнісний і нечіткий). Вказані достоїнства і недоліки різних методів. Підкреслено, що запропонований підхід дозволяє зводити оптимізацію неповністю певних функцій до оптимізації повністю певних функцій строго математично, а не евристично, як це робиться в інших відомих підходах.

Ключові слова: оптимізація, невизначеність, оптимізація при інтервальної невизначеності, метод детермінізації.

Levin V. I.

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

THE OPTIMIZATION IN CONDITION OF UNCERTAINTY BY DETERMINATION METHOD

The existing approaches to the optimization (optimal design) of systems under uncertainty are considered. An exact formulation of problem of constrained optimization under interval uncertainty of the parameters of the objective function and constraints is given. In this connection the mathematical theory of comparison of intervals is set out, including a precise definition of the maximal and minimal intervals, conditions for existence of such intervals and algorithms for finding them. Idea of solving constrained optimization problems under interval uncertainty of its parameters is proposed. This idea is based on the rules of the mathematical theory of comparison of intervals which allows replace the comparison of intervals and determination of maximal and minimal interval by comparing their lower and upper bounds. On basis of the proposed idea the determination method which allows solve the problem of constrained optimization under interval uncertainty parameters by reducing it to two entirely certain optimization problems of the same type is formulated and proved. We formulate and prove a theorem that defines the solution of the problem of constrained optimization under interval uncertainty of parameters through solutions of two fully certain optimization problems. Also the theorem that defines the necessary and sufficient condition for existence of a solution of constraint optimization under interval uncertainty is formulated and proved. The algorithm of solving constrained optimization under interval uncertainty parameters that implements a method of determination is constructed and consists of 4 steps. The example of the algorithm is given. The interval assignment task is selected as a problem to be solved is selected. A comparison of our approach to solving constrained optimization problems with incompletely defined parameters with other methods for solving such problems (deterministic, probabilistic and fuzzy) is done. Advantages and disadvantages of different methods are listed. It is emphasized that the proposed in the article approach allows us to reduce the optimization of incompletely specified functions to fully optimize certain functions strictly mathematically rather than heuristically, as is done in well-known approaches.

Keywords: optimization, uncertainty, optimization with interval uncertainty, determination.

REFERENCES

1. Judin D. B., Goldshtein E.G. Zadachi i metody lineinogo programmirovaniya. Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 735 p.
2. Ventcel' E. S. Vvedenie v issledovanie operaciy. Moscow, Sovetskoe radio, 1964, 390 p.
3. Wilde D.J. Metody poiska extremuma. Moscow, Nauka, 1967, 268 p.
4. Korbut A. A., Finkelshtein Yu. Yu. Diskretnoe programmirovaniye. Moscow, Nauka, 1969, 280 p.
5. Moiseev N. N., Ivanilov Yu. P., Stolyarova E. M. Metody optimizacii. Moscow, Nauka, 1978, 352 p.
6. Levin V. I. Strukturno-logicheskie metody issledovaniya slozhnyh sistem s primeniem EVM. Moscow, Nauka, 1987, 304 p.
7. Levin V. I. Modelirovanie zadach optimizacii v usloviyah intervalnoy neopredelennosti, *Izvestiya Penzenskogo gos. ped. un-ta. Seriya «Fiziko-matematicheskie i tehnicheskie nauki»*, 2011, No. 26, pp. 589–595.
8. Levin V. I. Optimizaciya v usloviyah intervalnoy neopredelennosti. Metod determinizacii // *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika*, 2012, No. 4, pp. 157–163.
9. Levin V. I. Metody optimizacii sistem v usloviyah intervalnoy neopredelennosti parametrov, *Informacionnye tehnologii*, 2012, No. 4, pp. 52–59.
10. Levin V. I. Optimalnoe proektirovaniye v usloviyah neopredelennosti. Metod determinizacii, *Ontologiya proektirovaniya*, 2013, No. 3 (9), pp. 41–52.
11. Levin V. I. Metodologiya optimizacii v usloviyah neopredelennosti metodom determinizacii, *Informacionnye tehnologii*, 2014, No. 5, pp. 14–21.
12. Levin V. I. Optimizaciya v usloviyah neopredelennosti, *Vestnik Tambovskogo Universiteta. Estestvennye i tehnicheskie nauki*, 2014, Vol. 19, No. 3, pp. 844–851.
13. Pervozvanskiy A. A. Matematicheskie modeli v upravlenii proizvodstvom. Moscow, Nauka, 1975, 616 p.
14. Libura M. Integer Programming Problems with Inexact Objective Function, *Control and Cybernetics*, 1980, Vol. 9, No. 4, pp. 189–202.
15. Timohin S. G., Shapkin A. V. O zadachah lineinogo programmirovaniya v usloviyah netochnyh dannyh, *Ekonomika i matematicheskie metody*, 1981, No. 5, Vol. 17, pp. 955–963.
16. Roschin V. A., Semenova N. V., Sergienko I. V. Voprosy resheniya i issledovaniya odnogo klassa zadach netochnogo celochislenного programmirovaniya, *Kibernetika*, 1989, No. 2, pp. 42–46.
17. Semenova N. V. Reshenie odnoj zadachi obobshchennogo celochislenного programmirova-niya, *Kibernetika*, 1984, No. 5, pp. 25–31.
18. Voskhinin A. P., Sotirov G. R. Optimizaciya v usloviyah neopredelennosti. Moscow, Izd-vo MEI, 1989, 224 p.
19. Ashhepkov L. T., Davydov D. V. Universalnye reshenija intervalnyh zadach optimizacii i upravleniya. Moscow, Nauka, 2006, 285 p.
20. Davydov D. V. Intervalnye metody i modeli prinjatiya reshenij v ekonomike. Dissert. dokt. ekon. nauk. Vladivostok, Dalnevostochnyi gos. un-t., 2009, 343 p.
21. Ostrovskiy G. M., Volin Yu. M. Tehnickeskie sistemy v usloviyah neopredelennosti. Analiz gibkosti i optimizaciya. Moscow, Binom, 2008, 325 p.
22. Ostrovskiy G. M., Ziyatdinov N. N., Lapteva T. V. Optimizaciya tehnickeskikh sistem. Moscow, Knorus, 2012, 252 p.
23. Levin V. I. Diskretnaya optimizaciya v usloviyah intervalnoy neopredelennosti, *Avtomatika i telemehanika*, 1992, No. 7, pp. 97–106.
24. Levin V. I. Bulevo lineinoe programmirovaniye s intervalnymi koeficientami, *Avtomatika i telemehanika*, 1994, No. 7, pp. 111–122.
25. Levin V. I. Intervalnoe diskretnoe programmirovaniye, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 1994, No. 6, pp. 92–103.
26. Levin V. I. Optimizaciya raspisaniy v sistemah s neopredelennymi vremeniami obrabotki. I, II, *Avtomatika i telemehanika*, 1995, No. 2, pp. 99–110; No. 3, pp. 106–116.
27. Levin V. I. Zadacha treh stankov s neopredelennymi vremeniami obrabotki, *Avtomatika i telemehanika*, 1996, No. 1, pp. 109–120.
28. Levin V. I. Intervalnaya model obschey zadachi lineinogo programmirovaniya. Odnorodniy sluchai, *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennye i tehnicheskie nauki*, 1998. Vol. 3, No. 4, pp. 401–407.

