



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 2(37) 2016

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2016

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 2(37) 2016

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2016

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 2(37) 2016

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

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

Zaporizhzhya

ZNTU

2016

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал реферується та індексується у провідних міжнародних та національних реферативних журналах і наукометричних базах даних, а також розміщується у цифрових архівах та бібліотеках з безкоштовним доступом у режимі on-line (у т. ч. DOAJ, DOI, CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВІНІТІ, Джерело), повний перелік яких подано на сайті: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор – Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

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

Члени редколегії:

Андролідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

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

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

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

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 13 від 01.07.2016.

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

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

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

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

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Члены редколлегии:

Андроидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Япония

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

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

Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина

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

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

Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль

Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша

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

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

Папшицкий М., д-р философии, Польша

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

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 13 от 01.07.2016.

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, 2016

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

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

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece

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

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

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 № 13 dated 01.07.2016.

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>Ivanov I. A., Korolev P. S., Polesskiy S. N., Zhadnov V. V.</i> THE DESIGN PROCEDURE OF SPECIFIED OPERATING LIFE OF FIBER-OPTIC CABLES.....	7
РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	15
<i>Осадчук О. В., Коваль К. О., Притула М. О.</i> РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИСТОРНІЙ СТРУКТУРІ.....	15
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	20
<i>Прохоров А. В., Кузнецова Ю. А.</i> АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИКЛАСТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ.....	20
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	29
<i>Бісікало О. В., Васілевський О. М.</i> ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СЕНСУ ПРИРОДНО-МОВНИХ КОНСТРУКЦІЙ.....	29
<i>Бодяньський Є. В., Тищенко О. К., Бойко О. О.</i> ЕВОЛЮЦІЙНА КАСКАДНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ НЕЙРО-ФАЗЗИ ВУЗЛІВ.....	40
<i>Левин В. И.</i> РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДОМ ДЕТЕРМИНИЗАЦИИ.....	46
<i>Скрупский С. Ю.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ.....	56
<i>Субботин С. А.</i> МЕТОД СИНТЕЗА ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ РАДИАЛЬНО-БАЗИСНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ С ПОДДЕРЖКОЙ ОБОБЩАЮЩИХ СВОЙСТВ.....	64
<i>Штовба С. Д., Галуцук А. В.</i> КРИТЕРІЙ НАВЧАННЯ НЕЧІТКОГО КЛАСИФІКАТОРА НА ОСНОВІ ВІДСТАНИ МІЖ ГОЛОВНИМИ КОНКУРЕНТАМИ.....	70
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	77
<i>Гальченко А. В., Козіна Г. Л.</i> МОДИФІКАЦІЯ АЛГОРИТМУ ЗАПЕРЕЧУВАНОВОГО ШИФРУВАННЯ МЕНГА.....	77
<i>Гороховатский В. А., Берестовский А. Е., Передрий Е. О.</i> СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ПРОСТРАНСТВА СТРУКТУРНИХ ПРИЗНАКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ САМООБУЧЕННЯ В ЦЕЛЯХ РЕЗУЛЬТАТИВНОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	87
<i>Дичка І. А., Онай М. В., Дрозда Т. П.</i> МОДИФІКОВАНИЙ ВІКОННИЙ МЕТОД ОДНОКРАТНОГО МНОЖЕННЯ ТОЧКИ ЕЛІПТИЧНОЇ КРИВОЇ НА СКАЛЯР У ПОЛІ $GF(P)$	95
<i>Нич Л. Я., Шаховська Н. Б., Камінський Р. М.</i> ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПОШУКУ В СИСТЕМАХ КОНСОЛІДОВАНОЇ ІНФОРМАЦІЇ.....	103
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	110
<i>Kołowrocki K., Kwiatkowska-Sarnecka B., Soszyńska-Budny J.</i> RELIABILITY AND RISK OPTIMIZATION OF MULTISTATE SYSTEMS WITH APPLICATION TO PORT TRANSPORTATION SYSTEM.....	110
<i>Лахно В. А.</i> МОДЕЛЬ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ГОРОДСКИМИ АВТОБУСНИМИ ПЕРЕВОЗКАМИ.....	119

CONTENTS

RADIOPHYSICS.....	7
<i>Ivanov I. A., Korolev P. S., Poleskiy S. N., Zhadnov V. V.</i> THE DESIGN PROCEDURE OF SPECIFIED OPERATING LIFE OF FIBER-OPTIC CABLES.....	7
RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	15
<i>Osadchuk O. V., Koval K. O., Prytula M. O.</i> THE RADIOMEASURING CONVERTER OF THE MAGNETIC FIELD BASED ON TRANSISTORS STRUCTURE.....	15
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	20
<i>Prokhorov A. V., Kuznetsova Yu. A.</i> AGENT-BASED MODELING OF MULTICLUSTER TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF NANO-ELECTRONIC MANUFACTURING.....	20
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	29
<i>Bisikalo O. V., Vasilevskiy O. M.</i> EVALUATION OF UNCERTAINTY MEASURING OF SENSE OF THE NATURAL LANGUAGE CONSTRUCTS.....	29
<i>Bodyanskiy Ye. V., Tyshchenko O. K., Boiko O. O.</i> AN EVOLVING CASCADE SYSTEM BASED ON NEURO-FUZZY NODES.....	40
<i>Levin V. I.</i> CALCULATION AND ANALYSIS OF INCOMPLETELY DEFINED FUNCTIONS BY DETERMINATION METHOD.....	46
<i>Skrupsky S. Yu.</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF METHOD FOR THE SYNTHESIS OF NEURO-FUZZY MODELS IN A PARALLEL COMPUTER SYSTEM.....	56
<i>Subbotin S. A.</i> THE METHOD OF DIAGNOSTIC MODEL SYNTHESIS BASED ON RADIAL BASIS NEURAL NETWORKS WITH THE SUPPORT OF GENERALIZATION PROPERTIES.....	64
<i>Shtovba S. D., Galushchak A. V.</i> FUZZY CLASSIFIER LEARNING BASED ON DISTANCE BETWEEN THE MAIN COMPETITORS.....	70
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	77
<i>Galchenko A. V., Kozina G. L.</i> MODIFICATION OF MING'S DENIABLE ENCRYPTION ALGORITHM.....	77
<i>Gorokhovatsky V. A., Berestovskiy A. E., Peredrii E. O.</i> SYSTEMATIZATION OF SPACE OF STRUCTURAL FEATURES BASED ON SELF-LEARNING METHODS FOR EFFECTIVE IMAGE RECOGNITION.....	87
<i>Dychka I. A., Onai M. V., Drozda T. P.</i> MODIFIED METHOD FOR ELLIPTIC CURVE SCALAR POINT MULTIPLICATION OVER GF(P).....	95
<i>Nych L. Ya., Kaminskyj R. M., Shakhovska N. B.</i> EFFECTIVENESS EVALUATION OF SEARCH IN INFORMATION SYSTEMS WITH CONSOLIDATED INFORMATION.....	103
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	110
<i>Kolowrocki K., Kwiatkowska-Sarnecka B., Soszynska-Budny J.</i> RELIABILITY AND RISK OPTIMIZATION OF MULTISTATE SYSTEMS WITH APPLICATION TO PORT TRANSPORTATION SYSTEM.....	110
<i>Lakhno V. A.</i> MODEL OF INTELLIGENT MANAGEMENT SYSTEM OF CITY BUS TRANSPORTATIONS.....	119

РАДИОФІЗИКА

РАДИОФИЗИКА

RADIOPHYSICS

UDC 621.396.6.019

Ivanov I. A.¹, Korolev P. S.², Polesskiy S. N.³, Zhadnov V. V.⁴

¹PhD, Senior teacher of department of Electronic Engineering, National research university 'Higher school of economics', Moscow, Russia

²BS, Master's student of department of Electronic Engineering, National research university 'Higher school of economics', Moscow, Russia

³PhD, Assistant professor of department of Computer Engineering, National research university 'Higher school of economics', Moscow, Russia

⁴PhD, Associate Professor, Professor of department of Electronic Engineering, National research university 'Higher school of economics', Moscow, Russia

THE DESIGN PROCEDURE OF SPECIFIED OPERATING LIFE OF FIBER-OPTIC CABLES

The task of prediction of fiber cable operating life for automating of design study of reliability of optical-fiber transmission system was solved in the paper. The paper offers generation method of mathematical models of complex coefficients, which brings out from the input models failure rates the coefficients, which considers the effects of regimes and conditions of usage of fiber cables on the durability indices.

The developed procedure does not require carrying out the experimental investigations and tests, based on the using of standardized models of failure rates and durability characteristics of fiber cables. Herewith for the prescribed modes and terms of usage of fiber cables automatically detected the right process of degradation, which determines values of operating life.

In contrast to the prediction technique of equipment operating life on the base of the probabilistic-physical failure patterns, the offered method operates with the dates, which are stated in the standard-technical documentation on the fiber cables, and allows to increase forecast precision of the operating life in comparison with the methods, which is recommended in the branch standards.

In the paper were developed software, which implements offered mathematical tool, by which were solved real-world forecasting problem of the operating live of the cable type ОК-ПН-01-5-60.

Keywords: optical-fiber transmission system, optical-fiber cable, reliability, durability, operating life, failure rate.

NOMENCLATURE

d_{\max} is a maximal value of the damping constant in the fiber cable, by which provides operation of fiber-optic systems of information transmission;

I is a quantity of self-contained failure flows of the component parts of electro-radio elements;

I is a quantity of operating temperature (except the maximal allowed according to the technical requirements);

J_i is a quantity of factors, which is considered in i failure flow;

L_k is a length of fiber cable;

N is a quantity of the bends (back winding, etc.) of the cable per time of its operation;

m is a quantity of the optic fibers in the cable;

t is a operating time of the cable;

$t(\text{work})$ is a cable temperature in the operating mode, °C;

t_i is a total interval of operating time of the cable by the temperature T_i ;

t_{\max} is a total interval of operating time of the cable by the maximal temperature according to the technical requirements;

T_{\max} is a maximal allowed cable temperature according to the technical requirements;

λ_{b1} is a base failure rate of the optical fiber during the process of its operating time, referred to the 1m cable length;

λ_{b2} is a base sudden failure rate of the optical fiber composed of fiber cables during the process of its repeated back winding referred to the 1m cable length;

λ_{b3} is a base sudden failure rate of structure of cables during the process of its operating time, referred to the 1m cable length;

λ_{b4} is a base sudden failure rate of structure of cables during the process of its repeated back winding, referred to the 1m cable length;

λ_{b5} is a base gradual failure rate of fiber cables during the process of its operating time;

λ_{bi} is a base failure rates i failure flow;

λ_e is a failure rate of the fiber cable on the maximal regime and conditions of usage according to the technical requirements;

$\lambda_e(\text{work})$ is a failure rate of the fiber cable on the operating mode;

v is a constant variation of the resource; $\chi_\gamma = 95\%$, $\chi_\gamma = 99,9\%$ – fractile of the normalized normal distribution

for the probability $\gamma = 95\%$ и $\gamma = 99,9\%$ accordingly;

K_{rj}^* (work) is a value of the standardized coefficient for the operating mode of the cable;

K_{ij} is a coefficient, which considers j factor in i failure flow;

$K_{r,yj}$ is a coefficient, which depends on the mode and conditions of usage of cable;

K_E is a coefficient, which depends on energy of activation of degradation processes;

$K_{o,r}$ is a coefficient of cable operation rate in the regime of application of communication line;

CS_1 is a serviceability criterion;

K_{cs1} is a coefficient of serviceability criterion of fiber cables by quantity of attenuation;

K_c is a cable capacity factor (by critical parameter);

$K_{av,b}$ is an average quantity of the bends (back winding, etc.) of the cable per time unit of its operating;

K_{T1} is a temperature coefficient of degradation speed of statical, mechanical strength of optical fiber;

K_{T2} is a temperature coefficient of change of dynamic, mechanical strength of optical fiber and cable sheath;

K_{T3} is a temperature coefficient of degradation speed of safety and reinforcing elements of structure of cable;

K_{T4} is a temperature coefficient of speed change of tensile strength of cable serving;

K_{T7} is a coefficient, which characterize maximal reversible changes of the damping constant in the fiber cable in over the range negative operating temperature;

K_e is a stiffness coefficient of operating conditions;

$H(\text{work})$ is a load of cable (by critical parameter) in the mode of operation;

$H(TR)$ is a maximum permissible load of the cable (by critical parameter) according to the technical requirements;

$T_{o,k}$ is a total operating time of the cable in a time $T_{o,1}$;

$T_{o,1}$ is a total operating time of the communication line during the year;

$T_{r,\gamma}$ is a gamma-percentile operating life before the writing of the cable in all regimes and terms of operation under the technical requirements;

T_{eq} is an operative temperature of components operation;

ε is a mean-root square error.

INTRODUCTION

In the period of intensive development of information and communication means the important place in our life plays systems of transfer, processing and storing of information. In spite of all-round introduction of wireless technologies, the most widespread has still the systems, which are constructed on the wire communication lines. In the systems of information transmission, where it is necessary to provide high speed of information exchange, quality and reliability, mainly will be applied the fiber-optic cables.

Obviously, by the design of such type communication lines the durability characteristics of fiber cables (minimal time between failures, gamma-percentile operating life, life time) will determine extensively indices of its durability. Consequently for increasing of the accuracy and validity of calculation value of durability characteristics of communication lines on the base of fiber cables it is

necessary to use not only data, which is stated in the technical conditions for the cable, but also features of exploitation patterns composed of communication line, procedure and conditions of application.

The object of research is the forecasting method of optical cables resource in the reference data and the parameters of the modes and conditions of their application.

Calculated methods of operating life prediction [1, 2], usually, characterizes low self-descriptiveness [2], and also considerable time spent for the experimental investigation [1]. In the early design stage, the usage of such methods is difficult by the task solution of provision of the necessary level of durability indices. This situation brings about the necessity of models design, which does not demand carrying out of the tests and more fully considered the influence of conditions and terms of usage of fiber cables.

Subject of investigation are the methods and models, which is used for analysis of the design level of durability of fiber cables.

The goal of this work is design of methodology, which allows to increase the accuracy of prediction of durability indices of fiber cables and ensure the probability calculation of conditions of usage, in the frame of the approved at the present time calculation methodology of the operating life of electronic means.

1 PROBLEM STATEMENT

We consider characteristics of cable durability $T_{p,\gamma TY} = \{T_{p,\gamma 1TY}, T_{p,\gamma 2TY}, \dots, T_{p,\gamma lTY}\}$ – set l gamma-percentile operating in maximum and lite conditions under technical requirements and corresponding to its condition use $v = \{R_{1TY}, R_{2TY}, \dots, R_{lTY}\}$ – set l vectors параметров parameter conditions, and also exploitation pattern optical-fiber transmission system $t = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$ – set k residence time of optical-fiber transmission system in different operation conditions, waiting and storing and respective application condition, waiting and storing $R = \{R_1, R_2, \dots, R_k\}$.

In that case forecasting problem of gamma-percentile operating life of fiber cables will be concerned with determination of relation $T_{p,\gamma} = F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_L)$ and parameter value (Π) .

For quality rating of formed model can be used the criteria of mean-root square error [3]:

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^l [T_{p,\gamma_i TY} - F(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{L_i})]^2 \rightarrow 0 \text{ при } L \rightarrow \max. \quad (1)$$

2 LITERATURE REVIEW

Calculated methods of forecasting of operating life can be divided into probabilistic and determinate.

Probabilistic methods [1, 4–5] assumes pilot researches of degradation process of electro-radio equipment, according to which forms the functions of distribution of accrued operating time and determines parameters. Yet even if prefer the hypothesis of one or other kind of cumulative distribution curve, then determination of its parameters according to the technical requirements will be nontrivial task, let alone about receiving of relations from the modes and operating conditions of electro-radio equipment[6]. Though, that the probabilistic methods found their way in a number of national standards

of CIS countries (for example, [7]), in the engineering practical work still use determinate methods [2].

Basic data for calculation of durability indices of electro-radio equipment according to the methodology, stated in [2] are the normalized in technical requirements durability characteristics of electro-radio equipment and parameters of the model of communication line.

Value of gamma-percentile operating life of electro-radio equipment in operating mode is calculated under the mathematical model:

$$T_{r,\gamma}(\text{work}) = \frac{T_{r,\gamma}}{K_c \cdot K_{o,r}}, \quad (2)$$

where

$$K_{o,r} = \frac{T_{o,k}}{T_{o,l}}, \quad K_c = \frac{H(\text{work})}{H(\text{TR})}$$

Values $T_{r,\gamma}$ stated in the data book [8]. Fig. 1 shows a fragment with data of reliability characteristics of fiber cables.

Справочник "Надежность ЭРИ" Компоненты волоконно-оптических систем
передачи информации

Таблица 8

**Характеристика надежности и справочные данные
отдельных марок оптических кабелей**

Марка кабеля	d ₁ , шт	λ ₆₁ , 1/ч.м	d ₂ , шт	λ ₆₂ · 10 ⁶ , 1/пер.м	d ₃ , шт	λ ₆₃ , 1/ч.м	d ₄ , шт	λ ₆₄ · 10 ⁶ , 1/пер.м	d ₅ , шт	λ ₆₅ , 1/ч	T _{н.м} , тыс.ч (при t _{раб.макс} , °C)	T _{р,γ} , тыс.ч (γ=95%)
Оптические кабели												
<i>Монтажные и для подвижных объектов</i>												
ОК-БС01	0	3,25 · 10 ⁻¹²	-	-	0	4,44 · 10 ⁻¹⁰	-	-	7	4,12 · 10 ⁻⁹	10 (70)	11,2
ОК-БС06	0	6,58 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	3,72 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	9,03 · 10 ⁻⁸	10 (85)	15
ОК-БС07	0	1,94 · 10 ⁻¹¹	-	-	0	4,25 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	2,93 · 10 ⁻⁹	10 (85)	15
ОК-МС01	0	3,41 · 10 ⁻¹²	-	-	0	3,54 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	4,67 · 10 ⁻¹⁰	10 (70)	11,2
ОК-МС06	0	7,67 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	3,27 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	1,06 · 10 ⁻⁷	10 (85)	15
ОК-МС09	0	1,21 · 10 ⁻⁹	-	-	0	5,42 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	3,55 · 10 ⁻⁷	10 (85)	15
ОК-МС11	0	1,17 · 10 ⁻⁸	-	-	0	5,03 · 10 ⁻⁹	-	-	0	6,38 · 10 ⁻⁶	10 (85)	15
СБ-50-2	0	3,56 · 10 ⁻¹⁵	-	-	0	1,02 · 10 ⁻¹⁴	-	-	8	5,46 · 10 ⁻¹²	1 (200)	1,5
СБ-200-2	0	8,64 · 10 ⁻¹⁵	-	-	0	2,16 · 10 ⁻¹⁴	-	-	0	1,84 · 10 ⁻¹¹	1 (200)	1,5
<i>Полевые и для стационарных объектов и сооружений</i>												
ОК-СС01	0	4,62 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	7,88 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	6,32 · 10 ⁻⁸	5 (85)	10
ОК-СС02	0	9,31 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	5,34 · 10 ⁻⁹	-	-	1	8,74 · 10 ⁻⁷	150 (50)	187,5
ОК-СС03	0	4,66 · 10 ⁻¹⁰	-	-	0	5,36 · 10 ⁻⁹	-	-	0	2,61 · 10 ⁻⁷	150 (50)	187,5
ОК-ПН-01	0	9,05 · 10 ⁻⁹	1	0,0098	3	2,47 · 10 ⁻⁸	3	2,22	6	1,74 · 10 ⁻⁵	30 (70)	60

Figure 1 – Table fragment from the data book "Reliability of electro-radio product"

As fig. 1 shows according to the classification of the data book [1] fiber cables are the electro-radio equipment, which are related to the group “Fiber cables” type “Components of optical fiber systems of information transmission”, for which standardized $T_{m,h}$ и $T_{p,\gamma}$.