УДК 004.738.5

Молодецька К. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем Житомирського національного аграрного університету, Житомир, Україна

СПОСІБ ПІДТРИМАННЯ ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОПИТУ АКТОРІВ СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСІВ НА КОНТЕНТ

Сучасні соціальні інтернет-сервіси є новітньою віртуальною платформою, яка забезпечує онлайн комунікацію між учасниками відповідних віртуальних спільнот. Популярність соціальних інтернет-сервісів, окрім усіх їх позитивних комунікаційних можливостей, породжує низку потенційних загроз інформаційній безпеці особи, суспільства, держави. Зокрема, особливо небезпечними є загрози, які спрямовуються зловмисниками на маніпулювання суспільною свідомістю. При цьому явища соціальної комунікації, які виникають внаслідок взаємодії акторів, характеризуються непрограмованістю процесів. Це призводить до виникнення стану некерованого хаосу, який має безпосереднє відображення в офлайні. З метою забезпечення керованості такими процесами у статті запропоновано використати концепцію синергетичного управління взаємодією акторів у соціальних інтернет-сервісах. Синергетичне управління, яке синтезується в результаті, забезпечує підвищення стійкості віртуальних спільнот до деструктивних впливів у розрізі управління попитом акторів на контент у соціальних інтернет-сервісах. На основі обраного динамічного інваріанту показано можливість забезпечення протікання у віртуальних спільнотах процесів керованої самоорганізації акторів для переходу системи у керований підконтрольний стан. Обраний у статті атрактор враховує базові особливості комунікації акторів, такі як зміна в часі цінності контенту та забезпечення досягнення поставленої мети від взаємодії акторів віртуальної спільноти у точці сплеску синергетичного ефекту. У результаті впливу синтезованого синергетичного управління на інваріантному різноманітті реалізується редукція ступенів свободи нелінійної динамічної системи – процесу взаємодії. Як наслідок, спрощується процес штучно-керованого підтримання заданого рівня попиту акторів і забезпечується вдалий стартап нових брендів.

Ключові слова: соціальні інтернет-сервіси, взаємодія акторів, попит на контент, динамічний хаос, синергетичне управління, атрактор, інформаційна безпека.

НОМЕНКЛАТУРА

a – показник зміни швидкості попиту акторів у СІС на відповідний контент;

b – показник зміни конкуренції акторів у СІС на публікацію контенту, аналогічного за сутністю та змістом;

c – показник зміни швидкості пропозиції з надання акторам взаємодії в СІС відповідного контенту;

ε_1 – коефіцієнт регуляризації попиту акторам СІС на публікацію контенту, аналогічного за змістом;

ε_2 – коефіцієнт регуляризації конкуренції акторів СІС на публікацію аналогічного контенту;

T_U – час, за який досягається заданий рівень зацікавленості акторів;

$u(x,y)$ – синергетичне управління взаємодією акторів у СІС, що реалізується через зворотний зв'язок;

V – функція Ляпунова;

$x(t)$ – процес, що описує попит акторів у СІС на відповідний контент для досліджуваної віртуальної спільноти;

$(x_v; y_v)$ – фазові координати точки сплеску синергетичного ефекту;

$y(t)$ – процес, що описує пропозицію з надання деякого контенту;

$\psi_U(x, y)$ – заданий параметр порядку, атрактор, який враховує природні особливості взаємодії акторів СІС;

СІС – соціальні інтернет-сервіси.