Consider the value calculation $Tr:\gamma$ (work) by the example of fiber cable type OK-III-01-5-60. The cable is intended for operating in the communication lines by conditions of stationary, nonstationary and air laying and operation in the field conditions with the repeated laying.

Construction of the cable consists of quartz optic fibers, longitudinal laid together with thread CBM-K in cover made from the epoxyacrylate (fig. 2).

According to the technical requirements [9] are indicated following values of no failure operating time (minimal) of the cable for the application mode:

- to 35°C – 200000 h. (light mode);
- to 55°C – 100000 h. (light mode);
- 70°C – 30000 h (maximum mode).

As follows from the fig. 2 and [9] “critical” parameter for the cable type OK-III-01 is the temperature. In that case

$$K_c = \frac{t(work)}{t_{work_max}} \quad (3)$$

Find the values K_c by formula (1) by $K_{or} = 1$ and by formula (2). The results of calculation are shown in the table 1.

As follows from the table 1 by using formula (2) if in the technical requirements are not indicated data for the facilitated regimes, above considered method of standard [2] gives underestimation of durability characteristics of the fiber cables.

Consequently, for improving the accuracy of prediction of operating life of fiber cables it is necessary to find mathematical model, which adequate describes relation of operating life from the modes and conditions usage of cables, and determine parameters and coefficients.

3 MATERIALS AND METHODS

For receiving of calculation correlation of estimation of gamma-percentile operating life of fiber cables on the facilitated regimes we will take principle of duality [10], reasoning from we can state, that [11, 12]:

$$\frac{T_{r,\gamma}work}{T_{r,\gamma}} \sim \frac{\lambda_e}{\lambda_e(work)} \quad (4)$$



Figure 2 – Sketch of construction cable type OK-III-01-5-6/0

Table 1 – The results of calculation of capacity factor

№	$t(work), ^\circ C$	Capacity factor	
		Model (1)	Model (2)
1	2	3	4
1	35	0,15	0,5
2	55	0,3	0,786
3	70	1,0	1,0

Mathematical calculation modes of failure rates of fiber cables are stated in the data book [8]. As the fiber cables refers to the group of complex items, cumulative, which compounded of self-contained failure flows of its component parts, mathematical calculation mode of its failure rates has the following view:

$$\lambda_e = \sum_{i=1}^I \lambda_{e_i} = \sum_{i=1}^I \left[\lambda_{b_i} \cdot \prod_{j=1}^{J_i} (K_{i,j}) \right] \quad (5)$$

Mathematical modes of the failure rates (λ_{e_i}) has the following view:

$$\lambda_{e_1} = \lambda_{b_1} \cdot m \cdot K_{T1} \cdot L_K \cdot K_e ; \quad (6)$$

$$\lambda_{e_2} = \lambda_{b_2} \cdot m \cdot K_{av,b} \cdot K_{T2} \cdot L_K \cdot K_e ; \quad (7)$$

$$\lambda_{e_3} = \lambda_{b_3} \cdot K_{T3} \cdot L_K \cdot K_e ; \quad (8)$$

$$\lambda_{e_4} = \lambda_{b_4} \cdot K_{av,b} \cdot K_{T4} \cdot L_K \cdot K_e ; \quad (9)$$

$$\lambda_{e_5} = \lambda_{b_5} \cdot m \cdot K_{T1} \cdot K_{cs1} . \quad (10)$$

Coefficient values K_{T1} and K_{T3} calculated by the formula:

$$K_T = e^{-K_E \left(\frac{1}{T_{eq}} - \frac{1}{298} \right)} \quad (11)$$

Value T_{eq} determines by the formula:

$$T_{eq} = \left[\frac{1}{T_{max}} + \frac{1}{K_E} \cdot \ln \left(\frac{t}{t_{T_{max}} + \sum_{i=1}^I t_i^*} \right) \right]^{-1} \quad (12)$$

Value t_i^* determines by the formula:

$$t_i^* = t_i \cdot e^{-K_E \left(\frac{1}{T_i} - \frac{1}{T_{max}} \right)}, \quad (13)$$

where:

$$t = t_{T_{max}} + \sum_{i=1}^I t_i .$$

Value $K_{av,b}$ determines by the formula:

$$K_{av,b} = \frac{N}{t} \quad (14)$$

Value of the serviceability criterion CS_{12} , by which defines value of coefficient K_{cs1} , determines by the formula:

$$CS_1 = \frac{d_{max}}{K_{T7}} \quad (15)$$

Since the negative temperature is the factor, which reduces the rate of chemical reaction, then in the calculation durability value models (7) and (9) can be disregarded. In addition, analysis of the formulas (6), (8) and (10)–(15) and the tables of the data book [1] shows, that the parameters of

the modes and conditions of usage of fiber cables are K_e , N , t , T_{max} , t_{Tmax} , set of values T_p , set of values t_i and I . Remaining parameters and coefficients of the formulas (6), (8) and (10)–(15), determines in fact values λ_{bi} , as it depends on the features technological structure of the cable.

According to the methodology of the standard [2], by the calculation of the durability values of the equipment, by which total failure flow rate consists of self-contained failure flows of its component parts, the value of the resource determines in the following way:

$$T_{r,\gamma} = \min_{i=1,3} \{T_{r,\gamma_1}, T_{r,\gamma_3}, T_{r,\gamma_5}\}. \quad (16)$$

Hence, using (4) find the formula for calculation of the coefficients, which depends on the mode and conditions of usage of cable, for each self-contained failure flow:

$$K_{H1} = \frac{\lambda_{e1}(work)}{\lambda_{e1}} = \frac{K_{T1}(work) \cdot K_e(work)}{K_{T1} \cdot K_e}; \quad (17)$$

$$K_{H3} = \frac{\lambda_{e3}(work)}{\lambda_{e3}} = \frac{K_{T3}(work) \cdot K_e(work)}{K_{T3} \cdot K_e}; \quad (18)$$

$$K_{H5} = \frac{\lambda_{e5}(work)}{\lambda_{e5}} = K_{T1}(work). \quad (19)$$

In formulas (17)–(19) indicate:

$$\prod_{j=1}^{J_i} K_{i,j} = K_{r,\gamma_i}.$$

4 EXPERIMENTS

To verify the proposed method find the value K_{r,γ_i} for maximal the mode and conditions of usage of cable type

OK-III-01-5-6/0 according to the data, indicated in the data book [8] and technical requirement [9]. Table 2 shows the results of calculation.

In a similar way calculate the value K_{r,γ_i} for the temperature $T_{max} = 35^\circ\text{C}$ and $T_{max} = 55^\circ\text{C}$ and divide it into the limit value from the table 2. Table 3 shows the results of calculation.

Data, which is stated in the table can be considered as functions $T_{o,m}(K_{r,\gamma_i}^*)$, defined of its values. Besides, as the table 3 shows, functions $T_{o,m}(K_{r,\gamma_1}^*)$ and $T_{o,m}(K_{r,\gamma_5}^*)$ are congruent. So the form (16) has the following view:

$$T_{r,\gamma} = \min \{T_{r,\gamma_1}, T_{r,\gamma_3}\}.$$

Find the value 95% of the cable resource for the temperature 35°C and 55°C . For that using the formula, which is stated in the standard [2]:

$$T_{r,\gamma} = \frac{1 - v \cdot \chi_{\gamma=95\%}}{1 - v \cdot \chi_{\gamma=99,9\%}} \cdot T_{o,m}. \quad (20)$$

Find the value of the constant variation, solve (20) relatively v by values $T_{o,m}$ and $T_{r,\gamma}$, stated on the picture 2:

$$v = \frac{T_{r,\gamma} - T_{o,m}}{\chi_{\gamma=99,9\%} \cdot T_{r,\gamma} - \chi_{\gamma=95\%} \cdot T_{o,m}} = 0,22.$$

By that value constant variation 95% cable resource by the temperature 35°C is 400000 h., by temperature 55°C – 200000 h.

5 RESULTS

For the approximation of the relationship $T_{r,\gamma}(K_{r,\gamma}^*)$ can be used piecewise linear function. Besides, in the technical requirements [3] values $T_{o,m}$ and for normal temperature (25°C) are not stated, let take, in the temperature range 25 – 35°C value is constant and equal to 400000 h.

Table 2 – Values of the coefficient K_{p,γ_i}

№	Design formula	Value	Reference
1	2	3	4
1	$K_{r,\gamma_1} = K_{T1} \cdot K_e$	371.3	$I = 0; t_i = 0; t_{Tmax} = t; t = 30000 \text{ h}$ – minimal operating time according to the technical requirements [3]; $T_{max} = 70^\circ\text{C}$ (343°K) – according to the technical requirements [3]; $K_{E1} = 13.44 \cdot 10^3$ – according to the table in the data book [2]; $K_e = 1$ (group 1.1) – according to the table in the data book [2]
2	$K_{r,\gamma_3} = K_{T3} \cdot K_e$	34.6	$I = 0; t_i = 0; t_{Tmax} = t; t = 30000 \text{ h}$ – minimal operating time according to the technical requirements [3]; $T_{max} = 70^\circ\text{C}$ (343°K) – according to the technical requirements [3]; $K_{E3} = 8.05 \cdot 10^3$ – according to the table in the data book [2]; $K_e = 1$ (group 1.1) – according to the table in the data book [2]
3	$K_{r,\gamma_5} = K_{T1}$	371.3	$I = 0; t_i = 0; t_{Tmax} = t; t = 30000 \text{ h}$ – minimal operating time according to the technical requirements [3]; $T_{max} = 70^\circ\text{C}$ (343°K) – according to the technical requirements [3]; $K_{E1} = 13.44 \cdot 10^3$ – according to the table in the data book [2]

Table 3 – Value of the standardized coefficients K_{r,γ_i}^*

№	Temperature	K_{r,γ_1}^*	K_{r,γ_3}^*	K_{r,γ_5}^*	$T_{o,m}$, thousand. h.
1	2	3	4	5	6
1	35°C	$1,16 \cdot 10^{-2}$	$6,94 \cdot 10^{-2}$	$1,16 \cdot 10^{-2}$	200,0
2	55°C	0,167	0,341	0,167	100,0
3	70°C	1,0	1,0	1,0	30,0

Having absorbed the disclaimers of the relationship $T_{r,\gamma}$ from K_{ry}^* can be represented in the form:

$$T_{r,\gamma}(work) = \begin{cases} 400000 \text{ npu} & 0 \leq K_{r,y}^*(work) \leq K_{r,y_1}^* \\ T_{r,\gamma_n} + \frac{T_{r,\gamma_{n+1}} - T_{r,\gamma_n}}{K_{r,y_{n+1}}^* - K_{r,y_n}^*} \cdot [K_{r,y}^*(work) - K_{r,y_n}^*] & \text{для } K_{r,y_n}^* < K_{r,y}^*(work) \leq K_{r,y_{n+1}}^* \end{cases}$$

Diagrams of relationship $T_{r,\gamma}(work)$ from $K_{ry1}^*(work)$ and $K_{ry3}^*(work)$ are stated on the fig. 3.

Fig. 4 shows relation $K_{ry1}^*(work)$ from the temperature T_i and $(\frac{\Delta t}{t})K_i$, i.e. interval size of cable operation by the temperature T_i to the total hours of service t , which was received with the help of designed software in the MathCad programming language [13].

Calculation of the values $T_{r,\gamma}(work.g)$ for the group of equipment, which uses cable, distinct from the group 1.1 calculated by the formula [5]:

$$T_{r,\gamma}(work.g) = \frac{T_{r,\gamma}(work)}{K_e}$$

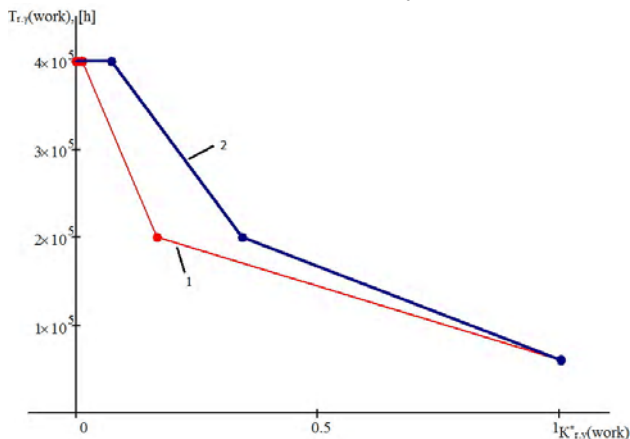


Figure 3 – Relationship of gamma-percentile operating life from the standardized coefficient : 1 – from $K_{ry1}^*(work)$; 2 – $K_{ry3}^*(work)$

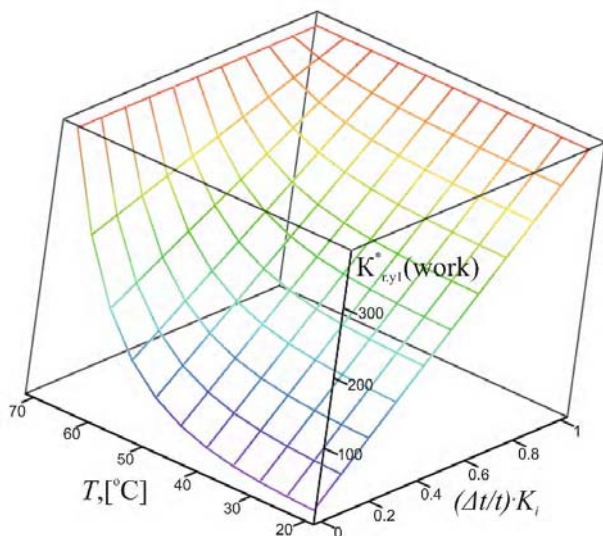


Figure 4 – Relation $K_{ry1}^*(work)$ from the temperature T_i and interval size of cable operation by the temperature T_i to the total hours of service t

Moreover, it should also be noted, that in this methodology value $K_{o,r}$ is not used, as the parameters of the exploitation pattern explicitly enters into the formula (11). Therefore the received value will be numerically equal the service life of the cable.

6 DISCUSSION

Suggested methodology of forecasting of operating life of fiber cables in comparison with methodology [2] provides substantially larger calculation accuracy. However suggested methodology demands high volume of basic data and higher labor-intensiveness of calculation, than methodology [2].

In comparison with methodologies, which are based on the probabilistic methods [1, 4–5] suggested methodology does not require experimental researches and tests, at the same time provides comparable accuracies of forecasting of durability indices.

Weakness of the suggested methodology is using piecewise-linear approximation, thus complicating carrying out of calculation.

Efficient use of the developed methodology will be higher with large quantity of operating life values stated in the technical requirements for the fiber cable. In case in the technical requirements is stated only one value, the effect from the developed methodology will be insignificant.

CONCLUSIONS

In the paper were solved the task of forecasting of operating life of fiber cables according to the reference data and characteristics of the modes and its conditions of usage.

Scientific novelty of the results, which were received in the article is that for the first time were suggested the methodology of forecasting of durability indices of fiber cables, which allows automatically select from the totality of failure rate the right failure rate, which determines the value of its durability indices, and also making the registration of influence of the modes and conditions usage on is, which allows to increase calculation accuracy and also detect the causes, which has an influence upon the level of calculated values.

Practical significance of the received results is that were developed software, which realizes the suggested method, on the base of which was solved practical task of forecasting of operating life of cable type OK-ПН-01-5-6/0.

Prospects of further investigations are to research performance capability of the suggested methodology for forecasting of durability indices for other groups of components of fiber optic systems of information transmission, such as fiber connectors, fiber switchers, fiber couplers and splitters and optic-electronic modules.

ACKNOWLEDGEMENTS

The paper was conducted within the framework of research project “Development of the methods and

methodologies of forecasting of electronic means durability at all stages of life cycle” (№ 15-05-0029), which was performed with the support of the HSE Academic Fund in 2015.

REFERENCES

1. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Типовые методики оценки показателей безотказности и ремонтпригодности расчетно-экспериментальными методами. РДВ 319.01.16-98. [дата введения 1999-07-01]. – М. : МО РФ, 1998. – 55 с. (Руководящий документ).
2. Аппаратура радиоэлектронная. Определение показателей долговечности. ОСТ 4.012.013-84. [дата введения 1985-07-01]. – М. : ВНИИ, 1985. – 15 с. (Отраслевой стандарт)
3. Маслов А. Я. Оптимизация радиоэлектронной аппаратуры / А. Я. Маслов, А. А. Чернышов, В. В. Ведерников ; под ред. А. Я. Маслова, А. А. Чернышева. – М. : Радио и связь, 1982. – 200 с.
4. Дружинин Г. В. Надежность автоматизированных систем. Изд. 3-е, перераб. и доп. / Г. В. Дружинин. – М. : Энергия, 1977. – 536 с.
5. Грибов В. М., Оценивание и прогнозирование надежности бортового аэрокосмического оборудования / В. М. Грибов, Ю. Н. Кофанов, В. П. Стрельников. – М. : НИУ ВШЭ, 2013. – 495 с.
6. Черкесов Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов : учебное пособие. / Г. Н. Черкесов, Г. Н. Черкесов. – СПб. : Питер, 2005. – 479 с.
7. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. ДСТУ 3433-96 [дата введения 1999-01-01]. – К. : Держстандарт Украины, 1999. – 98 с. (Национальный стандарт Украины).
8. Надежность ЭРИ : справочник. – М. : МО РФ, 2006. – 641 с.
9. ТУ 16.К71-026-88. Технические условия. Оптические кабели для полевых и стационарных объектов и сооружений.
10. Маклейн С. Категории для работающего математика: Пер. с англ. / С. Маклейн ; под ред. В. А. Артамонова. – М. : Физматлит, 2004. – 352 с.
11. Жаднов В. В. Расчетная оценка показателей долговечности электронных средств космических аппаратов и систем / В. В. Жаднов // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 2. – С. 65–73.
12. Zhadnov V. V. Method the Estimated Life of Electronic Devices for Control and Communication Systems / V. V. Zhadnov // 2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. – Omsk : Omsk State Technical University, 2015.
13. Воскобойников Ю. Е. Основы вычислений и программирования в пакете MathCAD : учеб. пособие / Ю. Е. Воскобойников, А. Ф. Задорожный, Л. А. Литвинов ; под ред. Ю. Е. Воскобойникова. – Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2012. – 212 с.

Article was submitted 27.01.2016.

After revision 11.04.2016.

Иванов И. А.¹, Королев П. С.², Полесский С. Н.³, Жаднов В. В.⁴

¹Канд. техн. наук, старший преподаватель департамента Электронной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

²Бакалавр, магистрант департамента Электронной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Канд. техн. наук, доцент департамента Компьютерной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

⁴Канд. техн. наук, доцент, профессор департамента Электронной инженерии, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УТОЧНЕННОГО РЕСУРСА ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ

Решена задача прогнозирования ресурса оптических кабелей для автоматизации проектных исследований надежности волоконно-оптических систем передачи информации. Предложена методика формирования математических моделей комплексных коэффициентов, которая позволяет выделить из исходных моделей интенсивностей отказов коэффициенты, учитывающие влияние режимов и условий применения оптических кабелей на их показатели долговечности.