ВСТУП

Роль СІС в процесі становлення громадянського суспільства постійно зростає. СІС як електронний засіб масової комунікації виступає ефективним інструментом формування суспільної думки з багатьох актуальних питань. Наприклад, СІС, при їх ефективному використанні забезпечують вдалий стартап багатьох сучасних бізнес-проектів [1–5]. Збільшення кількості

потенційних загроз інформаційній безпеці, ускладнення процесів визначення релевантності, достовірності, цінності інформації, яка поширюється в СІС, створюють умови для маніпулювання суспільною свідомістю, зокрема, шляхом поширення недостовірної, неповної або упередженої інформації [6–8]. Результатом таких впливів є виникнення хаотично керованих вихідних дій акторів, а у випадку їх взаємодії і виконанні деяких визначених умов – появя синергетичних ефектів. Такі ефекти призводять до утворення у високоорганізованих системах управління різного ієрархічного рівня нових і нехарактерних їм властивостей, які називають емерджентними [9]. Своєчасне встановлення сутності і змісту синергетичних ефектів у СІС, їх зачасне виявлення, прогнозування та оперативне попередження, є актуальну проблемою забезпечення інформаційної безпеки людини, суспільства та держави.

Метою статті є підвищення стійкості віртуальних спільнот СІС до деструктивних інформаційних впливів за рахунок підтримання бажаного рівня попиту акторів на контент, що становить інтерес. Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі частинні задачі:

– обґрунтування і вибір параметра порядку, що визначає динаміку процесів взаємодії акторів у СІС;

– синтез синергетичного управління процесами взаємодії акторів у СІС;

– моделювання взаємодії акторів у СІС із врахуванням синергетичного управління.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Нехай у формалізованому вигляді взаємодія акторів у деякому СІС описується системою нелінійних диференціальних рівнянь вигляду [10]

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = -cy + xy. \end{cases} \quad (1)$$

Поставимо задачу управління нелінійною системою (1) з метою підтримання заданого рівня попиту акторів $x(t)$ досліджуваної віртуальної спільноти на відповідний контент, впливаючи на швидкість поширення цього контенту та контенту, аналогічного за сутністю і змістом. Синтезоване управління повинне спростити процес штучно-керованого підтримання заданого рівня попиту акторів за рахунок виникнення у системі процесів самоорганізації. Визначений рівень зацікавленості акторів у контенті СІС має бути гарантованим і досягнутим за деякий проміжок часу T .

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що СІС належать до класу нелінійних динамічних систем [4, 9, 11–13]. Поведінка таких систем характеризується непередбачуваністю і некерованістю, тому для дослідження управління процесами взаємодії акторів в СІС доречно скористатися положеннями динамічної теорії хаосу. Встановлено, що одним із найбільш перспективних методів досягнення заданої поведінки акторів у системі є такі, що використовують їх здатність до самоорганізації, однією з необхідних умов виникнення якої є підтримання стану нерівноваги [10, 14, 15]. Завдяки процесам самоорганізації – теоретичній основі синергетики, можна виділити відносно невелику кількість параметрів порядку чи характеристик середовища, які визначають динаміку системи в цілому. Таким чином, наявність хаотичного атрактора забезпечує досягнення стійкого стану системи за незначних збурень системних параметрів.

В основу досліджень було покладено концепцію синергетичного управління процесами взаємодії акторів у СІС [9, 14]. Вирішення проблеми управління рівнем попиту акторів СІС на контент шляхом синтезу синергетичного управління, яке забезпечить виникнення процесів керованої самоорганізації акторів у СІС для досягнення заданого стану інформаційної безпеки віртуального співтовариства є актуальною.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Синтезуємо синергетичне управління пропозицією контенту у СІС, для якого система нелінійних диференціальних рівнянь (1) перетвориться до вигляду

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = -cy + xy + u(x, y). \end{cases} \quad (2)$$