Разработанная методика не требует проведения экспериментальных исследований и испытаний, базируясь на использовании стандартизованных моделей интенсивностей отказов и нормированных характеристиках долговечности оптических кабелей. При этом для заданных режимов и условий применения оптических кабелей автоматически выявляется тот процесс деградации, который определяет значения их ресурса.

В отличие от методик прогнозирования ресурса изделий на основе вероятностно-физических моделей отказов предложенный метод оперирует только с данными, приведенными в нормативно-технической документации на оптические кабели, и позволяет повысить точность прогнозирования ресурса по сравнению с методиками, рекомендованными в отраслевых стандартах.

Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный математический аппарат, с помощью которого решена практическая задача прогнозирования ресурса кабеля марки ОК-ПН-01-5-60.

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи информации, оптоволоконный кабель, надежность, долговечность, ресурс, интенсивность отказов.

Иванов И. А.¹, Корольов П. С.², Поліський С. Н.³, Жаднов В. В.⁴

¹Канд. техн. наук, старший викладач департаменту Електронної інженерії, Національний дослідницький університет «Вища школа економіки», Москва, Росія

²Бакалавр, магістрант департаменту Електронної інженерії, Національний дослідницький університет «Вища школа економіки», Москва, Росія

³Канд. техн. наук, доцент департаменту Комп'ютерної інженерії, Національний дослідницький університет «Вища школа економіки», Москва, Росія

⁴Канд. техн. наук, доцент, професор департаменту Електронної інженерії, Національний дослідницький університет «Вища школа економіки», Москва, Росія

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ УТОЧНЕНОГО РЕСУРСУ ОПТИЧНИХ КАБЕЛІВ

Вирішено задачу прогнозування ресурсу оптичних кабелів для автоматизації проектних досліджень надійності волоконно-оптичних систем передачі інформації. Запропоновано методику формування математичних моделей комплексних коефіцієнтів, яка дозволяє виділити з вихідних моделей інтенсивностей відмов коефіцієнти, що враховують вплив режимів і умов застосування оптичних кабелів на їх показники довговічності.

Розроблена методика не вимагає проведення експериментальних досліджень і випробувань, базуючись на використанні стандартизованих моделей інтенсивностей відмов і нормованих характеристик довговічності оптичних кабелів. При цьому для заданих режимів і умов застосування оптичних кабелів автоматично виявляється той процес деградації, який визначає значення їх ресурсу.

На відміну від методик прогнозування ресурсу виробів на основі імовірно-фізичних моделей відмов запропонований метод оперує тільки з даними, наведеними в нормативно-технічній документації на оптичні кабелі, і дозволяє підвищити точність прогнозування ресурсу порівняно з методиками, рекомендованими в галузевих стандартах.

Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований математичний апарат, з допомогою якого вирішена практична задача прогнозування ресурсу кабелю марки ОК-ПН-01-5-60.

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі інформації, оптоволоконний кабель, надійність, довговічність, ресурс, інтенсивність відмов.

REFERENCES

1. Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Apparatura, pribory, ustroystva i oborudovanie voennogo naznacheniya. Tipovye metodiki otsenki pokazateley bezotkaznosti i remontoprigradnosti raschetno-eksperimental'nymi metodami. RDV 319.01.16-98. [data vvedeniya 1999-07-01]. Moscow, MO RF, 1998, 55 p. (Rukovodyashchiy dokument).
2. Apparatura radioelektronnaya. Opredelenie pokazateley dolgovechnosti. OST 4.012.013-84. [data vvedeniya 1985-07-01]. Moscow, VNII, 1985, 15 p. (Otraslevoy standart)
3. Maslov A. Ya., Chernyshov A. A., Vedernikov V. V. Optimizatsiya radioelektronnay apparatury, pod. red. A. Ya. Maslova, A. A. Chernysheva. Moscow, Radio i svyaz', 1982, 200 p.
4. Druzhinin G. V. Nadezhnost' avtomatizirovannykh sistem. Izd. 3-e, pererab. i dop. Moscow, Energiya, 1977, 536 p.
5. Gribov V. M., Kofanov Yu. N., Strel'nikov V. P. Otsenivanie i prognozirovanie nadezhnosti bortovogo aerokosmicheskogo oborudovaniya. Moscow, NIU VShE, 2013, 495 p.
6. Cherkesov G. N., Cherkesov G. N. Nadezhnost' apparatno-programmnykh kompleksov: Uchebnoe posobie. Sankt-Peterburg, Piter, 2005, 479 p.
7. Nadezhnost' v tekhnike. Modeli otkazov. Osnovnye polozheniya. DSTU 3433-96 [data vvedeniya 1999-01-01]. Kiev, Derzhstandart Ukrainy, 1999, 98 p. (Natsional'nyy standart Ukrainy).
8. Nadezhnost' ERI: spravochnik. Moscow, MO RF, 2006, 641 p.
9. TU 16.K71-026-88. Tekhnicheskie usloviya. Opticheskie kabeli dlya polevykh i statsionarnykh ob'ektov i sooruzheniy.
10. Makleyn S. Pod red. V. A. Artamonova Kategorii dlya rabotayushchego matematika : Per. s angl. Moscow, Fizmatlit, 2004, 352 p.
11. Zhadnov V. V. Raschetnaya otsenka pokazateley dolgovechnosti elektronnykh sredstv kosmicheskikh apparatov i sistem, *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem*, 2013, No. 2, pp. 65–73.
12. Zhadnov V. V. Method the Estimated Life of Electronic Devices for Control and Communication Systems. *2015 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings*. Omsk, Omsk State Technical University, 2015.
13. Voskoboynikov Yu. E., Zadorozhnyy A. F., Litvinov L. A. Pod red. Yu. E. Voskoboynikova Osnovy vychisleniy i programmirovaniya v pakete MathCAD: ucheb. posobie. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2012, 212 p.

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОММУНІКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.383

Осадчук О. В.¹, Коваль К. О.², Притула М. О.³

¹Д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

РАДІОВИМІРЮВАЛЬНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИСТОРНІЙ СТРУКТУРІ

Вирішено завдання вимірювання напруженості магнітного поля радіовимірювальним перетворювачем магнітного поля на біполярних та польовому транзисторах. Запропоновано схемотехнічне рішення радіовимірювального перетворювача, який забезпечує перетворення напруженості магнітного поля в частоту електричного коливання, що дозволяє підвищити чутливість пристрою до напруженості магнітного поля. Проведено експеримент з дослідження розробленого радіовимірювального перетворювача магнітного поля. У результаті проведених експериментів досліджено залежності вихідної частоти та чутливості пристрою від напруженості магнітного поля.

Ключові слова: радіовимірювальний перетворювач, магнітотранзистор, напруженість магнітного поля, чутливість.

ВСТУП

Вимірювання магнітного поля знаходить практичне застосування при дослідженні властивостей матеріалів, у магнітній дефектоскопії, при вивченні магнітного поля Землі, при контролі магнітного поля в різних установках та інше [1].

Загальна тенденція в розвитку пристроїв вимірювання магнітного поля, зумовлена збільшенням вимог точності до них при одночасному ускладненні експлуатаційних умов. Все це обумовлює проводити пошуки і розробку нових фізичних явищ, нових матеріалів, нових методів вимірювання, що дозволило б покращити метрологічні та економічні показники пристроїв вимірювання магнітного поля.

Проблемою високоточного вимірювання магнітних полів займаються як українські (Вікуліна І. М., Готра З. Ю., Голяка Р. Л., Кухарчук В. В., Осадчук В. С., Осадчук О. В. та інші) так і закордонні вчені (Хомерікі О. К., Аша Ж., Віглеба Г., Егізаряна Г. А., Новицького П. В., Стафеева В. І. та інші).

В сучасній техніці існують надчутливі датчики магнітного поля, які використовують явище надпровідності та ефект Джозефсона. Але конструктивні особливості та-

ких сенсорів дозволяють їх застосовувати лише в лабораторних умовах [2]. Використання інших видів датчиків магнітного поля у складі сучасних інтегральних пристроїв в даний час пов'язано з низкою проблем, серед яких головними є низька чутливість датчика до магнітного поля і відсутність загальної технології виготовлення функціональної інтегральної схеми і датчика. Водночас вдосконалюються алгоритми та схеми перетворення інформативних сигналів датчиків магнітного поля в вимірювальну величину [3].

Перспективним науковим напрямком є розробка та створення первинних радіовимірювальних перетворювачів, які реалізують принцип перетворення «магнітна індукція – частота», на основі реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним опором. Використання таких приладів виключає з їх конструкції аналого-цифрові перетворювачі, що дозволяє знизити собівартість систем контролю та управління, а також створити «інтелектуальні» високоточні радіовимірювальні перетворювачі магнітного поля в результаті поєднання на одному кристалі схем обробки інформації та сенсора магнітного поля [4].

Таким чином, актуальною науковою задачею є створення високочутливого радіовимірювального перетво-

рювача магнітного поля, який легко може бути реалізований в сучасній інтегральній технології.

Постановка задачі: розробити електричну схему радіовимірювального перетворювача магнітного поля з підвищеною чутливістю та провести її експериментальне дослідження.

Метою статті є розробка електричної схеми радіовимірювального перетворювача магнітного поля з підвищеною чутливістю та її експериментальне дослідження на основі теоретичних засад роботи двоколекторного магнітотранзистора.

АНАЛІЗ ПРИНЦИПУ ДІЇ ДВОКОЛЕКТОРНОГО МАГНІТОТРАНЗИСТОРА

Двоколекторний магнітотранзистор являє собою біполярний транзистор, колектор у якого розділений на дві частини. За відсутності магнітного поля інжектовані емітером носії заряду розподіляються рівномірно між колекторами і їхні струми рівні. Відповідно потенціали колекторів однакові (при рівних колекторних опорах R_K), і різниця напруг між колекторами дорівнює нулю ($U = 0$). Поперечне магнітне поле відхиляє потік носіїв у бік одного з колекторів (K2), що приводить до збільшення його струму і зменшення струму іншого колектора (K1). З цієї причини потенціал одного колектора зменшується, а іншого збільшується і напруга між колекторами росте зі збільшенням індукції магнітного поля. При зміні напрямку магнітного поля змінюється і знак напруги між колекторами [3].

Крім основного ефекту – перерозподілу інжектованих носіїв між колекторами у такому магнітотранзисторі одночасно діє й ефект зміни ефективної довжини бази. Явище зміни ефективної довжини бази знижує чутливість двоколекторного магнітотранзистора, тому що він збільшує струм колектора K1 і зменшує струм колектора K2, тобто його дія протилежна дії ефекту перерозподілу носіїв між колекторами [4].

Проведено розрахунок коефіцієнтів передачі струму двоколекторного магнітотранзистора h_{21B1} і h_{21B2} у колектори K1 і K2 на основі структури рис. 1, де колектори розташовані по всій поверхні його бічних граней. Спо-

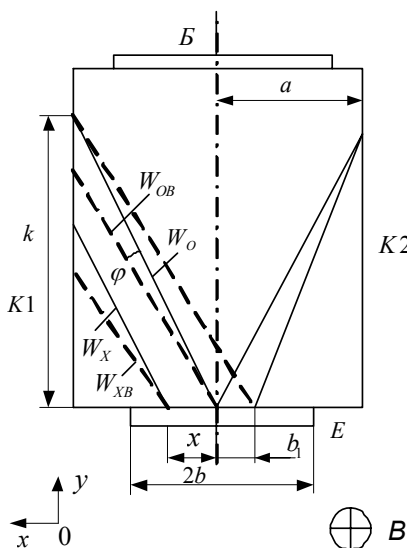


Рисунок 1 – Структура двоколекторного магнітотранзистора

чатку будемо вважати емітер близьким до точкового і розглянемо рух носіїв у бік колектора K1. Інкєтовані в базу носії рухаються в напрямку y зі швидкістю $v = \mu E$ (напруженість електричного поля досить велика, так що швидкість дрейфу в цьому напрямку набагато більша швидкості дифузії).

За відсутності магнітного поля $W = W_0$, у магнітному полі носії відхиляються у бік колектора на кут Холла φ і траєкторія їхнього руху скорочується (штрихова лінія на рис. 1). На основі простих геометричних розрахунків, вважаючи $W_0 \approx h$ при невеликих φ ($\text{tg}\varphi \ll 1$) маємо вираз для ефективної довжини бази [3]

$$W_{0B} = W_0 a / (h \cdot \text{tg}\varphi + a) = a^2 E \chi (1 - a \chi E \cdot \text{tg}\varphi), \quad (1)$$

де E – напруженість електричного поля; φ – кут Холла; $\chi = q / (2kT)$; h – відстань, яку проходять інжектовані в базу носії за час дифузії.

Коефіцієнт передачі транзистора та, з врахуванням $\text{tg}\varphi = \mu B$, одержимо

$$h_{21B1} = 1 - (a^2 \chi / \mu \tau) (1 - a \chi E \mu B). \quad (2)$$

У реальній конструкції емітер витягнутий у напрямку x , отже, довжина траєкторії (відстань від емітера до колектора) для носіїв, інжектованих з різних частин емітера, неоднакова. Тому формулою (2) можна користатися лише для малої ділянки dx , розташованої на відстані x від осі симетрії транзистора. Відповідно

$$h_{21B1}(x) = 1 - [(a - x)^2 \chi / \mu \tau] * [1 - (a - x) \chi E \mu B].$$

Струм через відповідну ділянку колектора K1

$$dI_{K1} (I_E / 2b) h_{21B1}(x) dx,$$

а через весь колектор

$$I_{K1} = (I_E / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx.$$

Тоді, коефіцієнт передачі струму дорівнює

$$h_{21B1} = (1 / 2b) \int_0^b h_{21B1}(x) dx. \quad (3)$$

Підставивши рівняння (2) в (3) та проінтегрувавши, одержимо вираз [3]

$$h_{21B1} = \frac{1}{2b} \left[b - \frac{\chi}{3\mu\tau} [a^3 - (a-b)^3] + \frac{\chi^2}{4\tau} BE [a^4 - (a-b)^4] \right]. \quad (4)$$

Формула (4) враховує тільки зміну ефективної довжини бази магнітотранзистора. Як видно з рис. 1, дія ефекту перерозподілу носіїв між колекторами полягає в тому, що носії, інжектовані з частини емітера $0 - b_1$, під час відсутності магнітного поля попадають у колектор K2, а під дією магнітного поля відхиляються у бік першого колектора K1. Це еквівалентно тому, що в магнітному полі значення a і b з боку K1 збільшилися на величину b_1 . У малих магнітних полях

$$b_1 \approx W_0 \sin \varphi \approx h \mu B = a^2 \chi E \mu B.$$

У реальних схемах вихідним параметром є напруга між колекторами $U = R_H (I_{K1} - I_{K2}) = R_H I_E (h_{21B1} - h_{21B2})$. Враховуючи (4),

$$h_{21B1} - h_{21B2} = [\chi^2 BE / (4b\tau)] [a^4 - (a-b)^4]. \quad (5)$$

Таким чином, в слабких магнітних полях основний внесок у магніточутливість дає зміна ефективної довжини бази. З метою збільшення чутливості в структуру двоколекторного магнітотранзистора можна ввести додатковий базовий контакт. При проходженні струму основних носіїв через базові електроди Б2 і Б1 у базі виникає ЕРС Холла, яка спрямована так, що відхиляє інжектовані носії у одному напрямку з силою Лоренца. Отже, перерозподіл інжектованих носіїв між колекторами збільшується. Крім того, прикладена до контактів Б2 і Б1 напруга збільшує напруженість електричного поля в базі, що приводить до збільшення швидкості руху інжектованих носіїв, а відповідно і сили Лоренца.

Відповідно до принципу дії біполярного транзистора включення контакту Б2 еквівалентно шунтуванню емітерного $p-n$ переходу і зменшенню струму через нього. При однакових робочих струмах чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вище чутливості сенсорів Холла [5]. Збільшена чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітні голівки, електронні компаси тощо). При цьому в значних магнітних полях чутливість зменшується тому, що всі носії вже перерозподілені, і напруга збільшується виключно через зменшення ефективної довжини бази. В даному радіовимірювальному частотному перетворювачі магнітного поля на транзисторній структурі використовуємо двоколекторний магнітотранзистор в якості чутливого елемента.

РОЗРОБКА РАДІОВІМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МАГНІТНОГО ПОЛЯ

Розроблено структурну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним

виходом (рис. 2), в якій використовується двоколекторний магнітотранзистор та частотний перетворювач на основі двох біполярних та одного польового транзисторів.

В магніточутливому радіовимірювальному перетворювачі відбуваються три етапи перетворення енергії: енергія магнітного поля перетворюється в енергію зміни опору; енергія зміни опору перетворюється в енергію зміни еквівалентної ємності; енергія зміни еквівалентної ємності в енергію зміни частоти.

Електрична схема розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання напруженості магнітного поля наведена на рис. 3.

Як датчик магнітного поля використовується двоколекторний біполярний магнітотранзистор $VT1$. Частотний перетворювач утворено напівпровідниковими активними елементами: біполярні транзистори $VT4$ (BC847), $VT3$ (BC857), та польовий транзистор $VT2$ (BF998).

Основою пристрою є автогенератор, утворений транзисторною структурою $VT2$, $VT3$ та активною індуктивністю ($VT4$, $C1$, $R9$). Резистори $R5-R8$ забезпечують розміщення робочої точки транзисторів на спадній ділянці ВАХ транзисторної структури. Двоколекторний магнітотранзистор ввімкнено в схему перетворювача паралельно до транзисторної структури з від'ємним опором.