Для забезпечення переходу віртуальної спільноти акторів СІС до бажаного стану і появи заданих синергетичних ефектів синтезуємо закон управління $u(x, y)$ на основі заданого параметра порядку $\psi_v(x, y) = 0$. Введемо в структуру системи динамічні інваріанти – атрактори, які враховують природні особливості взаємодії акторів СІС [1, 6]. Тоді макрозмінна $\psi_v(x, y)$ набуває вигляду [9, 14]

$$\psi_v(x, y) = y - \varepsilon_1 x - \varepsilon_2 x^2. \quad (3)$$

Завдяки синергетичному управлінню $u(x, y)$ для підтримання заданого рівня попиту акторів СІС на контент в системі нелінійних диференціальних рівнянь (2) будуть запущені переходні процеси. Для забезпечення перебігу таких процесів за деякий час T_v , обрана макро-змінна (3) повинна задовільняти умову

$$T_v \frac{d\psi_v(t)}{dt} + \psi_v(t) = 0. \quad (4)$$

Після підстановки макrozмінної (3) в рівняння (4), враховуючи початкову систему диференціальних рівнянь (1), отримаємо синергетичне управління

$$u(x, y) = cy - xy + (ax - xy - bx^2)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 x) - \frac{1}{T_v}(y - \varepsilon_1 x - \varepsilon_2 x^2). \quad (5)$$

Отже, синтезована система нелінійних диференціальних рівнянь (2), яка забезпечує заданий рівень попиту акторів СІС на контент із врахуванням управління (5) набуває вигляду

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = ax - xy - bx^2; \\ \frac{dy(t)}{dt} = (ax - xy - bx^2)(\varepsilon_1 + 2\varepsilon_2 x) - \frac{1}{T}\psi(t). \end{cases} \quad (6)$$

Зображення точка синтезованої нелінійної системи (6) рухається здовж стабілізуючого інваріанта (3) відповідно до диференціального рівняння

$$\frac{dx_\psi}{dt} = x_\psi (a - x_\psi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi). \quad (7)$$

Диференціальне рівняння (7) є рівнянням логістичного типу, що підтверджує вимогу врахування при виборі атрактора $\psi_v(t)$ особливостей поведінки акторів у СІС, а саме зміну в часі цінності контенту, що становить інтерес, і, як наслідок, зменшення попиту на нього $x(t)$.

Дослідимо на стійкість диференціальне рівняння (7), використовуючи функцію Ляпунова $V = 0,5x_\psi^2$ [16]. Для цього запишемо похідну від функції V із врахуванням диференціального рівняння (7)

$$V' = \frac{dV}{dt} \Big|_{x_\psi = x_\psi(a - x_\psi(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi)} = x_\psi^2 (a - x_\psi (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi) - bx_\psi) < 0. \quad (8)$$

Із нерівності (8) визначимо умови асимптотичної стійкості синтезованої системи диференціальних рівнянь (6). Для попиту акторів СІС на контент $x_\psi(t) > 0$ похідна від функції Ляпунова $V' < 0$, якщо

$$a > 0, b > 0, \varepsilon_1 > 0, \varepsilon_2 > 0, \varepsilon_1 + \varepsilon_2 x_\psi > b. \quad (9)$$

Отже, при виконанні нерівностей (9) синтезована система нелінійних диференціальних рівнянь (6) володіє властивістю асимптотичної стійкості відносно стану $x = 0, y = 0$. Із диференціального рівняння (7), враховуючи умови (9) отримаємо значення точок сплеску синергетичного ефекту для попиту на контент акторів СІС x_v і пропозиції y_v , в яких система досягає бажаного стану на

фазовій площині

$$x_v = -\frac{1}{2\varepsilon_2} \left(b + \varepsilon_1 - \sqrt{b^2 + 2b\varepsilon_1 + \varepsilon_1^2 + 4a\varepsilon_2} \right),$$

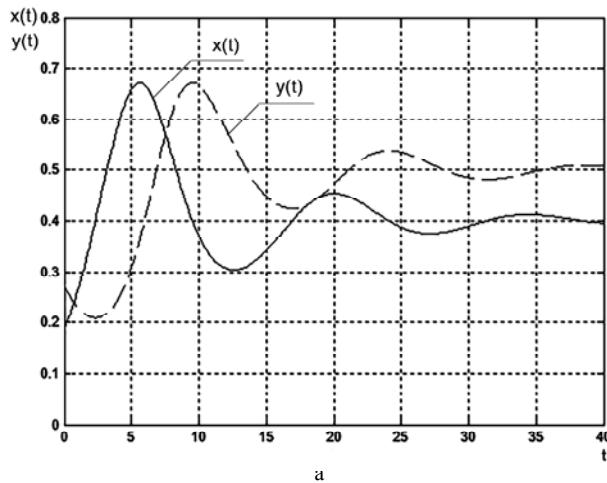
$$y_v = \varepsilon_1 x_v - \varepsilon_2 x_v^2. \quad (10)$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконамо дослідження зміни попиту на контент акторів CIC, використовуючи метод фазової площини якісної теорії диференціальних рівнянь засобами модуля PPLANE8 і пакету прикладних програм MatLab. Нехай параметри досліджуваної системи нелінійних диференціальних рівнянь (1) приймають значення $a = 0,7$, $b = 0,5$, $c = 0,4$, тоді графік зміни попиту і пропозиції контенту в CIC та фазовий портрет системи виглядають як показано на рис. 1.

На фазовому портреті (рис. 1а) видно, що система нелінійних диференціальних рівнянь (1) має стаціонарну точку типу фокус, в якій переходить до керованого стану за час $t = 40$ і попит акторів CIC на контент приймає значення $x = 0,4$, а пропозиція з надання контенту $y = 0,5$.