Оскільки, вольт-амперна характеристика на вихідних клеммах частотного перетворювача має спадну ділянку, то частотний перетворювач виступає генератором електричних коливань з певною частотою. При впливі зовнішнього магнітного поля на двоколекторний магнітотранзистор, змінюється напруга вихідного сигналу на його колекторіві $K1$. При зміні напруги керування, яка є одночасно і напругою вихідного сигналу двоколекторного магнітотранзистора, змінюється частота генерації час-

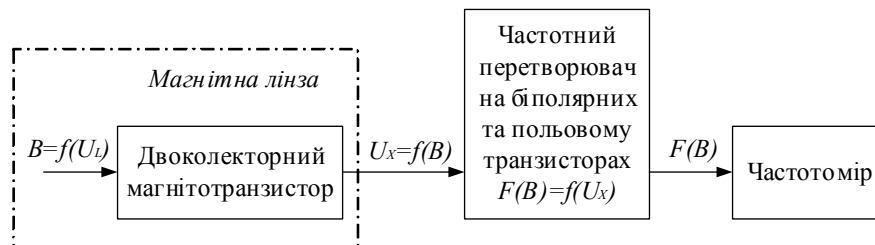


Рисунок 2 – Структурна схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на транзисторній структурі

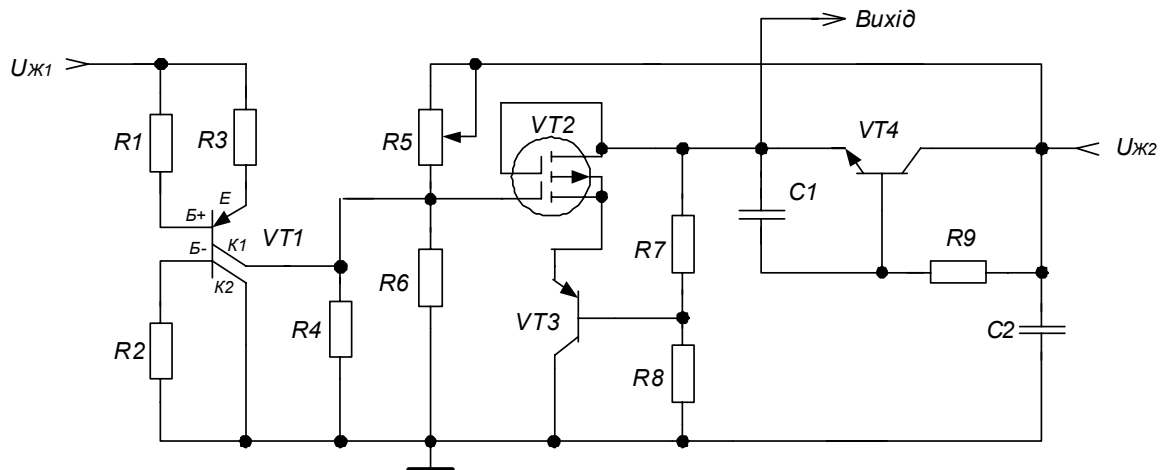


Рисунок 3 – Електрична схема радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля на транзисторній структурі

тотного перетворювача. Таким чином, чим вища напруженість магнітного поля, тим більша частота генерації вихідного коливання у радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РАДІОВИМІРЮВАЛЬНОГО МАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

За результатами експериментальних досліджень було побудовано графіки залежності частоти генерації від напруженості магнітного поля (функції перетворення) рис. 4 при різних напругах керування.

Як показано на рис. 4, коли на магнітний сенсор діє лише природне магнітне поле Землі та відсутній вплив зовнішнього штучного магнітного поля, то при різних напругах керування частотний перетворювач має різні початкові частоти генерації. При напрузі керування $U_K = 1,6\text{В}$ чутливість приладу максимальна, оскільки діапазон зміни частоти на виході досліджуваного пристрою становить від 900 кГц до 1065 кГц.

При подальшому збільшенні напруги керування діапазон зміни частоти на виході становить відповідно для $U_K = 1,8\text{В}$ від 1050 кГц до 1198 кГц, та для $U_K = 2\text{В}$ – від 1150 кГц до 1261 кГц. Таким чином, чутливість пристрою зменшується при збільшенні напруги керування.

Використовуючи експериментальні табличні дані та програму TableCurve2D, визначено аналітичний опис функції перетворення радіовимірювального перетворювача на основі біполярних, польового та магніточутливого двоклекторного транзисторів.

Найбільш оптимальною є функція перетворення

$$F(B) = a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{-B+c}{d}\right)}, \quad (6)$$

де B – напруженість магнітного поля, а невідомі коефі-

цієнти мають наступні величини: $a=-548,14$; $b=2477,5427$; $c=-1189,9973$; $d=3405,9786$.

Використовуючи програму TableCurve2D, було встановлено, що відносна похибка функції перетворення становить $\pm 0,5\%$.

За результатами експериментальних досліджень побудовано графік залежності чутливості радіовимірювального

перетворювача $S(B) = \left| \frac{d(F(B))}{dB} \right|$ від напруженості магнітного поля при напрузі керування $U_K = 1,6\text{В}$ (рис. 5).

Як показано на рис. 5, чутливість пристрою змінюється в залежності від рівня зовнішнього магнітного поля. Наприклад, при напруженості магнітного поля 100 мТл, чутливість пристрою становить 0,1765 кГц/мТл, а при рівні поля 1000 мТл – 0,1645 кГц/мТл. При порівнянні з попередніми результатами, досліджуваний радіовимірювальний перетворювач магнітного поля на біполярних та польовому транзисторах має більш лінійну залежність чутливості від магнітного поля ніж радіовимірювальний перетворювач, який був досліджений в [5].

ВИСНОВКИ

У статті досліджено виникнення інформативних сигналів у двоклекторному магнітотранзисторі при впливі на нього магнітного поля. Розроблено структурну та електричну схему радіовимірювального частотного перетворювача магнітного поля з частотним виходом.

При використанні розробленого радіовимірювального частотного перетворювача для вимірювання магнітного поля, ми в 4 рази підвищили точність вимірювання напруженості магнітного поля ніж у випадку застосування для вимірювання двоклекторного магнітотранзистора.

Також експериментально встановлено, що максимальна чутливість даного варіанта радіовимірювального перетворювача магнітного поля становить 0,1765 кГц/мТл. При

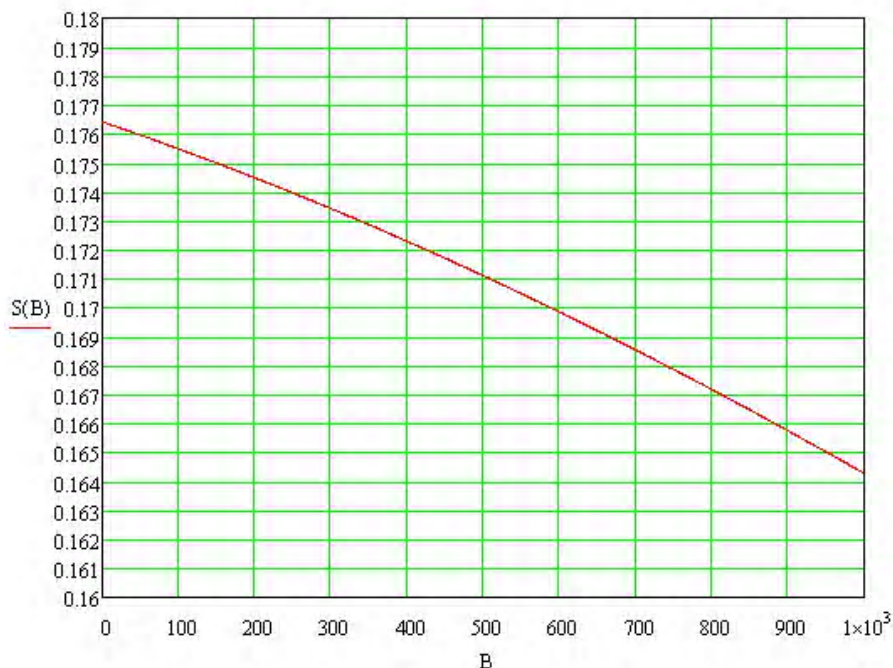


Рисунок 5 – Залежність чутливості радіовимірювального перетворювача від напруженості магнітного поля

цьому, відносна похибка перетворювача не перевищує $\pm 0,5\%$. При зміні напруженості магнітного поля в діапазоні 0 мТл ... 1000 мТл, досягнуто зміни частоти вихідного сигналу в діапазоні 900 кГц ... 1065 кГц. Перевагою розробленого перетворювача є більша лінійність характеристики чутливості, яка змінюється в межах від 0,1765 кГц/мТл до 0,1645 кГц/мТл.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Готра З. Ю. Мікроелектронні сенсори фізичних величин : в 3 т. Т. 3. / З. Ю. Готра – Львів : Ліга-Прес, 2002. – 475 с.
2. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом: монографія / [В. С. Осадчук, О. В. Осадчук]; під ред.

- В. С. Осадчука, О. В. Осадчука. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 254 с.
3. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. 12-ое издание. В 2-х томах / У. Титце, К. Шенк. – М. : ДМК Пресс, 2010. – 828 и 942 с.
4. Minin I. V. Microsensors / I. V. Minin, O. V. Minin. – India, Croatia : InTech, 2011. – 306 p.
5. Осадчук О. В. Радіовимірвальний перетворювач магнітного поля з магнітотранзистором та частотним вихідним сигналом / О. В. Осадчук, М. О. Притула, К. О. Коваль // Вісник Хмельницького національного університету. – 2015. – № 1. – С. 102–106.

Стаття надійшла до редакції 21.10.2015.
Після доробки 15.02.2016.

Осадчук А. В.¹, Коваль К. О.², Притула М. А.³

¹Д-р. техн. наук, професор, завідує кафедрою радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

³Аспірант кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

РАДИОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАНЗИСТОРНОЙ СТРУКТУРЕ

Решена задача измерения напряженности магнитного поля радиоизмерительным преобразователем магнитного поля на биполярных и полевому транзисторах. Предложено схемотехническое решение радиоизмерительного преобразователя, который обеспечивает преобразование напряженности магнитного поля в частоту электрического колебания, что позволяет повысить чувствительность устройства к напряженности магнитного поля. Проведен эксперимент по исследованию разработанного радиоизмерительного преобразователя магнитного поля. В результате проведенных экспериментов исследовано зависимости выходной частоты и чувствительности устройства от напряженности магнитного поля.

Ключевые слова: радиоизмерительный преобразователь, магнитотранзистор, напряженность магнитного поля, чувствительность.

Osadchuk O. V.¹, Koval K. O.², Prytula M. O.³

¹Dr.Sc., Professor, Head of the department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

²PhD, Associate professor, Associate professor of department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

³Graduate student of department of radio engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

THE RADIO MEASURING CONVERTER OF THE MAGNETIC FIELD BASED ON TRANSISTORS STRUCTURE

The problem of measuring the magnetic field strength of radio transmitter magnetic field on bipolar and field-effect transistors is solved. The circuit solution of radio measuring transducer is offered. It converts the magnetic field in the electrical oscillations frequency, that improves the sensitivity of the device to the intensity of the magnetic field. An experiment on proposed radio measuring transducer of the magnetic field is conducted. As a result of the experiment, we had the output frequency depending on the sensitivity of the device and the strength of the magnetic field.

Keywords: radiomeasuring converter, magnetic transistor, magnetic field strength, the sensitivity.

REFERENCES

1. Gotra Z. U. Microelectronni sensory fizychnykh velychyn: v 3 t. Т. 3. Lviv, Liga-Pres, 2002, 475 p.
2. Osadchuk V. S., Osadchuk O. V.; pid red. V. S. Osadchuk, O. V. Osadchuk. Microelectronni sensory magnitnogo polya z chastotnym vihodom: monografiya. Vinnytsia, VNTU, 2013, 254 p.

3. Tyttse U., Shenk K. Poluprovodnikova shemotichnika. 12-e izdanie. V 2 tomah. Moscow, DMK Press, 2010, 828 and 942 p.
4. Minin Igor V., Oleg V. Minin Microsensors. India, Croatia, InTech, 2011, 306 p.
5. Osadchuk O. V., Prytula M. O., Koval K. O. The radiomeasuring converter of the magnetic field with magnetic transistor and frequency output signal, *Herald of Khmelnytskyi national university*, 2015, No. 1, pp. 102–106.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 004.942

Прохоров А. В.¹, Кузнецова Ю. А.²

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных управляющих систем Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

²Канд. техн. наук, ст. преподаватель кафедры инженерии программного обеспечения Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МУЛЬТИКЛАСТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НАНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Проведен анализ особенностей автоматизированных производственных процессов и кластерной компоновки технологических комплексов нанoeлектронных производств, предложен подход к повышению производительности автоматизированного кластерного оборудования в полупроводниковом производстве на основе управления потоками полуфабрикатов. Предложена имитационная модель анализа процессов управления потоками полуфабрикатов и расчета характеристик нанoeлектронных производств, которая позволяет производить поиск рациональных решений, связанных с управлением потоков полуфабрикатов в мультикластерных технологических комплексах любой архитектуры с учетом ресурсных ограничений и факторов риска. Модель основывается на мультиагентном подходе, что дает следующие преимущества: автономность и индивидуальное поведение элементов модели (агентов), агенты имеют возможность адаптироваться и менять свое поведение, иметь динамические связи с другими агентами, которые могут формироваться и исчезать в процессе моделирования и др. Разработанная агентная имитационная модель учитывает сложную динамику нанoeлектронного производства и обеспечивает моделирование мультикластерных технологических комплексов различной топологии и реализует различные стратегии и алгоритмы управления потоками полуфабрикатов. Сформированы постановки задач планирования перемещений полуфабрикатов в мультикластерных технологических комплексах, связанные с различными стратегиями и критериями эффективности для логистики нанoeлектронного производства.

Ключевые слова: нанoeлектронное производство, мультикластерный технологический комплекс, кластер, пластина, поток полуфабрикатов, агентная модель.

НОМЕНКЛАТУРА

МТК – мультикластерный технологический комплекс;

КМДП – комплементарная структура «металл-диэлектрик-полупроводник»;

S_j^T – стоимость перемещений транспортного модуля;

c_{ij} – стоимость потребляемой электроэнергии на один оборот/перемещение транспортного модуля;

f_{ij} – стоимость усредненного простоя транспортного модуля;

r_{ij} – усредненная стоимость ремонта транспортного модуля, отнесенная на один оборот/перемещение;

T_{o_j} – директивный срок прибытия пластины в заданный процессный модуль, который соответствует плано-

вому сроку начала работы основного технологического оборудования кластера;

T_{ϕ_j} – фактический (рассчитываемый) срок прибытия пластины, полученный путем имитационного моделирования;

M – количество полуфабрикатов, участвующих в технологическом процессе на планируемый период работы МТК;

S_{ϕ} – фактическая стоимость перемещений;

S_3 – задаваемая (допустимая) стоимость перемещений;

T_{o_j} – допустимое запаздывание пластины, которое не приводит к срыву план-графика работы основного технологического оборудования МТК;

α, β – значимость критериев стоимости и времени перемещений соответственно.

ВВЕДЕНИЕ

Современные полупроводниковые приборы и интегральные микросхемы представляют собой чрезвычайно сложные устройства, отдельные компоненты которых имеют размеры не более доли микрометра. Изготовление таких устройств осуществляется на монокристаллических пластинах из полупроводникового материала, которые. Таким образом, полупроводниковая пластина – полуфабрикат в технологическом процессе производства полупроводниковых приборов и микросхем. Производство полупроводниковых приборов осуществляется по многослойной технологии с одновременным изготовлением большого количества однотипных элементов. Производственный процесс состоит из нескольких этапов, число которых может варьироваться. Он включает комплекс подготовительных процессов, процессов групповой и индивидуальной обработки. Формирование самой структуры прибора происходит при групповой обработке, которая состоит из процессов окисления, диффузии примесей, эпитаксии, вакуумного напыления, фотолитографии и химической обработки.

Технологии нанoeлектронного производства сегодня используют кластерное оборудование, в котором реализуется замкнутый технологический цикл без выгрузки изделий в атмосферную среду рабочего помещения, что позволяет проводить высокоточные многоступенчатые технологические обработки при обеспечении автоматического контроля техпроцессов, межоперационных испытаний и оперативного структурного анализа. Кластерное оборудование состоит из центрального модуля перемещения пластин (транспортной камеры), на которой смонтированы универсальные камеры загрузки-выгрузки пластин, набор процессных модулей, реализующих процессы ионно-плазменной обработки на пластинах, (последовательно в каждом из них, без развакуумирования и, следовательно, исключая контакт изделий с атмосферой), набор аналитических модулей, выполняющих метрологический контроль поточного производства полупроводниковой продукции, а также переходных модулей или шлюзов в случае, когда имеет место мультикластерный технологический комплекс (МТК). Каждый кластер электрически и механически независим и имеет отдельные вакуумные и управляющие системы. Однако кластеры объединяются в единую технологическую систему через модули передачи, переворота и складирования пластин. Важным является то, что оборудование должно быть согласовано друг с другом по производительности.

Таким образом, МТК характеризуются: сложной структурой объектов и процессов многоцелевого функционирования; многоуровневостью; множеством структурно-компоновочных решений; многообразием технологических процессов и инвариантностью технологических маршрутов обработки; вероятностным характером функционирования и поведения, связанным со сложным взаимодействием с изменяющейся внешней средой.

Многовариантность структур МТК приводит к проблеме выбора рациональной структуры путем проведения подробного анализа динамики функционирования

каждого варианта с целью оценки его гибкости и эффективности. Даже незначительные изменения в конфигурации МТК (например, времени обработки или стратегий планирования) могут иметь значительное влияние на его производительность. В этой ситуации наибольшие трудности вызывают: отсутствие полного детерминизма в ходе производства и сложность технологических процессов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для создания такого сложного единого комплекса технологического оборудования требуется решение задач, связанных с эффективным взаимодействием технологических модулей между собой с целью обеспечения необходимых качественных характеристик технологического процесса, что в свою очередь обуславливает необходимость разработки методов планирования и оптимизации структурно-компоновочных решений и графика запуска полуфабрикатов. Поэтому актуальным является разработка математических методов и моделей, которые ориентированы на анализ новых схем организации и управления автоматизированным производством в нанoeлектронике. Целью данного исследования является повышение производительности автоматизированного кластерного оборудования в полупроводниковом производстве на основе управления потоками полуфабрикатов.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для решения системных задач планирования и управления сложными производственными системами [1] разработаны различные подходы, методы и модели. Среди аналитических методов моделирования МТК можно выделить: методы сетевого планирования и управления; методы линейного и динамического программирования; модели управления запасами; методы теории Марковских процессов; сети Петри и др. [2–4].

Совместное использование событийных графов и сетевых моделей для снижения размерности поиска при решении задач планирования в многокластерных технологических комплексах предложено в [5]. Авторы проводят анализ влияния процессов изменения потока пластин на общее время цикла, а также эффективность работы роботов.

В работе [6] продемонстрированы возможности, которые дает подход на основе имитации отжига для оптимизационного моделирования групп кластерного оборудования в полупроводниковом производстве, при этом авторы делают акцент на том, что требуется дальнейшее расширение алгоритмов и решение задач автоматизации их параметрической настройки для получения необходимых свойств адаптивности к динамике производственного процесса.

Генетический алгоритм для оптимизации времени производственного цикла при формировании последовательностей обработки пластин на кластерном оборудовании представлен в работе [7]. Развитие предложенного метода автор видит в двухэтапном применении генетического алгоритма: на первом – пластины распределяются между имеющимися кластерами, а на втором – формируется оптимальная последовательность их обработки.

В работе [8] разработана модель на основе цветных сетей Петри для анализа и повышения производительности кластерного оборудования для сухого травления. Результаты исследований позволили определить, что в условиях частой смены рецептов процессные камеры и шлюзы становятся узкими местами, а время производственного цикла может быть уменьшено за счет оптимизации рецептов.

Неотъемлемым элементом анализа сложных производственных систем, который позволяет наиболее гибко, полно и наглядно отражать динамические процессы, являются имитационные модели. На сегодняшний день сформировались и наиболее широко применяются три основных подхода: дискретно-событийное моделирование, модели системной динамики и агентное моделирование.

Работа [9] посвящена описанию имитационной модели автоматизированной поточной линии для производства интегральных микросхем. Рассмотрена возможность применения этой модели для составления расписания работы линии и задачи ее синтеза.

В работе [10] представлена простая имитационная модель, которая предназначена для прогнозирования времени производственного цикла в полупроводниковом производстве. В модели использованы две стратегии в обработке пластин – FIFO и на основе приоритетности партий, однако не рассматриваются вопросы моделирования сложных маршрутных процессов с параллельной обработкой пластин и балансировки загрузки технологического оборудования.

Дискретно-событийная модель технологического процесса обработки полупроводниковых пластин на кластерном оборудовании, разработанная в системе Anylogic, рассматривается в работе [11], однако в предложенной авторами реализации отсутствует учет стратегий планирования и диспетчеризации, а также не рассматриваются вопросы совместного моделирования технологических и контрольных операций.

Проведенный анализ показал, что существующие методы не в полной мере описывают различные компоновочные решения МТК, не учитывают сложную динамику технологических процессов и алгоритмов управления потоком полуфабрикатов.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для построения агентной имитационной модели анализа процессов управления потоками полуфабрикатов

была выбрана среда моделирования AnyLogic, обладающая рядом преимуществ и поддерживающая различные парадигмы имитационного моделирования систем. Имитационная модель автоматизированного полупроводникового производства (рис. 1) состоит из компонент, каждый из которых отражает отдельный элемент динамики поведения МТК. В разработанной имитационной модели с помощью класса активных объектов (агентов) реализованы входной буфер, выходной буфер, кластер, линейный транспорт, что позволяет использовать в модели любое число экземпляров этих классов по числу элементов, участвующих в МТК. Кроме того в модели созданы простые классы: модуль, пластина, транспорт, робот, операция.

Агент входного буфера имеет параметры, которые отвечают за накопление информации о количестве пластин каждого типа. Модель, описывающая поведение этого агента, включает объекты, которые используются для формирования потоков пластин каждого типа. Агент выходного буфера имеет параметры, которые отвечают за накопление информации о количестве обработанных пластин каждого типа и числа необработанных пластин.

Агент транспортного модуля имеет следующие параметры: длина, скорость перемещения, наличие пластины, место назначения и другие. Модель линейного транспортного модуля реализует алгоритмы управления потоками полуфабрикатов, связанные с поиском подходящих и свободных процессных модулей, анализом загрузки процессных модулей кластеров, обеспечивая перемещение пластин между имеющимися в МТК кластерами.

Агент кластера (рис. 2) служит для моделирования кластерного оборудования радиальной топологии и имеет следующие параметры: номер кластера, число, наличие и тип рабочих модулей, число лап робота, его скорость, наличие пластины на входе и выходе кластера, состояние модулей и робота и другие. Кроме того здесь присутствуют элементы сбора статистики по времени ожидания и времени пребывания пластин в кластере.

Имитационная модель агента кластера отражает все основные технологические операции: занятие модуля пластиной; освобождение модуля; перемещение транспортного модуля к процессному модулю для последующего переноса пластины (холостой пробег); перенос пластины транспортным модулем из одного процессного модуля в другой модуль и др.

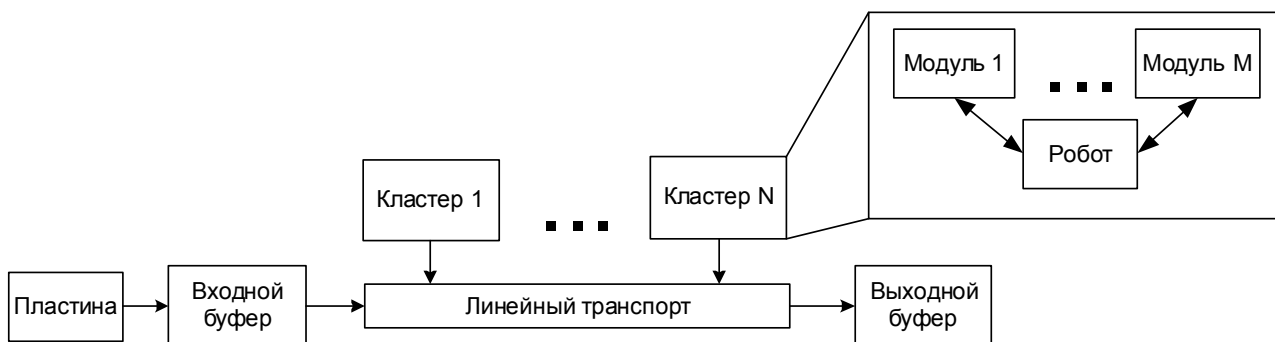


Рисунок 1 – Структура имитационной модели анализа процессов управления потоками полуфабрикатов в МТК

В модели реализуются алгоритмы поиска свободно-го оборудования (транспортных и процессных модулей) для выполнения технологических операций, в том числе анализируется возможность использования робота-манипулятора (двухлапного) в качестве буферного. Для этого в модель включены блоки принятия решения, которые в свою очередь основываются на целом ряде функций входящих в состав класса активного объекта агента кластера.

Необходимо отметить, что модель для задания различных стратегий управления потоками полуфабрикатов, обеспечивающих выполнение поставленных задач, может использовать специальный механизм, который предполагает организацию поиска среди множества альтернатив (модулей, очередей, пластин и др.). Так, например, альтернативными модулями являются такие, которые имеют условия, обеспечивающие возможность приема на обработку поступающих пластин данного типа. В качестве сценариев поиска могут быть заданы различные критерии: наименьшей стоимости, наименьшего коэффициента использования, наименьшего или наибольшего приоритета, кратчайшей очереди и др.

Основными стратегиями запуска пластин в производство являются следующие: больший приоритет имеет пластина, номер которой в партии меньше (FIFO – First In First Out); больший приоритет имеет пластина, номер которой в партии больше (LIFO – Last In First Out); больший приоритет имеет пластина, желаемый срок изготовления которой меньше (SD – Smaller Date); больший приоритет имеет пластина, время изготовления которой меньше (SPT – Short Processing Time); больший приоритет имеет пластина, количество партий запуска которой больше (LPQ – Large Parts Quantity); приоритеты выставляются в случайном порядке (R – Random). Решение о дальнейшем перемещении пластины может приниматься на основе вероятностных распределений (R – Random), значений параметров пластины, к первому свободному модулю (FF – First Free), к модулю с самой короткой очередью (SQ – Short Queue), последовательно (C – Cycle).

В качестве критериев эффективности работы транспортной системы обслуживания, используются два наиболее часто используемых в практике критерия: время доставки и условной стоимости перемещений. Критерий стоимости перемещений с учетом j -го, используемого в i -м маршруте транспортного модуля можно представить в виде:

$$S_j^T = \sum_i (c_{ij} + f_{ij} + r_{ij}). \quad (1)$$

Возможны следующие модели транспортного обслуживания МТК:

1. Обеспечить своевременное, без задержек, транспортное обслуживание МТК, с учетом ограничений на стоимость перемещений:

$$\Delta T_j = T_{\Delta_j} - T_{\phi_j} \geq 0, \quad j = \overline{1, M}, \quad (2)$$

$$S_{\phi} \leq S_3. \quad (3)$$

2. Минимизировать транспортные расходы в планируемый период работы МТК с учетом ограничений на сроки доставки пластин:

$$\min S_{\phi}, \quad S_{\phi} \leq S_3, \quad (4)$$

$$T_{\phi_j} - T_{\Delta_j} \leq T_{o_j}, \quad j = \overline{1, M}. \quad (5)$$

3. Обеспечить решение компромиссной задачи, минимизирующей стоимость перемещений и время доставки пластин с учетом ограничений на стоимость и время транспортного обслуживания:

$$\min(T_{\phi_j}, S_{\phi_j}), \quad (6)$$

$$T_{\phi_j} - T_{\Delta_j} \leq T_{o_j}, \quad (7)$$

$$S_{\phi} \leq S_3. \quad (8)$$

Для решения задачи 3 использован следующий компромиссный критерий в виде аддитивной свертки:

$$K_j = \alpha T_j + \beta S_j, \quad 0 \leq \alpha \leq 1, \quad 0 \leq \beta \leq 1, \quad \alpha + \beta = 1, \quad (9)$$

$$T_j = \frac{T_j}{T_{\Delta_j}}; \quad S_j = \frac{S_j}{S_{3j}}. \quad (10)$$

Значения α и β задаются с учетом предпочтений исследователя.

Благодаря многовариантному расчету на имитационной модели транспортного обслуживания МТК выбираются рациональные маршруты движения полуфабрикатов в зависимости от постановок транспортных задач.

Итоговые результаты по модели в целом: общее число поступивших в систему пластин; число обслуженных пластин; среднее время нахождения пластины в системе; максимальное время нахождения пластины в системе; диаграмма Ганта (с указанием ранних и поздних сроков начала и окончания операций).

Результат по работе каждого модуля: число обслуженных пластин, среднее время обслуживания одной пластины, коэффициент загрузки устройства, дефицит ресурса времени модуля. Положительное значение дефицита ресурса говорит о несбалансированном характере внешней нагрузки и пропускной способности устройства обработки. В этом случае запускается сценарий перераспределения нагрузки между аналогичными модулями.

Результат по каждой из очередей: максимальная длина очереди, средняя длина очереди, длина очереди в конце моделирования, среднее время нахождения пластины в очереди, максимальное время ожидания пластины в очереди.

Испытательный стенд, где производится настройка параметров моделирования, представлен на рис. 3.

В качестве входных данных модели предусматриваются: число радиальных кластеров, число модулей у кластера (остальные считаются не задействованными), тип каждого процессного модуля, число лап у роботов, чис-

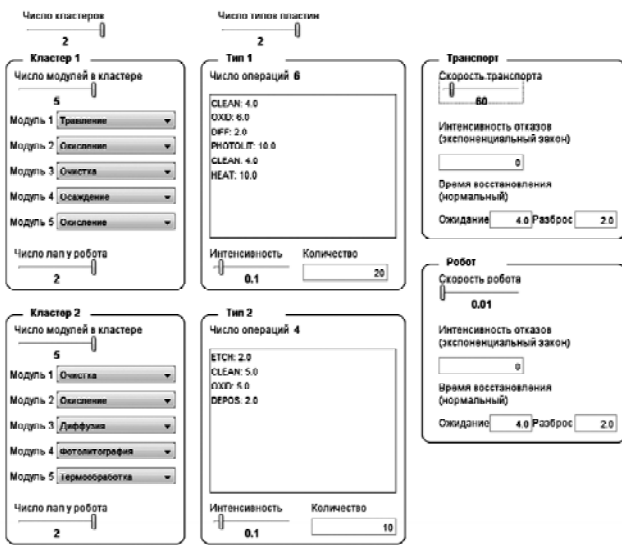
ло типов пластин, количество пластин каждого типа и их интенсивность поступления, маршрут обработки для каждого типа пластин (последовательность операций и время), скорость движения транспортных модулей линейной топологии, скорость вращения роботов центрального модуля перемещения пластин в радиальном кластере, интенсивность отказов для оборудования и др.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

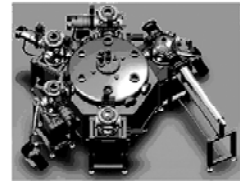
В качестве примера рассматривался МТК, предназначенный для изготовления полупроводниковых приборов с КМДП структурой.

На рис. 4 представлен эксперимент при моделировании с одним типом пластин на одном кластере. Визуальное представление позволяет наблюдать наличие пластин во входном и выходном буферах кластера, а также в процессных модулях, тип операций, которые производятся в каждом модуле, гистограмму процесса выполнения операции над пластиной, анимацию перемещения центрального транспортного модуля. Кроме того отображается собираемая статистика с помощью специальных объектов сбора данных: план график выполнения операций в кластере в виде диаграммы Ганта, на

Моделирование мультикластерного технологического комплекса
Настройка эксперимента



ЗАПУСТИТЬ МОДЕЛЬ



Модель имитирует процесс производства полупроводниковых изделий на мультикластерном технологическом комплексе, связанной с перемещением пластин с помощью транспортных модулей по технологическим операциям, выполняемым процессными модулями, организованными в кластеры. Процессные модули в модели характеризуются типом, состав которых определяется следующим набором технологических операций:

- фотолитография,
- нанесение покрытий,
- осаждение,
- диффузия,
- окисление,
- термообработка,
- травление,
- очистка,
- анализ.

Рисунок 3 – Настройка параметров моделирования МТК

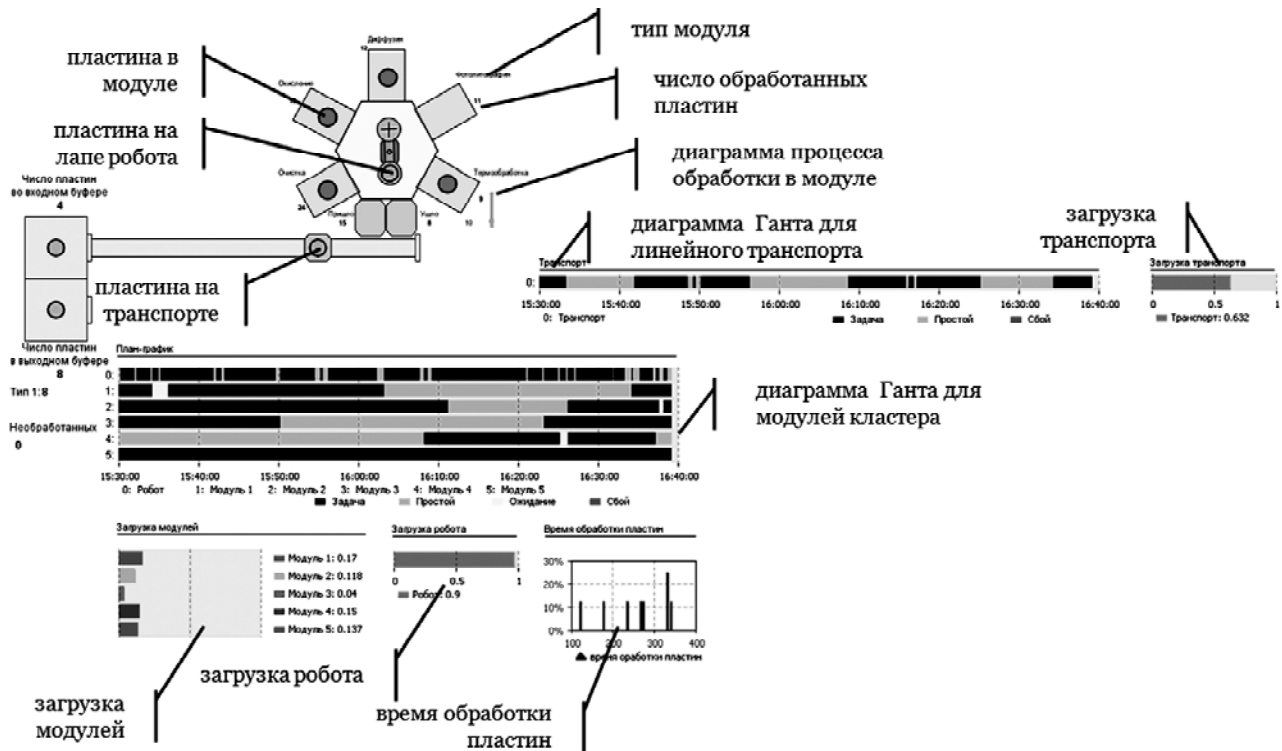


Рисунок 4 – Моделирование при одном типе пластин на одном кластере

которой цветом отображается выполнение операций, периоды ожидания, при отсутствии условий выполнения операций, простои и периоды блокирования работы как следствие имитации отказов оборудования; гистограммы занятости процессных модулей кластера и центрального транспортного робота; гистограмма распределения времени обработки пластин в кластере.

На рис. 5 представлен эксперимент при моделировании с одним типом пластин на двух кластерах.

На рис. 6 представлен эксперимент при моделировании с одним типом пластин на двух кластерах.

В ходе выполнения транспортных перемещений по-луфабрикатов могут возникнуть непредвиденные обстоятельства, которые приводят к появлению рисков. Это, например, отсутствие требуемых материалов на модуле, закрытие участков из-за сбоев (робот уронил пластину), поломка транспортных модулей и т. д.

В модели предусмотрена имитация отказов оборудования (транспортных и процессных модулей), которая производилась путем задания вероятностного закона распределения интенсивности и времени восстановления. Имитация производилась блокированием работы модуля (рис. 7).