Проаналізуємо зміну попиту акторів CIC в результаті дії синтезованого синергетичного управління (5) для системи (1), що формалізує взаємодію акторів у деякому CIC. Нехай



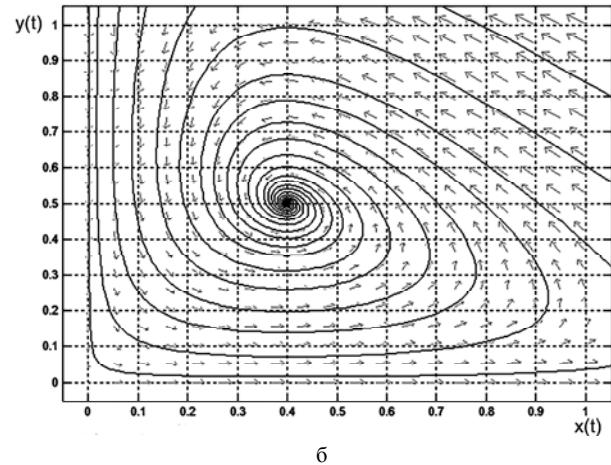
а

параметри нелінійної системи диференціальних рівнянь (6) набувають значень $a = 0,7$, $b = 0,5$, $\varepsilon_1 = 1,5$, $\varepsilon_2 = 1,1$, $T = 1$. Результати моделювання наведено на рис. 2.

В результаті дії синтезованого управління система (6) керовано переходить до бажаного стану в точці сплеску синергетичного ефекту $x_v = 0,3$ і $y_v = 0,55$, яка є стаціонарною точкою типу фокус, а фазові траекторії синтезованої системи організовано прямувати до обраного параметра порядку $\psi_v(x, y) = 0$. Внаслідок синергетичного управління, що реалізоване як зворотній зв'язок, у точці сплеску синергетичного ефекту з координатами $(x_v; y_v)$ досягається зменшення попиту акторів CIC $x(t)$ на контент.

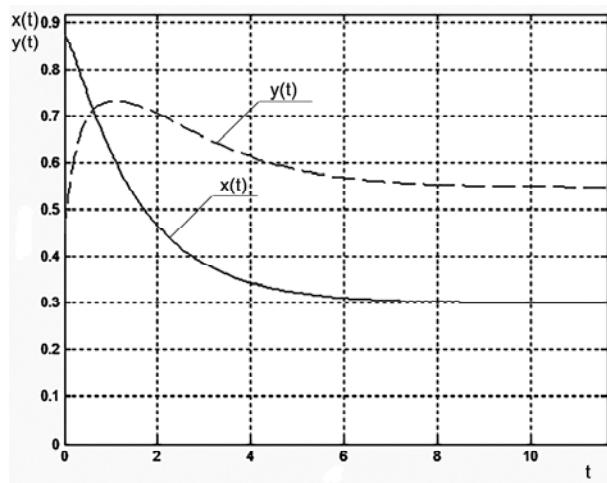
Регуляризацію попиту акторів CIC $x(t)$ на контент реалізовано варіюванням параметрів ε_1 і ε_2 синтезованої системи нелінійних диференціальних рівнянь (6). В табл. 1 наведено результати розрахунку значень фазових координат точки сплеску синергетичного ефекту $(x_v; y_v)$.

Графічне зображення поверхні залежності рівня попиту акторів CIC на контент $x(t)$ від параметрів регуляризації попиту ε_1 і конкуренції на публікацію аналогічного контенту ε_2 подано на рис. 3.

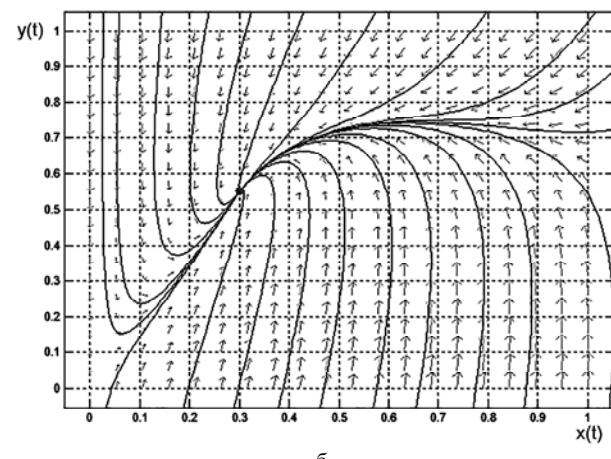


б

Рисунок 1 – Система у стані динамічного хаосу: а) графік зміни попиту і пропозиції контенту в CIC; б) фазовий портрет системи



а



б

Рисунок 2 – Система у керованому стані: а) графік зміни попиту і пропозиції контенту в CIC для початкових значень $x_0 = 0,5$ і

$y_0 = 0,85$; б) фазовий портрет системи

Таблиця 1 – Координати точки сплеску синергетичного ефекту

Коефіцієнт регуляризації попиту ε_1	Коефіцієнт регуляризації конкуренції на публікацію ε_2	Точка сплеску синергетичного ефекту (x_v, y_v)	
		x_v	y_v
0,5	$\varepsilon_2 = 1$	0,48	0,46
		0,37	0,51
		0,30	0,54
		0,25	0,57
		0,22	0,59
		0,19	0,61
$\varepsilon_1 = 1$	0,5	0,41	0,50
	1	0,37	0,51
	1,5	0,35	0,53
	2	0,33	0,54
	2,5	0,31	0,55
	3	0,29	0,55

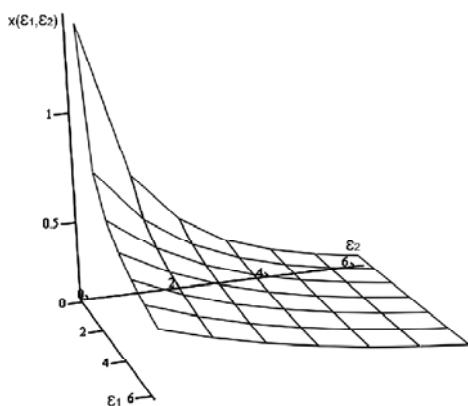


Рисунок 3 – Поверхня зміни бажаного рівня попиту акторів на контент

5 ОБГОВОРЕННЯ

Результатом впливу синтезованого синергетичного управління взаємодією акторів у СІС є поява процесів самоорганізації, під дією яких відбувається перехід від хаотичної динаміки до керованого стану. При цьому система із будь-якого стану переходить на атрактор $\psi(t)=0$, по якому рухається до точки сплеску синергетичного ефекту взаємодії акторів, в якій досягається заданий рівень попиту на контент $x(t)$. На інваріантному різноманітті реалізується редукція ступенів свободи нелінійної динамічної системи, що спрощує процес підтримання заданого рівня попиту акторів шляхом варіювання параметрів регуляризації попиту ε_1 і конкуренції акторів СІС на публікацію аналогічного контенту ε_2 . В окремих випадках підтримання бажаного рівня попиту акторів на контент в СІС досягається в результаті зміни тільки одного із параметрів синергетичного управління ε_1 чи ε_2 , що спрощує та підвищує ефективність процесів управління взаємодією акторів у СІС, яка належить до класу складних систем.

ВИСНОВКИ

Розглянуто спосіб штучного підтримання в акторів СІС заданого рівня зацікавленості до контенту, що становить інтерес, який ґрунтуються на виникненні синергетичного ефекту внаслідок запуску процесів самоорганізації акторів у СІС. Точка сплеску синергетичного ефекту є притягуючим атрактором системи, на якому реалізується редукція ступенів свободи вихідної системи нелінійних диференціальних рівнянь і забезпечується спрощення процесу досягнення поставлених

задань взаємодії акторів у СІС. Ефективне управління взаємодією акторів здійснює синергетично керований перехід до заданого стану інформаційної безпеки віртуального співтовариства. Подальші дослідження будуть направлені на вироблення рекомендацій по реалізації синергетичного управління взаємодією акторів СІС для переходу віртуального співтовариства до бажаного стану інформаційної безпеки.

ПОДЯКИ

Робота виконана на кафедрі комп’ютерних технологій і моделювання систем Житомирського національного аграрно-екологічного університету в рамках господарської науково-дослідницької теми «Методологія побудови сучасних інформаційних технологій аналізу і відображення стану інформаційної та екологічної безпеки держави» ДР № 0115U00418 за сприяння науково-дослідного відділу інформаційної та кібернетичної безпеки наукового центру Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова в особі начальника відділу – д.т.н., с.н.с. Р. В. Грищук.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Грищук Р. В. Стартап віртуальних спільнот у соціальних мережах за принципом критичної маси / Р. В. Грищук // Захист інформації. – Луганськ : СНУ. – 2015. – Спеціальний випуск. – С. 19–25.
- Грищук Р. В. Мобільні соціальні інтернет-сервіси як один із різновидів масової комунікації на сучасному етапі / Р. В. Грищук, Ю. Г. Даник, О. В. Самчишин // Безпека інформації : НАУ. – 2015. – Т. 21. – № 1. – С. 16–20.
- Даник Ю. Г. Сучасні мобільні соціальні інтернет сервіси як один з перспективних засобів масової комунікації / Ю. Г. Даник, Р. В. Грищук, О. В. Самчишин // Наук.-практ. конф. [«Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави»] (Київ, 19 берез. 2015 р.). – К. : Центр. навч., наук. та період. видань НА СБ України, 2015. – С. 232–235.
- Epstein J. M. Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling / Joshua M. Epstein. – Princeton : Princeton University Press, 2012. – 384 р.
- Tatnall A. Actor-Network Theory and Technology Innovation : Advancements and New Concepts. Information Science Reference / A. Tatnall. – New York, 2010. – 328 р.
- Пелещишин А. М. Процеси управління інтерактивними соціальними комунікаціями в умовах розвитку інформаційного суспільства : монографія / А. М. Пелещишин, Ю. О. Серов, О. Л. Березко [та ін.] ; за ред. А. М. Пелещишина. – Л. : Вид-во Львівської політехніки, 2012. – 368 с.
- Ліпкан В. А. Національна безпека України : навч. посіб. / В. А. Ліпкан. – К. : Кондор, 2008. – 552 с.
- Губанов Д. А. Соціальні сети : модели информационного влияния, управления и противоборства / Д. А. Губанов, Д. А. Новиков, А. Г. Чхартишвили ; под ред. Д. А. Чхартишвили. – М. : Изд. физ.-мат. лит., 2010. – 228 с.
- Грищук Р. В. Концепція синергетичного управління процесами взаємодії агентів у соціальних інтернет-сервісах / Р. В. Грищук, К. В. Молодецька // Безпека інформації. – К. : НАУ. – 2015. – Т. 21. – Ч. II. – С. 123–130.
- Сериков А. В. Эффективность хозяйственной деятельности : определение, измерение, синергетическое управление / А. В. Сериков // Економічний вісник Донбасу. – 2011. – № 2 (24). – С. 212–219.
- Epstein Joshua M. Nonlinear Dynamics, Mathematical Biology, and Social Science : lecture notes / Joshua M. Epstein. – Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, 1997. – 164 р.
- Сазанов В. М. Социальные сети : Анализ – Технологии – Перспективы. Обзор : [Электронный ресурс] / Сайт Лаборатории СВМ. – Режим доступа : http://ntl-cbm.narod.ru/CBM-NET/net_rew.doc (дата звернення: 17.08.15). – Назва з екрану.
- Горбулін В. П. Інформаційні операції та безпека суспільства : загрози, протидія, моделювання : монографія / В. П. Горбулін, О. Г. Додонов, Д. В. Ланде. – К. : Інтертехнолодія, 2009. – 164 с.
- Колесников А. А. Синергетические методы управления сложными системами : теория системного синтеза / А. А. Колесников. – М. : Едіторал УРСС, 2005. – 228 с.