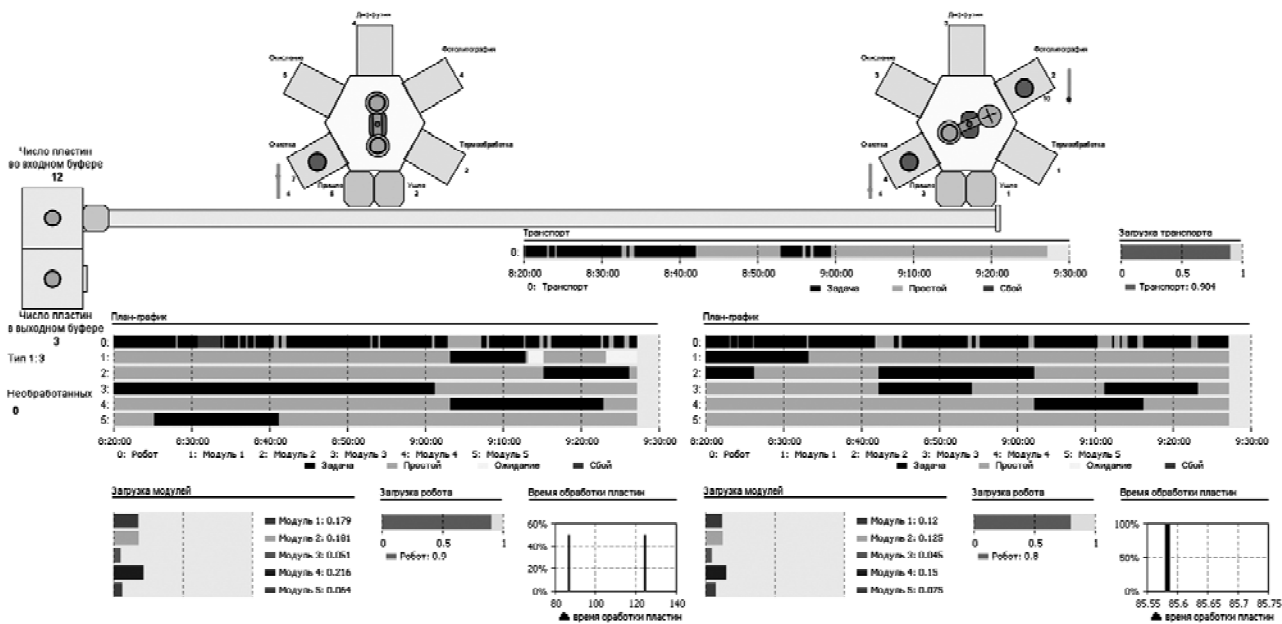


Рисунок 5 – Моделирование при одном типе пластин на двух кластерах

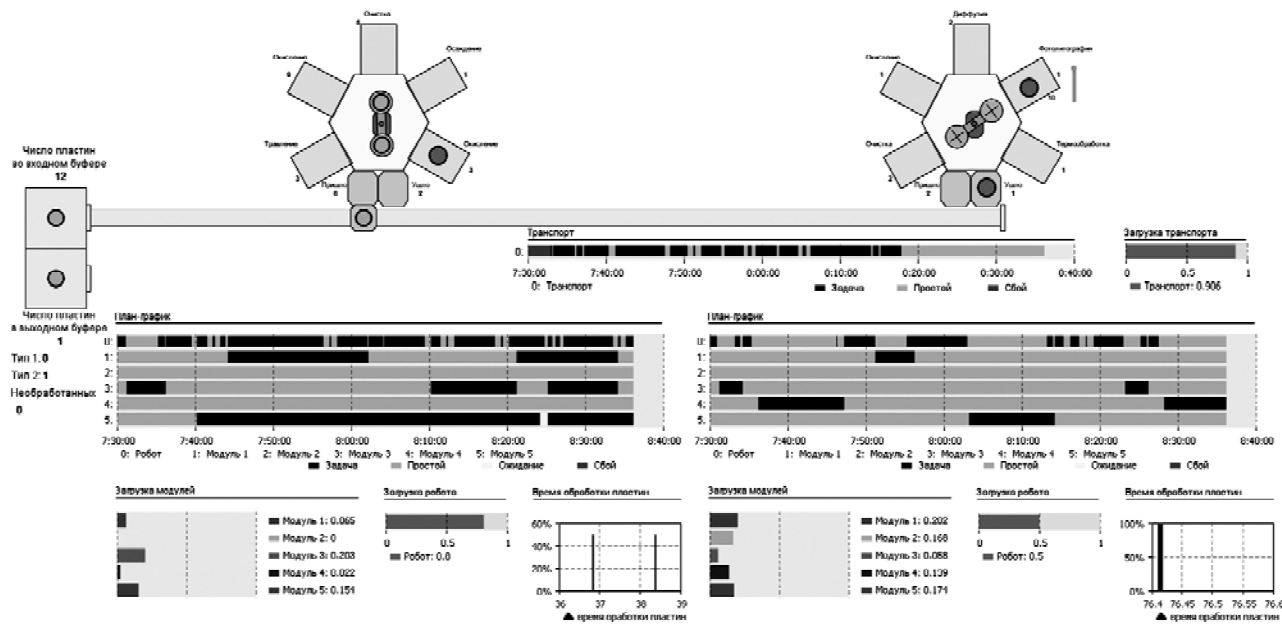


Рисунок 6 – Моделирование при двух типах пластин

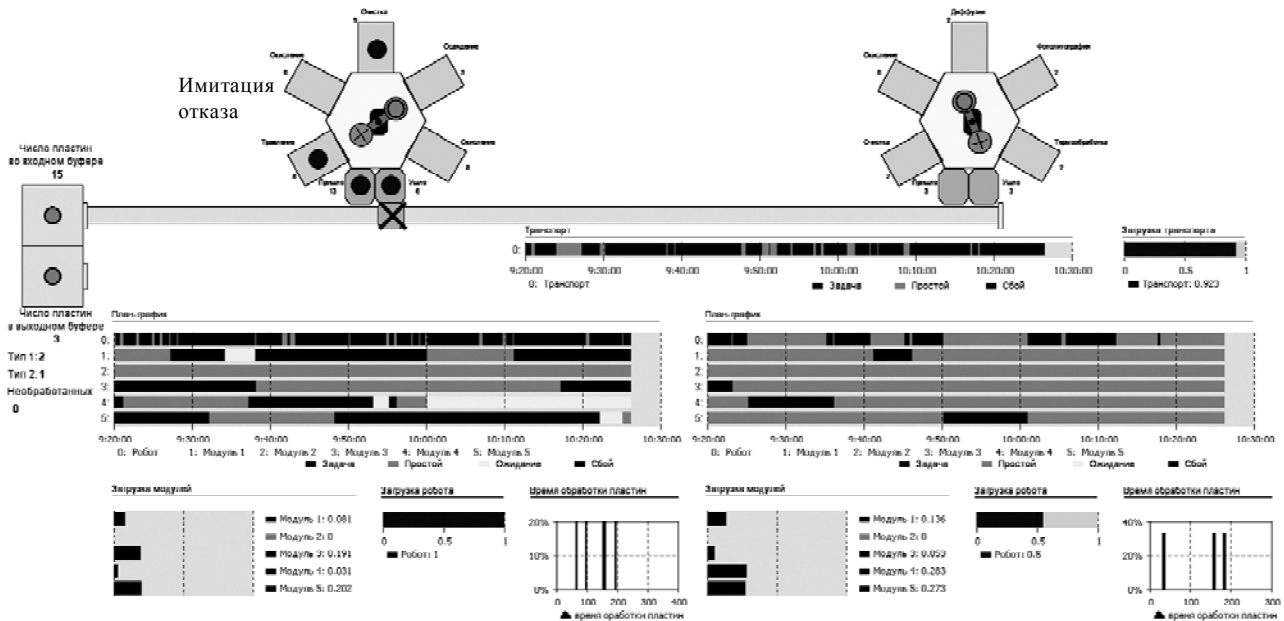


Рисунок 7 – Моделирование с отказами

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Таким образом, в процессе моделирования определяются:

- наиболее загруженные элементы производственной системы (узкие места – высокий процент загрузки, возникновение очередей);
- наиболее надежные элементы производственной системы;
- производительность системы (количество удовлетворенных заявок на производство продукции за заданный период времени);
- номенклатура и количество операций выполняемых на каждом модуле МТК и выявление несоответствий по их оснащенности и обеспеченности ресурсами;
- влияние транспортных операций на показатели работы системы полупроводникового производства;
- влияние «узких мест» на длительности технологических циклов.

Эта информация является исходной для решения задач автоматизированного управления мультикластерным технологическим комплексом нанoeлектронного производства.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Моделирование с одним кластером показало: большое среднее время пребывания пластин в системе; увеличение интенсивности поступления пластин всего лишь на 20 %, приводит к ухудшению значений характеристик эффективности МТК (среднее время пребывания пластин в МТК выросло в 1,5 раза, а число пластин, находящихся в очередях – почти в 2,5 раза (возникли простои в ожидании пластин в модулях, вследствие занятости транспортного робота). Добавление еще одного кластера в систему привело к значительному снижению времени пребывания пластин в системе, но при этом несколько возросла нагрузка на линейный транспорт. Был применен еще один способ разгрузки МТК, заключающийся в уменьшении вероятности передачи пластин к кластеру, являющемуся узким местом.

Добавление в обработку второго типа пластин потребовало включения в систему второго кластера. В этом случае увеличилась загрузка транспортных модулей системы, а с учетом того, что часть процессных модулей для выполнения технологических операций пластин обоих типов совпадает, то и загрузка процессных модулей. Также увеличилось число простоев из-за невозможности роботов принять уже обработанные пластины из процессных модулей (в случае, когда обе лапы робота заняты). В систему были заложены алгоритмы, которые были направлены на поиск свободного процессного модуля в имеющихся кластерах. Результаты моделирования показали, что удалось снизить время простоев, уменьшить время нахождения пластин в системе, однако, с сохранением высокой загруженности линейного транспорта.

Для улучшения характеристик обслуживания пластин в МТК необходимо разгрузить узкое место, которым является линейный транспорт. Для этого была увеличена скорость работы линейного транспорта в 1,5 раза, что согласуется с техническими возможностями оборудования. Анализ полученных результатов показал, что разгрузка узкого места позволила существенно уменьшить значения характеристик МТК: среднее время пребывания пластин в системе уменьшилось более чем в 2 раза, а число заявок, находящихся в очередях – почти в 3 раза.

Анализ пропускной способности основного технологического алгоритма показал, что наиболее существенное влияние на производительность МТК оказывает операция окисления, под которую выделены два процессных модуля. В соответствии с технологическим процессом, высокотемпературное окисление необходимо проводить на 5–10% пластин, обрабатываемых на МТК. Поэтому в модели было принято ограничение, что по этим техпроцессам возможно запускать пластины не чаще, чем каждую третью. Для сравнения была выполнена разгрузка этого узкого места путем добавления еще одного процессного модуля. За счет этого среднее вре-

мя ожидания пластин в МТК уменьшилось в 1,5 раза. В то же время, среднее время пребывания пластин в МТК увеличились более чем на 10%, что обусловлено большей длительностью обслуживания пластин.

При моделировании с отказами, как и следовало ожидать, результаты показали, что критичным по надежности элементом производственной системы является линейный транспорт.

В целом, реализация рассмотренных ранее алгоритмов управления потоком полуфабрикатов позволила снизить время простоев, уменьшить время нахождения пластин в системе, получить рациональные маршруты движения полуфабрикатов, а также сформировать рекомендации о структурно-компоновочных вариантах построения МТК.

ВЫВОДЫ

Таким образом, усовершенствована имитационная модель анализа процессов управления потоками полуфабрикатов и расчета характеристик нанoeлектронных производств, отличающаяся составом типовых блоков, необходимых и достаточных для построения имитационной модели мультикластерного технологического комплекса любой архитектуры, позволяющая производить поиск рациональных решений, связанных с управлением потоков полуфабрикатов с учетом ресурсных ограничений и факторов риска. Агентная имитационная модель обеспечивает моделирование МТК различной топологии и реализует разработанные стратегии и алгоритмы управления потоками полуфабрикатов.

Полученные результаты позволяют говорить о достижении поставленной цели исследования – повышение производительности автоматизированного кластерного оборудования в полупроводниковом производстве на основе управления потоками полуфабрикатов.

Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанная модель позволяет производить поиск рациональных решений, связанных с управлением потоков полуфабрикатов с учетом ресурсных ограничений и отказов и может быть использована при проектировании и эксплуатации современных кластерных многофункциональных, высокопроизводительных установок, обладающих повышенной надежностью функционирования.

БЛАГОДАРНОСТИ

Данная работа выполнялась в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ Министерства образования и науки Украины «Разработка методологических принципов, методов и математических моделей логистического анализа и управления сложными технологическими комплексами» и «Разработка методологических основ, системных моделей и интеллектуальных информационных технологий логистического управления распределенными производствами и проектами по их созданию».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишмарев В. Ю. Организация и планирование автоматизированных производств : учебник / В. Ю. Шишмарев. – М. : Академия, 2013. – 304 с.
2. Mohammad I. Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems / edited by Mohammad Ilyas Mohammad and Imad Mahgoub. – Boca Raton, Florida : CRC Press LLC, 2005. – 776 p.
3. Lopez M. J. Systems of multiple cluster tools: configuration, reliability, and performance / M. J. Lopez, S. C. Wood // IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing. – 2003. – Vol. 16, № 2. – P. 170–178.
4. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов ; Высшая школа экономики (ВШЭ), Национальный исследовательский университет (НИУ). – Москва : Юрайт, 2015. – 389 с.
5. Challenges and Solution Approaches for the Online Simulation of Semiconductor Wafer Fabs / [D. Noack, M. Mosinski, O. Rose, P. Lendermann, and B. P. Gan] // Winter Simulation Conference : The premier international conference for simulation professionals in discrete and combined discrete-continuous simulation, AZ, USA, 11–14 December 2011 : proceedings. – Phoenix : WSC, 2011. – P. 1845–1856.
6. Uhlig T. Simulation-based optimization for groups of cluster tools in semiconductor manufacturing using simulated annealing / T. Uhlig, O. Rose // Winter Simulation Conference : The premier international conference for simulation professionals in discrete and combined discrete-continuous simulation, AZ, USA, 11–14 December 2011 : proceedings. – Phoenix : WSC, 2011. – P. 1857–1868.
7. Towards Realization of a High-Fidelity Simulation Model for Short-Term Horizon Forecasting in Wafer Fabrication Facilities / [W. Scholl, B. P. Gan, M. L. Peh and other] // Winter Simulation Conference : The premier international forum for disseminating recent advances in the field of system simulation, MD, USA, 05–08 December 2010 : proceedings. – Baltimore : WSC, 2010. – P. 2563–2574.
8. Zuberek W. M. Cluster tools with chamber revisiting – Modeling and analysis using timed Petri nets / W. M. Zuberek // IEEE Transactions on semiconductor manufacturing. – 2004. – Vol. 17, № 3. – P. 333–344.
9. Throughput Analysis of Linear Cluster Tools / [J. Yi, S. Ding, M. T. Zhang, V. D. Meulen] // IEEE International Conference on Automation Science and Engineering: International Conference, AZ, USA, 22–25 September 2007 : proceedings. – Scottsdale : IEEE, 2007. – P. 1063–1068.
10. Varadarajan A. A survey of dispatching rules for operational control in wafer Fabrication / A. Varadarajan, S. C. Sarin // Information Control Problems in Manufacturing: The 12th IFAC International Symposium, France, 17–19 May 2006 : proceedings. – Saint Etienne : ELSEVIER, 2006. – P. 709–720.
11. Wang P. Hybrid Model applied in the Semiconductor Production Planning / P. Wang, T. Murata // International MultiConference of Engineers and Computer Scientists: International MultiConference, China, 13–15 March 2013 : proceedings. – Hong Kong : Newswood Limited, 2013. – P. 964–968.

Статья поступила в редакцию 30.11.2015.

После доработки 14.12.2015.

Прохоров А. В.¹, Кузнецова Ю. А.²

¹Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних управляючих систем Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

²Канд. техн. наук, ст. викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

АГЕНТНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МУЛЬТИКЛАСТЕРНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ НАНОЕЛЕКТРОННИХ ВИРОБНИЦТВ

Проведено аналіз особливостей автоматизованих виробничих процесів і кластерної компоновки технологічних комплексів напівелектронних виробництв, запропоновано підхід до підвищення продуктивності автоматизованого кластерного обладнання в напівпровідниковому виробництві на основі управління потоками напівфабрикатів. Запропоновано імітаційну модель аналізу процесів управління потоками напівфабрикатів і розрахунку характеристик напівелектронних виробництв, яка дозволяє проводити пошук раціональних рішень, пов'язаних з управлінням потоків напівфабрикатів у мультикластерних технологічних комплексах будь-якої архітектури з урахуванням ресурсних обмежень і факторів ризику. Модель ґрунтується на мультиагентному підході, що дає наступні переваги: автономність й індивідуальну поведінку елементів моделі (агентів), агенти мають можливість адаптуватися й змінювати свою поведінку, мати динамічні зв'язки з іншими агентами, які можуть формуватися і зникати у процесі моделювання та ін. Розроблена агентна імітаційна модель враховує складну динаміку напівелектронного виробництва і забезпечує моделювання мультикластерних технологічних комплексів різної топології й реалізує різні стратегії та алгоритми управління потоками напівфабрикатів. Сформовано постановки завдань планування переміщень напівфабрикатів у мультикластерних технологічних комплексах, що пов'язані з різними стратегіями і критеріями ефективності для логістики напівелектронних виробництв.

Ключові слова: напівелектронне виробництво, мультикластерний технологічний комплекс, кластер, пластина, потік напівфабрикатів, агентна модель.

Prokhorov A. V.¹, Kuznetsova Yu. A.²

¹PhD of Engineering Science, Associate Professor, Associate Professor, Department of Information Control Systems of the National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky «KhAI», Kharkiv, Ukraine

²PhD of Engineering Science, Senior Lecturer, Software Engineering Department of the National Aerospace University named after N. E. Zhukovsky «KhAI», Kharkiv, Ukraine

AGENT-BASED MODELING OF MULTICLUSTER TECHNOLOGICAL COMPLEXES OF NANOELECTRONIC MANUFACTURING

The analysis of the characteristics of automated production processes and the cluster layout of technological complexes of nanoelectronic manufacturing is carried out, an approach to improve the performance of automated cluster-based equipment in semiconductor manufacturing based on control flow of semi-finished products is proposed. A simulation model for the analysis of control flow processes of semi-finished products and calculation of nanoelectronic manufacturing characteristics, which allows you to search for rational decisions related to the control flows of semi-finished products in multicluster technological complexes of any architecture, taking into account resource constraints and risk factors also proposed in this article.

The model is based on multi-agent approach, which provides the following benefits: autonomy and individual behavior of model elements (agents), agents are able to adapt and change their behavior, have a dynamic relationship with other agents that can be configured to disappear in the process of modeling and other. The developed agent-based simulation model takes into account the complex dynamics of nanoelectronic manufacturing and provides a simulation multicluster technological complexes of different topologies and implements a variety of strategies and control algorithms by flows of semi-finished products. Formulations of the problems of movements planning of semi-finished products in multicluster technological complexes associated with the various strategies and performance criteria for nanoelectronic manufacturing logistics are formulated within the paper.

Keywords: nanoelectronic manufacturing, multi-cluster technological complex, cluster, plate, the flow of semi-finished products, agent model.

REFERENCES

- Shishmarev V. Y. Organization and planning of automated production : the textbook. Moscow, Academy 2013, 304.
- Mohammad I., Mahgoub I. Handbook of sensor networks : compact wireless and wired sensing systems. Boca Raton, Florida, CRC Press LLC, 2005, 776 p.
- Lopez M. J., Wood S. C. Systems of multiple cluster tools: configuration, reliability, and performance, *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, 2003, Vol. 16, No. 2, pp. 170–178.
- Akopov A., Akopov S. Simulation : a tutorial and a workshop for the academic Bachelor., Higher School of Economics (HSE), National Research University (NRU). Moscow, Yurayt, 2015, 389 p.
- Noack D., Mosinski M., O. Rose, Lendermann P., and Gan B. P. Challenges and Solution Approaches for the Online Simulation of Semiconductor Wafer Fabs, *Winter Simulation Conference : The premier international conference for simulation professionals in discrete and combined discrete-continuous simulation*, AZ, USA, 11–14 December 2011 : proceedings, Phoenix : WSC, 2011, pp. 1845–1856.
- Uhlig T., Rose O. Simulation-based optimization for groups of cluster tools in semiconductor manufacturing using simulated annealing, *Winter Simulation Conference : The premier international conference for simulation professionals in discrete and combined discrete-continuous simulation*, AZ, USA, 11–14 December 2011 : proceedings. Phoenix, WSC, 2011, pp. 1857–1868.
- Scholl W., Gan B. P., Peh M. L., Lendermann P., Noack D., Rose O., and Preuss P. Towards Realization of a High-Fidelity Simulation Model for Short-Term Horizon Forecasting in Wafer Fabrication Facilities, *Winter Simulation Conference : The premier international forum for disseminating recent advances in the field of system simulation*, MD, USA, 05 – 08 December 2010 : proceedings. Baltimore, WSC, 2010, pp. 2563–2574.
- Zuberek, W. M. Cluster tools with chamber revisiting – Modeling and analysis using timed Petri nets, *IEEE Transactions on semiconductor manufacturing*, 2004, Vol. 17, No. 3, pp. 333–344.
- Yi J. Ding S., Zhang M. T., Meulen V. D. Throughput Analysis of Linear Cluster Tools, *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering: International Conference*, AZ, USA, 22 – 25 September 2007 : proceedings. Scottsdale, IEEE, 2007, pp. 1063–1068.
- Varadarajan A., Sarin S. C. A survey of dispatching rules for operational control in wafer Fabrication, *Information Control Problems in Manufacturing: The 12th IFAC International Symposium, France, 17–19 May 2006 : proceedings*. Saint Etienne: ELSEVIER, 2006, pp. 709–720.
- Wang P., Murata T. Hybrid Model applied in the Semiconductor Production Planning, *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists: International MultiConference, China, 13–15 March 2013 : proceedings*. Hong Kong, Newswood Limited, 2013, pp. 964–968.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.9

Бісікало О. В.¹, Васілевський О. М.²

¹Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, професор кафедри метрології та промислової автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна

ОЦІНКА НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ СЕНСУ ПРИРОДНО-МОВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Вирішено завдання оцінки невизначеності вимірювання сенсу природно-мовних конструкцій (ПМК) на основі формалізації поняття мовного образу, штучної когнітивної системи та одиниці сенсу. В основу моделі бази знань штучної когнітивної системи закладено статистичну інформацію про асоціативну сполучуваність мовних образів, що надає підстави для уніфікованої оцінки одиниці та кількості сенсу ПМК. Запропоновано метод вимірювання сенсу ПМК на основі нечіткого відношення сенсу, який забезпечує врахування інформації про зв'язки між лемами тексту, що дозволяє отримати оцінку двох типів невизначеності вимірювання ознак сенсу. Отримано та інтерпретовано формальні оцінки невизначеності результатів вимірювання сенсу ПМК, що дозволяє врахувати інформацію про зв'язки між лемами для розв'язання прикладних задач комп'ютерної лінгвістики.