15. Пригожин И. Порядок из хаоса : Новый диалог человека с природой [пер. с англ.] / И. Пригожин, И. Стенгерс ; под. общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачковой. – М. : Наука, 1984. – 432 с.

Молодецкая К. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и моделирования систем Житомирского национального агрэкологического университета, Житомир, Украина

СПОСОБ ПОДДЕРЖАНИЯ ЗАДАННОГО УРОВНЯ СПРОСА АКТОРОВ СОЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСОВ НА КОНТЕНТ

Современные социальные интернет-сервисы являются новейшей виртуальной платформой, которая обеспечивает онлайн коммуникацию между участниками соответствующих виртуальных сообществ. Популярность социальных интернет-сервисов, кроме всех их положительных коммуникационных возможностей, порождает ряд потенциальных угроз информационной безопасности личности, общества, государства. В частности, особенно опасны угрозы, направляемых злоумышленниками на манипулирование общественным сознанием. При этом явления социальной коммуникации, возникающие вследствие взаимодействия акторов, характеризуются непредсказуемостью процессов. Это приводит к возникновению состояния неуправляемого хаоса, который имеет непосредственное отражение в оффлайне. С целью обеспечения управляемости такими процессами в статье предложено использовать концепцию синергетического управления взаимодействием акторов в социальных интернет-сервисах. Синтезируемое в результате синергетическое управление обеспечивает повышение устойчивости виртуальных сообществ к деструктивным воздействиям в разрезе управления спросом акторов на контент в социальных интернет-сервисах. На основе выбранного динамического инварианта показана возможность обеспечения протекания в виртуальных сообществах процессов управляемой самоорганизации актеров для перехода системы в управляемое подконтрольное состояние. Выбранный в статье атTRACTOR учитывает базовые особенности коммуникации акторов, такие как изменение во времени ценности контента и обеспечение достижения поставленной цели от взаимодействия акторов виртуального сообщества в точке всплеска синергетического эффекта. В результате воздействия синтезированного синергетического управления на инвариантном многообразии реализуется редукция степеней свободы нелинейной динамической системы – процесса взаимодействия. Как следствие, упрощается процесс искусственно управляемого поддержания заданного уровня спроса акторов и обеспечивается удачный стартап новых брендов.

Ключевые слова: социальные интернет-сервисы, взаимодействие акторов, спрос на контент, динамический хаос, синергетическое управление, атTRACTOR, информационная безопасность.

Molodetska K.

Ph.D., Associate Professor of IT and Simulation Department at Zhytomir National Agro-Ecological University, Zhytomir, Ukraine

METHOD OF MAINTENANCE THE SPECIFIED LEVEL FOR SOCIAL NETWORKING SERVICES ACTORS' MARKET FOR THE CONTENT

Modern social networking services are a brand-new virtual platform to host online communication between participants of virtual communities. Social networking services having good communicational capabilities and thus enjoying popularity bear a number of potential threats to individual, social and national information security. The greatest are threats aimed to manipulate the social mind. Social communications resulting from the actors' interactions yet feature unpredictability of the processes. This creates an uncontrolled chaotic state that glasses itself offline. It is suggested in the paper to apply the concept of social network actors' interactions synergetic control to those processes. The synergetic control synthesized improves the social proof tolerance by controlling social networking services actors' market for attractive information. The dynamic invariant chosen shows the possible controlled self-organization process in a virtual community to drive the system transition to the controlled state. The attractor shown in the paper factors such basic features of the actors' communication as the content value time shift and the virtual community actors' interactions goal hit in a synergy splash point. Under synergetic control the degrees of freedom of a nonlinear dynamic system get reduced on the invariant manifold as a result of the interaction process. That simplifies the content market management and promotes new startups.