За допомогою розробленого на основі пакету DKPro Core програмного забезпечення проведено експерименти з дослідження запропонованого методу в задачі виявлення інформативних ознак тексту. В результаті проведених експериментів отримано залежності параметрів виявленого Парето-подібного закону розподілу зв'язків між лемами, аналіз яких дозволяє вважати показник середньої кількості зв'язків мовного образу найбільш інформативною чисельною ознакою тексту.

Ключові слова: сенс, невизначеність, текст, природно-мовна конструкція, штучна когнітивна системи, мовний образ, лема.

НОМЕНКЛАТУРА

$[\alpha_-; \alpha_+]$ – границі апріорно визначеного закону розподілу;

γ , ПМК – природно-мовна конструкція (образна конструкція);

λ , \bar{q} – математичне сподівання;

μ – цілочисельний показник емоційного стану системи;

$\mu_Q(<i_l, i_j >)$ – функція належності нечіткого відношення Q ;

σ , σ_i, U_j – середньоквадратичне відхилення (СКВ);

$\Omega \subseteq I \times I$ – простір упорядкованих пар образів

$I = \{i_1, i_2, \dots, i_L, \dots\}$;

$\omega \in \Omega$ – асоціативний зв'язок між парами образів (словосполучення);

A_Q – матриця суміжності розмірністю $L \times L$ на момент часу t_L ;

$G_Q(V, E)$ – граф Бержа;

k – параметр розподілу Парето;

k_{lj} – значення (частота зв'язку) ненульового lj -го елемента матриці A_Q ;

k_Σ – сумарне значення всіх зв'язків системи;

m – кількість ненульових елементів матриці суміжності A_Q ;

N – кількість відомих ШКС;

n – кількість спостережень;

nt – кількість образів, що розрізняє ШКС;

p – довірчий рівень;

S, S_i , ШКС – штучна когнітивна система;

$u_A(X)$ – оцінка невизначеності за типом А;

$u_B(X)$ – оцінка невизначеності за типом В;

x_i – спостереження стану бінарного нечіткого відношення образного сенсу Q ;

$Сав$ – (синтагматичної асоціації вага) – одиниця вимірювання образного сенсу.

ВСТУП

Складність задач семантичного аналізу текстової інформації вважається однією з головних перешкод на шляху побудови штучного інтелекту в цілому та розв'язання з належною якістю значної частини задач комп'ютерної лінгвістики зокрема. В процесі онтогенезу людина вчиться та набуває нових знань все своє життя, внаслідок цього кожний природний інтелект є унікальним та динамічним явищем, здатним самовдосконалюватися та добре розуміти собі подібних. Тому конструювання лінгвістичних баз знань має базуватися саме на таких принципах, а проблема отримання нових формальних методів семантичного аналізу природно-мовних конструкцій на основі баз знань є актуальною. Потребують обґрунтування формальні підходи до створення штучних когнітивних систем, здатних імітувати діяльність людини в процесах оброблення, розуміння смислу та ефективного застосування вхідної текстової інформації.

В роботах [1, 2] було запропоновано та обґрунтовано введення одиниці вимірювання образного сенсу 1 Сав з метою розв'язання задач комп'ютерної лінгвістики, пов'язаних з моделюванням образного мислення людини. Але в процесі такого моделювання обов'язково потрібно врахувати суб'єктивний та динамічний характер онтогенезу пізнавальної, у тому числі мовленнєвої діяльності людини. Формально це можна зробити різними шляхами, одним з яких є оцінка невизначеності результату вимірювання сенсу як окремих природно-мовних конструкцій (ПМК), так і текстів та штучної когнітивної системи (ШКС) у цілому на певний момент часу. Відомо [3], що невизначеність вимірювання – це параметр, пов'язаний з результатом вимірювання, який характеризує дисперсію значень, що можуть бути достатньо обґрунтовано приписані вимірюваній величині. Але важливо, щоб величина, яка безпосередньо використовується для вираження невизначеності, має бути внутрішньо узгоджена: безпосередньо виведена з компонентів, які її утворюють, а також не повинна залежати від групування цих компонентів і від їх розкладу на субкомпоненти [4]. У відомих літературних джерелах, де розглянуті стандартні невизначеності вимірювання типів А та В, не було застосовано поняття невизначеності та основні вимоги до нього для розв'язання задач семантичного аналізу тексту.

Об'єктом дослідження обрано процес побудови лінгвістичних баз знань когнітивної системи, предмет дослідження – оцінка невизначеності формальних ознак сенсу ПМК. Мета роботи полягає в отриманні оцінки невизначеності вимірювання сенсу ПМК як компонентів ШКС. Для досягнення поставленої мети необхідно ввести формальне поняття ШКС, обґрунтувати метод вимірювання сенсу ПМК на основі нечіткого відношення, отримати та інтерпретувати формальні оцінки невизначеності результатів вимірювання сенсу ПМК.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

На вхід будь-якої системи S_i з N відомих подається деякий потік $X = \{x_1, x_2, \dots\}$, що на момент часу t_L може бути визначений графом $G_Q(V, E)$ та відповідною матрицею суміжності A_Q розмірністю $L \times L$. Відомо також,

що в розрідженій матриці A_Q кількість ненульових lj -х елементів дорівнює m , а кожний з них набуває значення k_{lj} . Потрібно отримати оцінки невизначеності σ результатів спостережень k_{lj} кожної системи S_i , а також обчислити стандартні невизначеності типу А – $u_A(X)$ та типу В – $u_B(X)$ для всіх систем. З огляду на мету дослідження необхідно інтерпретувати та проаналізувати формальні результати у термінах предметної області комп'ютерної лінгвістики.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Розглянемо основні вимоги до поняття невизначеність вимірювання, викладені у [4, 5]. Ідеальний метод оцінювання невизначеності результату вимірювання повинен бути універсальним: придатним для всіх видів вимірювань і для всіх типів вхідних даних, що використовуються у вимірюваннях. Внутрішня узгодженість величини, що безпосередньо використовується для вираження невизначеності, передбачає можливість прямого використання невизначеності одного результату як компонента оцінювання невизначеності іншого, в якому використовується перший результат.

Невизначеність результату вимірювання у загальному випадку складається з кількох компонентів, які можна згрупувати у дві категорії, залежно від способу оцінювання їх числового значення: тип А – компоненти, оцінені статистичними методами; тип В – компоненти, оцінені іншими способами. Кожний детальний звіт про невизначеності повинен містити повний перелік компонентів і для кожного з них – метод, який використовувався при одержанні його числового значення.

Компоненти категорії А зазвичай характеризуються оціненими дисперсіями σ_i^2 (або оціненими «стандартними відхиленнями» σ_i) і числом степенів вільності. У випадку необхідності слід зазначати коваріації. Компоненти категорії В повинні характеризуватися величинами U_j^2 , які можна розглядати як наближення до відповідних дисперсій, існування яких допускається. Величини U_j^2 можна розглядати як дисперсії, а U_j – як стандартні відхилення. При необхідності, коваріації повинні розглядатися аналогічно.

Комбінована невизначеність повинна характеризуватися числовим значенням, одержаним при застосуванні звичайного методу для складання дисперсій. Комбінована невизначеність і її компоненти повинні виражатися у формі «стандартних відхилень». Якщо в окремих випадках для одержання загальної невизначеності комбіновану невизначеність необхідно множити на коефіцієнт, то коефіцієнт множення повинен бути завжди зазначений. Загалом слово невизначеність (*uncertainty*) означає сумнів, і, таким чином, у широкому сенсі «невизначеність вимірювання» означає сумнів щодо вірогідності результату вимірювання (*uncertainty measuring*).

Отже, невизначеність результату вимірювання не обов'язково є свідченням правдоподібності того, що результат вимірювання близький до значення вимірюваної величини; це просто оцінювання близькості результату вимірювання до найкращого значення, що відповідає наявним на цей час знанням. Введення поняття «невиз-

наченість вимірювання» є вимушеною мірою, необхідною для одноманітного і спрощеного оцінювання достовірності вимірювання (*evaluation of measuring authenticity*), оскільки її визначення здійснюється на основі одержуваних результатів вимірювання, відомих умов вимірювань і характеристик використовуваної апаратури, а не на невідомому дійсному значенні вимірюваної величини [6].

Для оцінювання x_i вхідної величини X_p , яка не була отримана в результаті повторних спостережень, пов'язані з ними оцінені дисперсія $u^2(x_i)$ або стандартна невизначеність $u(x_i)$ визначаються на базі наукового судження, що базується на всій доступній інформації про можливу змінність X_p . Тобто, стандартну невизначеність типу В одержують із передбачуваної функції щільності ймовірності, заснованої на мірі впевненості в тому, що подія обов'язково відбудеться (ця ймовірність часто називається суб'єктивною ймовірністю).

Оскільки інформацію для оцінки невизначеності вимірювання можуть складати дані попередніх вимірювань, розглянутий у [2] підхід дозволяє забезпечити процес вимірювання сенсу ПМК на основі нечіткої міри. Так, в [1] бінарне нечітке відношення, що задане на одній базисній множині (універсумі) мовних образів I , визначено як нечітке відношення

$$Q = \{ \langle i_l, i_j \rangle, \mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) \}, \quad (1)$$

де $\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle)$ – функція належності бінарного нечіткого відношення, що задається як відображення $\mu_Q : I \times I \rightarrow [0, 1]$. У виразі (1) через $\langle i_l, i_j \rangle$ позначено кортеж з двох елементів, причому $i_l \in I, i_j \in I$. Якщо носій Q_s нечіткого відношення Q є скінченним, то потужність цього нечіткого відношення чисельно дорівнює кількості кортежів його носія і позначається як $card(Q_s)$.

Якщо бінарне нечітке відношення (1) є базовою когнітивною характеристикою ШКС, тоді функцію належності $\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle)$ варто вважати природною чисельною мірою сенсу. Значення $\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) = 1$, згідно з [1], отримало назву одиниці сенсу розміром один *Сав*. В загальному вигляді функція належності нечіткого відношення сенсу для пари мовних образів (на базовому рівні) задається як

$$\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) = f(k_{lj}, t_L), \quad (2)$$

де k_{lj} – кількість зафіксованих ШКС зв'язків між l -та j -м образами на момент часу t_L . Значення k_{lj} неважко отримати шляхом підрахунку кількості зафіксованих ШКС кортежів $\langle i_l, i_j \rangle$ на основі технологічних можливостей сучасних лінгвістичних пакетів, що дозволяє вперше застосувати та обґрунтувати поняття невизначеності вимірювання сенсу ПМК.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

3.1 Поняття штучної когнітивної системи: формалізація та інтерпретація

Розглянемо систему S , яку в подальшому будемо називати штучною когнітивною системою, з точки зору процесів накопичення її бази знань. Нехай S здатна розпізнавати образи з нескінченної множини $I = \{i_1, i_2, \dots, i_L, \dots\}$ та

сприймати асоціативні зв'язки між парами образів як елементи множини $\omega \in \Omega$, де $\Omega \subseteq I \times I$ – простір упорядкованих пар. Для визначення образної конструкції застосуємо поняття F – сигма-алгебри (σ -алгебри) підмножин з Ω . Далі будемо вважати образною конструкцією будь-яку підмножину $\gamma \subseteq \Omega$, що має властивість $\gamma \in F$. Якщо, згідно з властивостями u -алгебри [7], множини $A, B \in F$, то об'єднання, перетин і різниця A та B у теоретико-множинному сенсі також належать F .

Припустимо, що система S обмінюється інформацією із зовнішнім світом як чорним ящиком виключно у вигляді образних конструкцій, з яких розрізняють послідовність вхідних подій $X = \{x_1, x_2, \dots\}$ та множини образних реакцій системи $Y = \{y_1, y_2, \dots\}$, причому $x_i \in F, y_i \in F$. На рис. 1 зображено схему абстрактної моделі когнітивної діяльності, що включає у свій склад зовнішній «чорний ящик» та внутрішню ШКС, на вхід якої неперервно подається множина образів подій у вигляді потоку X . На виході ШКС з'являються образи Y , які є реакцією цієї системи на зовнішню ситуацію X згідно з підходом до моделювання образного мислення людини [2].

Закладемо як базовий *онтогенетичний принцип* побудови ШКС – когнітивний ресурс Ω системи S , що визначає сенс її функціонування, отримується виключного шляхом послідовного накопичення параметрів чергових ω з зовнішнього «чорного ящика» та подальшого самовдосконалення множини Ω . Формально онтогенетичний принцип відображається в тому, що базу знань системи S

будуємо як $C = \bigcup_{i=1}^{m'} x_i$, де m' – загальна кількість сприйня-

тих системою на даний час вхідних образних конструкцій.

З метою розв'язання прикладних задач комп'ютерної лінгвістики інтерпретуємо складові отриманої абстрактної моделі когнітивної діяльності. Для ШКС лінгвістичного типу образом i пропонується вважати мовний образ, що наближено задається лексемою або словоформою [8]. Тоді аналогом асоціативного зв'язку між парами образів ω є словосполучення, а образної конструкції γ – речення, мовне висловлювання, загалом – ПМК. Накопичення ШКС когнітивного ресурсу Ω відбувається шляхом опрацювання множини текстів, а наслідком цього є побудова лінгвістичної бази знань C .

На відміну від відомих моделей знань комп'ютерної лінгвістики, в яких словник словоформ поєднується з

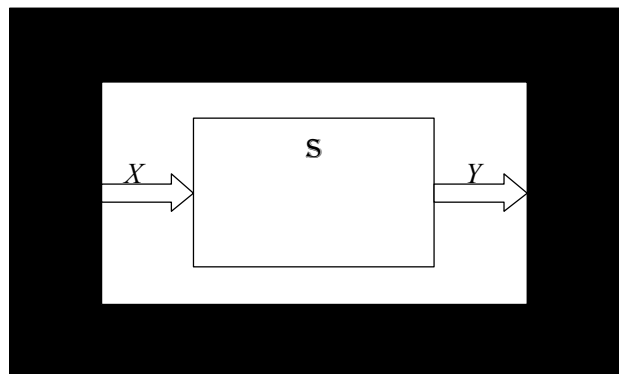


Рисунок 1 – Схема абстрактної моделі когнітивної діяльності

множинами морфологічних, синтаксичних та семантичних правил, основу бази знань S складають виключно асоціативні знання про сполучуваність мовних образів i . Це надає підстави для уніфікованої оцінки одиниці та кількості сенсу ПМК.

3.2 Метод вимірювання сенсу ПМК на основі нечіткого відношення

У відповідності до запропонованого підходу [9] деталізуємо функцію належності, що породжує бінарне нечітке відношення сенсу (1) на таких 3-х послідовних рівнях, побудованих на базовому (2):

1. Рівень імовірнісного прогнозування – з метою нормування функції належності у проміжку $[0, 1]$ передбачено розрахунок статистичної оцінки λ (математичного сподівання): якщо для nt відомих ШКС на момент часу

$$t_L \text{ образів } k_{\Sigma} = \sum_{l=1}^{nt} \sum_{j=1}^{nt} k_{lj}, \text{ а } m - \text{ кількість усіх ненульових}$$

кортежів $\langle i_l, i_j \rangle$, то $\lambda = k_{\Sigma} / m$ – в цьому випадку застосуємо відому сигмоїдальну функцію [10]

$$\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) = f_1(k_{lj}, \lambda) = 1 / (1 + e^{-k_{lj} + \lambda}), \quad (3)$$

Внаслідок нормування з'являється характерна властивість функції належності, отриманої за методом, що

$$\text{пропонується – середнє значення } \overline{\mu_Q} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \mu_{Qj} = 0,5.$$

2. Рівень врахування емоційного стану – введено можливість врахування бінарної моделі емоцій ШКС [9] за рахунок показника $\mu = \{\dots, -2, -1, 1, 2, \dots\}$, тоді

$$\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) = f_2(k_{lj}, \lambda, \mu) = 1 / (1 + e^{\frac{k_{lj} - \lambda}{|\mu|}}). \quad (4)$$

При $\mu = -1 \vee 1$ емоції не впливають на сенс функціонування ШКС, а функція належності (4) вироджується у функцію (3). Збільшення показника μ симетрично згляд-

жує сигмоїдальну функцію f_2 , що продемонстровано на рис. 2.

3. Рівень врахування мотиваційної компоненти на основі образів-центрів потреб – запропоновано моделю мотиву ШКС на момент часу t_L вважати досягнення образу-центру потреби j' , а також розрахувати дисперсію та середньоквадратичне відхилення результатів спостережень k_{lj} як

$$D = \frac{1}{m} \sum_{l=1}^{nt} \sum_{j=1}^{nt} (k_{lj} - \lambda)^2 \mid k_{lj} > 0 \text{ і } \sigma = \sqrt{D}. \quad (5)$$

Отримане значення σ будемо вважати невизначеністю, що обумовлена недосконалістю моделі мотиву ШКС. Характеризує цю невизначеність зокрема недосконалість базової залежності (3), на основі якої пропонується врахувати мотиваційну компоненту на основі образів-центрів потреб.

В залежності від ступеня наближення r пари образів $\langle i_l, i_j \rangle$ до j' , функцію (4) можна зміщувати вліво за віссю абсцис шляхом зменшення математичного сподівання для цієї пари $\lambda_{lj} = \lambda - r \cdot \sigma$, де $r = \{0, 1, 2, 3\}$, зрештою маємо

$$\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle) = f_3(k_{lj}, \lambda_{lj}, \sigma, \mu, i') = 1 / (1 + e^{\frac{k_{lj} - \lambda_{lj}}{|\mu|}}). \quad (6)$$

Питання побудови окремого алгоритму для визначення ступеня наближеності r пари $\langle i_l, i_j \rangle$ до образу-потреби j' та введення додаткового рівня врахування рефлексів та результатів зовнішнього навчання розглянуто у [9]. Зауважимо, що, на відміну від (3) та (4), у функції належності відношення сенсу (6) внаслідок локальних зсувів математичного сподівання зникає властивість $\overline{\mu_Q} = 0,5$, що, на думку авторів, свідчить про належну формальну інтерпретацію відомих фактів з психології та фізіології щодо протиріч між загальноприйнятим

Сигмоїдальна функція належності відношення сенсу

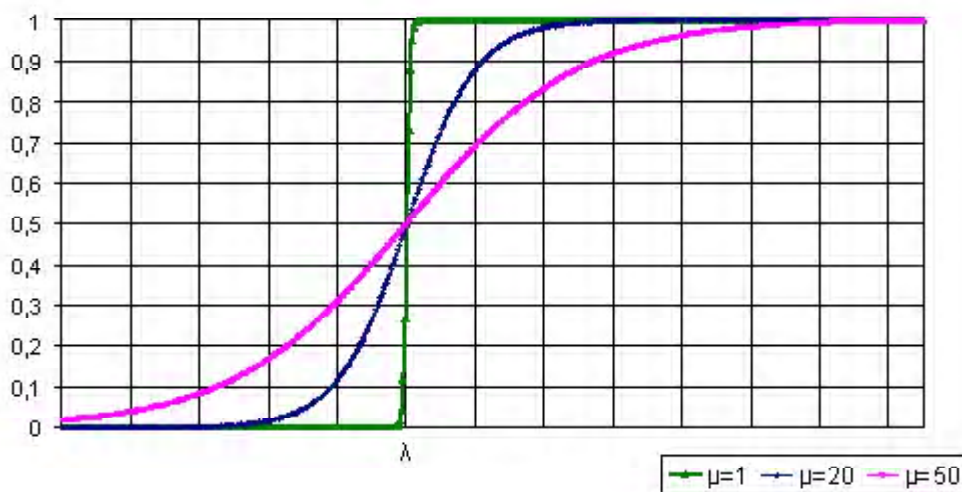


Рисунок 2 – Вплив показника μ на функцію належності (4)

(середньостатистичним) сенсом і діями під впливом сильних мотивів.