Keywords: social networking services, actors' interactions, content market, chaotic dynamics, synergetic control, attractor, information security.

REFERENCES

1. Hryshchuk R. V. Startap virtualnykh spilnot u sotsialnykh merezhakh za pryntsypom krytychnoi masy, *Zakhyst informatsii*. Luhansk, SNU, 2015, Spetsialnyi vypusk, pp. 19–25.
2. Hryshchuk R. V., Danyk Yu. H., Samchyshyn O. V. Mobilni sotsialni internet-servisy yak odyn iz riznovydiv masovoi komunikatsii na suchasnomu etapi, *Bezpeka informatsii*, 2015, vol. 21. No. 1, pp. 16–20.
3. Danyk Yu. H., Hryshchuk R. V., Samchyshyn O. V. Suchasni mobilni sotsialni internet servisy yak odyn z perspektivnykh zasobiv masovoi komunikatsii, *Aktualni problemy upravlinnia informatsiinoiu bezpekoiu derzhavy, nauk.-prakt. konf.* 19 berez. 2015 r. Kiev, Tsentr. navch., nauk. ta period. vydan NA SB Ukrayni, 2015, pp. 232–235.
4. Epstein Joshua M. Generative Social Science : Studies in Agent-Based Computational Modeling. Princeton, Princeton University Press, 2012, 384 p.
5. Tatnall, A. Actor-Network Theory and Technology Innovation : Advancements and New Concepts. Information Science Reference. New York, 2010, 328 p.
6. Peleshchyn A. M., Sierov Yu. O., Berezko O. L. [ta in.] ; za red. A. M. Peleshchynsya Protsesys upravlinnia interaktyvnymy sotsialnymy komunikatsiyami v umovakh rozvityku informatsiinoho suspilstva : monohrafiia. L'viv, Vydy Lvivskoi politekhniki, 2012, 368 p.
7. Lipkan V. A. Natsionalna bezpeka Ukrayni : navch. posib. Kiev, Kondor, 2008, 552 p.
8. Gubanov D. A., Novikov D. A., Chhatishvili A. G.; pod red. D. A. Chhatishvili Social'nye seti : modeli informacionnogo vlijaniya, upravlenija i protivoborstva. Moscow, Izd. fiz.-mat. lit., 2010, 228 p.
9. Hryshchuk R. V., Molodetska K. V. Kontseptsia synergetichnoho upravlinnia protsesamy vzaemodii ahentiv u sotsialnykh internet-servisakh, *Bezpeka informatsii*, Kiev, NAU, 2015, vol. 21, Ch. II, pp. 123–130.
10. Serikov A. V. Jeffektivnost' hozjajstvennoj dejatel'nosti : opredelenie, izmerenie, sinergeticheskoe upravlenie, *Ekonomichij visnik Donbasu*, 2011, No. 2 (24), pp. 212–219.
11. Epstein Joshua M. Nonlinear Dynamics, Mathematical Biology, and Social Science : lecture notes. Massachusetts, Addison-Wesley Publishing Company, 1997, 164 p.
12. Sazanov V. M. Social'nye seti : Analiz-Tehnologii-Perspektivy. Obzor : [Elektronij resurs] Sajt Laboratori SVM. Rezhim dostupu : http://ntl-cbm.narod.ru/CBM-NET/net_rew.doc (data zvernennia: 17.08.15). Nazva z ekranu.
13. Horbulin V. P., Dodonov O. H., Lande D. V. Informatsiini operatsii ta bezpeka suspilstva : zahrozy, protydii, modeliuvannia : monohrafiia. Kiev, Intertekhnolohiia, 2009, 164 p.
14. Kolesnikov A. A. Sinergeticheskoe metody upravlenija slozhnymi sistemami : teoriya sistemnogo sinteza. Moscow, Editorial URSS, 2005, 228 p.
15. Prigozhin I., Stengers I.; pod. obshh. red. V. I. Arshinova, Ju. L. Klimontovicha, Ju. V. Sachkova Porjadok iz haosa : Novyi dialog cheloveka s prirodoj [per. s angl.]. Moscow, Nauka, 1984, 432 p.
16. Samoilenco A. M., Kryvosheia S. A., Perestiuk M. O. Dyferentsialni rivniania u prykladakh i zadachakh : navch. posib. Kiev, Vyshcha shkola, 1994, 455 p.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 4/2015

Науковий журнал

Головний редактор – д-р фіз.-мат. наук В. В. Погосов

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

Комп’ютерне моделювання та верстання
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 22.12.2015. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різogr. друк. Ум. друк. арк. 13,72.
Тираж 300 прим. Зам. № 1244.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.