3.3 Невизначеність результатів вимірювання сенсу ПМК

Розглянутий підхід до вимірювання сенсу відповідає лінгвістичній базі знань однієї ШКС, вихідними даними якої може бути як окремих текст, так і деяка унікальна множина текстів. При цьому потрібно розуміти, що за кожним текстом стоїть так само унікальний світогляд автора, втілений у його мові. Для розв'язання задачі виявлення інформативних ознак тексту важливим є визначення достовірності бази знань у цілому та сенсу однієї пари мовних образів у вигляді $\mu_Q(< i_l, i_j >)$, як базової складової цих знань зокрема. Оскільки фактично йдеться про вимірювання сенсу, то для оцінки достовірності пропонується застосувати поняття невизначеності результатів множинного вимірювання сенсу ПМК.

У першому наближенні будемо вважати, що суб'єктивна оцінка кількості сенсу однієї пари мовних образів втілюється у статистичний ряд чисельних значень для N різних ШКС. Отже, для довільного кортежу $< i_l, i_j >$ вимірювана згідно (3) величина $Y = \mu_Q(< i_l, i_j >)$ функціонально залежить від результатів її багаторазових вимірювань X_1, X_2, \dots, X_N для різних ШКЛ та, в загальному випадку, має такий вигляд

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N). \quad (7)$$

Оцінку вимірюваної величини Y , позначену y , одержимо із загального рівняння (7), використовуючи вхідні оцінки x_1, x_2, \dots, x_N для N значень величин X_1, X_2, \dots, X_N . Отже, вихідна оцінка y , яка є результатом вимірювання, виражається таким чином

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N).$$

Базовою оцінкою математичного сподівання або очікуваного значення μ_Q величини q , що змінюється випадковим чином, є середнє арифметичне або середнє значення \bar{q} із n спостережень

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k. \quad (8)$$

Експериментальне стандартне відхилення, що характеризує змінність значень q_k , або, точніше, їхню дисперсію σ^2 щодо середнього значення \bar{q} , розраховують за формулою [6]

$$u_A(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n-1}}. \quad (9)$$

Оскільки за результат багаторазових вимірювань приймають середнє значення \bar{q} , то важливо оцінити його

дисперсію. Найкраща оцінка $\sigma^2(\bar{q}) = \sigma^2/n$ дисперсії середнього значення $u_A^2(\bar{q})$ виражається як

$$u_A^2(\bar{q}) = \frac{u_A^2(q_k)}{n}. \quad (10)$$

Експериментальна дисперсія середнього $u_A^2(\bar{q})$ і експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\bar{q})$, що дорівнює позитивному квадратному кореню з оцінки дисперсії $u_A^2(\bar{q})$, кількісно визначають, наскільки добре \bar{q} оцінює очікування μ_Q величини q . З урахуванням виразів (9) та (10) експериментальне стандартне відхилення середнього значення $u_A(\bar{q})$ розраховується за формулою [6]

$$u_A(\bar{q}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n(n-1)}}. \quad (11)$$

Для більш глибокого врахування суб'єктивного характеру вимірюваного сенсу кортежів у функції (7) застосовуємо складові стандартної невизначеності типу В, які, як правило визначають|обчислюють,визначають| на основі інформації про верхні і нижні границі $[\alpha_-; \alpha_+]$ передбачуваного закону розподілу чи через інтервал U , що має заданий довірчий рівень довіри p .

Для визначення стандартної невизначеності типу В потрібно взяти позитивний квадратний корінь з добутку довірчого рівня кожного значення та квадрата відхилення цього значення і всі добутки такого виду додати. В результаті загальний вигляд формули для обчислення стандартної невизначеності типу В при дискретних даних має вигляд

$$u_B(X) = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(x_i - \sum_{i=1}^n x_i p_i \right)^2 p_i} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 p_i}. \quad (12)$$

Якщо для значення величини X_i можна оцінити верхню та нижню границю $[\alpha_-; \alpha_+]$, то стандартні невизначеності типу В, в припущенні про можливий вигляд закону розподілу, можна визначити за формулами [4, 5, 6]:

а) для трикутного закону розподілу

$$u_B(X_i) = \frac{\alpha_+ - \alpha_-}{\sqrt{24}}; \quad (13)$$

б) для експоненціального закону розподілу

$$u_B(X_i) = \sqrt{\frac{(\alpha_+ - x)(x - \alpha_-) - (\alpha_+ - 2x + \alpha_-)}{\lambda}}, \quad (14)$$

де x – очікуване значення, а λ – параметр розподілу;

в) для закону розподілу Парето

$$u_B(X_i) = \frac{x_m}{k-1} \sqrt{\frac{k}{k-2}}, \quad (15)$$

де x_m – початкове значення x , а k – параметр розподілу (значення щільності для x_m);

д) для рівномірного закону розподілу

$$u_B(X_i) = \frac{\alpha_+ - \alpha_-}{\sqrt{12}}. \quad (16)$$

Для заданих інтервалів U_p із відомим рівнем довіри p , в припущенні нормального закону розподілу, невизначеність типу В визначається за формулою

$$u_B(X_i) = \frac{U_p}{k_p},$$

де k_p – коефіцієнт охоплення, який для нормального закону розподілу, дорівнює 1,64; 1,96; 2,58 і 3 для довірчих рівнів 0,9; 0,95; 0,99 і 0,9973. За відсутності інформації про наявність законів (13)–(16) розподілу вхідної величини X_i для симетричних границь $\pm\alpha_i$ стандартну невизначеність типу В визначають за формулою

$$u_B(X_i) = \frac{2\alpha_i}{\sqrt{12}} = \frac{\alpha_i}{\sqrt{3}}, \quad (17)$$

яка може бути застосована на початковому етапі експериментального дослідження ШКС.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

З метою експериментальної перевірки результатів оцінки невизначеності вимірювання сенсу ПМК як компонентів ШКС за допомогою запропонованого методу було застосовано відомий лінгвістичний пакет DKPro Core, який базується на платформі Apache UIMA framework [12]. Для реалізації серії експериментів було розроблено додаткову Java-програму (додаток 1), що використовує та удосконалює колекцію програмних компонентів для обробки природної мови DKPro Core [13]. Особливість розробленої програми, що орієнтована на технологію Java/Maven/Eclipse, полягає у визначенні списку лем тексту та складних залежностей згідно [14] між цими лемами у вигляді списку з m зв'язків.

Експериментальною базою було обрано три відомі літературні твори з відкритого джерела *Project Gutenberg* [15], а саме англійські (авторські) варіанти 4-х текстів різного обсягу: «Аліса в країні див» (Л. Керол, 1 – уривок з 4204 слів та 2 – повна версія з 26690 слів), 3 – «Біле ікло» (Дж. Лондон,

48907 слів) та 4 – «Троє у човні без врахування собаки» (Дж. К. Джером, 67328 слів). Мета серії експериментів полягала у дослідженні базових характеристик невизначеності кожного з 4-х текстів, а також у отриманні оцінки невизначеності множини спільних для всіх текстів пар мовних образів $\langle i_l, i_j \rangle$ згідно з запропонованим методом.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У результаті дослідження формалізовано та інтерпретовано для предметної галузі комп'ютерної лінгвістики поняття штучної когнітивної системи, закладено базовий онтогенетичний принцип побудови ШКС. Отримано формальні характеристики методу створення бінарного нечіткого відношення образного сенсу Q ШКС S_Q шляхом моделювання понять мотиваційної мети та емоційного стану. Запропоновано принципи послідовної багаторівневої побудови функції належності $\mu_Q(\langle i_l, i_j \rangle)$, що породжує нечітке відношення Q , визначено характерну властивість $\overline{\mu_Q} = 0,5$ методу вимірювання сенсу ПМК. Згідно з ним для задачі виявлення інформативних ознак тексту отримано формальні теоретичні оцінки невизначеності σ результатів спостережень k_{ij} кожної ШКС S_i , а також розраховані стандартні невизначеності типу А – $u_A(X)$ та типу В – $u_B(X)$ для всіх ШКС.

За допомогою розробленого в [13] програмного забезпечення на основі пакету DKPro Core було отримано результати обробки 4-х обраних англійських текстів, що можуть інтерпретуватися як 4 різні ШКС. Основні результати обробки у відповідності до (5) представлено в табл. 1, де 3 останні стовпці вміщують такі дані:

- відсоток СКВ σ від оцінки математичного сподівання λ ;
- кількість визначених засобами DKPro Core лем тексту;
- середня кількість різних зв'язків для однієї леми тексту.

Отримані гістограми експериментальних законів щільності розподілу показали значну зовнішню схожість до розподілу за законом Парето, що демонструє приклад порівняння експериментального результату для тексту 1 (Carrol_part) з теоретичною щільністю розподілу Парето зі значенням параметру $k = 2108$.

Аналіз відсортованих за спаданням k_{ij} списків пар мовних образів $\langle i_l, i_j \rangle$ дозволив виявити 4 спільні пари у верхній частині списків, вихідні дані та результати оцінки \bar{q} за (8) та невизначеності за типами А та В згідно з (11) і (12) яких представлено в табл. 2.

Таблиця 1 – основні результати обробки 4-х англійських текстів

Текст	m	k_Σ	λ	σ	%	Кільк. лем	Ср. кільк. зв'язків
1 Carrol part	2360	2812	1,191525424	0,778805721	65,36%	762	3,0971
2 Carrol full	12156	17786	1,463145772	2,245695112	153,48%	2121	5,7313
3 London	25244	31234	1,237284107	1,259517221	101,80%	5702	4,4272
4 Jerom	33316	47091	1,413465002	2,044626970	144,65%	6048	5,5086

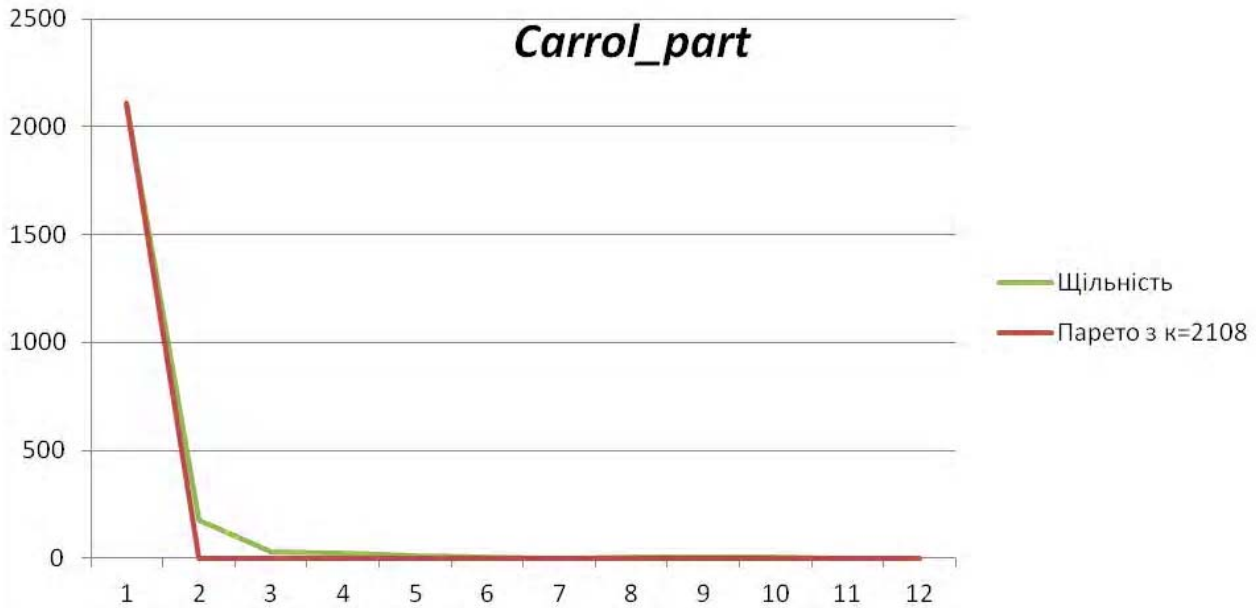


Рисунок 3 – Аналіз експериментального закону щільності розподілу для тексту 1

Таблиця 2 – Результати оцінки невизначеності 4-х обраних пар мовних образів

Текст		<i>go-back</i>	<i>say-I</i>	<i>know-I</i>	<i>see-I</i>
1	<i>Carrol part</i>	0,859177412	0,943132060	0,943132060	0,943132060
2	<i>Carrol full</i>	0,998553057	0,999999514	0,386239825	0,998553057
3	<i>London</i>	0,999999948	1,000000000	1,000000000	0,999999993
4	<i>Jerom</i>	0,999999537	1,000000000	1,000000000	1,000000000
\bar{q}		0,928865234	0,971565787	0,664685943	0,970842558
$u_A(X)$		0,028449934	0,01160802	0,113675151	0,011312764
		0,036641087	0,01495014	0,146403893	0,014569874

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отримані в результаті експерименту чисельні оцінки невизначеності результатів вимірювання сенсу пар мовних образів дозволяють отримати нову інформацію щодо текстів, що аналізуються. Представлення кожного тексту, як окремої ШКС демонструє, що експериментальний закон щільності розподілу для характеристики k_{ij} пар мовних образів дуже подібний до розподілу Парето. Однак такому висновку не відповідають оцінки математичного сподівання λ , яке б мало зменшуватися та наближатися до 1 ($\lambda_{Pareto} = \frac{k \cdot x_m}{k-1}$) зі збільшенням числа пар [16], а також СКВ σ , яке занадто велике для розподілу Парето. Наприклад, для тексту 1 згідно з (5) $\sigma = 0,7788$, що складає 65,36% від λ . Аналогічні оцінки відповідно до залежностей (15) для розподілу Парето та (17) для загального випадку з малим значенням $\alpha_i = \pm 0,01$: $\sigma_1 = 0,0004748$ (0,04%) та $\sigma_2 = 0,58$ (0,48%).

Проте, аналіз даних таблиці 1 надає формальні підстави для висунення гіпотези – найбільш інформативною характеристикою ШКС є середня кількість зв'язків для однієї леми (мовного образу). Обґрунтування – коефіцієнт кореляції Пірсона для стовпчиків з λ та «Кількість

лем» для всіх 4-х ШКС дорівнює 0,198, але для пар стовпчиків λ та «Середня кількість зв'язків» – 0,945. Одночасно для пар стовпчиків σ та «Середня кількість зв'язків» коефіцієнт кореляції дорівнює 0,984, а для пар стовпчиків «%» та «Середня кількість зв'язків» – 0,996. Це дозволяє вважати, що закон розподілу є лише Парето-подібним, проте невизначеність сенсу ШКС (параметр σ) прямо пропорційна середній кількості зв'язків. Висунута гіпотеза потребує масштабнішої експериментальної перевірки та уточнення.

Дані таблиці 2 демонструють високу ступінь сенсоподібності згідно з висунутим підходом для 4-х обраних пар мовних образів, що використовувалися 3-ма різними авторами. Загальна тенденція полягає у тому, що оцінки невизначеності $u_A(X)$ за типом А менші відповідних оцінок $u_B(X)$ за типом В для всіх ШКС приблизно у 1,5 рази. При цьому відсоток невизначеності не перевищує 4% від оцінки математичного сподівання \bar{q} для всіх пар $\mu_Q(<i_l, i_j >)$, окрім пари «know-I» (до 22,03%), що має зрозуміле пояснення – в обраному уривку 1 тексту Л. Керола ця пара зустрічається відносно набагато частіше, ніж у цьому ж творі 2 («Аліса у країні казок») у цілому. Такі результати дозволяють сподіватися, що зап-

ропонований підхід дозволить підвищити якість розв'язання задач автоматичного семантичного аналізу текстів, зокрема визначення авторства. Однак цілком ймовірно, що аналогічне порівняння пар, що зустрічаються рідко (знаходяться у нижній частині відсортованих списків) продемонструє високу невизначеність.

Подальших досліджень потребує також визначення законів розподілу експериментальних значень $\mu_Q(<i_l, i_j >)$ та отримання суб'єктивних характеристик бази знань ШКС у представленні динамічної невизначеності вимірювань.

ВИСНОВКИ

Внаслідок проведених досліджень розв'язано актуальну задачу оцінки невизначеності вимірювання сенсу ПМК як компонентів ШКС, яка безпосередньо пов'язана з проблемою розуміння смислу текстової інформації. Набув подальшого розвитку метод вимірювання сенсу ПМК на основі нечіткого відношення, який, на відміну від існуючих, базується на введених формальних поняттях штучної когнітивної системи та мовного образу, що дозволяє отримати вихідні статистичні дані для оцінки результатів невизначеності вимірювання типів А та В. Уперше отримано та інтерпретовано формальні оцінки невизначеності результатів вимірювання сенсу ПМК, що дозволяє врахувати інформацію про зв'язки між лемами тексту для розв'язання задачі виявлення інформативних ознак тексту.

Практичне значення отриманих результатів полягає в отриманні програмного технологічного інструментарію на основі лінгвістичного пакету DKPro Core, що дозволяє реалізувати запропонований метод для семантичного аналізу англійських текстів. За результатами проведеної серії експериментів виявлено, що закон розподілу зв'язків між лемами тексту є Парето-подібним, проте має суттєві формальні відмінності від класичного розподілу Парето, зокрема суттєво більші оцінки математичного сподівання λ (до 46,3 %) та СКВ σ (на кілька порядків).

З точки зору запропонованого підходу до визначення сенсу ПМК збільшення розмірів тексту за кількістю слів та, відповідно, його словникового складу за кількістю лем не впливає на параметри закону розподілу та невизначеність сенсу окремої ШКС. Аналіз отриманих результатів дозволяє вважати показник середньої кількості зв'язків мовного образу найбільш інформативною ознакою тексту, оскільки коефіцієнт кореляції Пірсона між ним та параметрами, пов'язаними з невизначеністю сенсу найбільш за 0,945.

Порівняння оцінок невизначеності 4-х пар мовних образів, що використовувалися 3-ма різними авторами, показало високу ступінь сенсоподібності таких пар згідно з висунутим підходом. При цьому оцінки невизначеності $u_A(X)$ за типом А пропорційно менші відповідних оцінок $u_B(X)$ за типом В для всіх ШКС приблизно у 1,5 рази, що дозволяє обмежитися знаходженням тільки однієї оцінки невизначеності $u_A(X)$.

Отримані результати досліджень, а саме формальні показники невизначеності сенсу та середня кількість

зв'язків мовного образу, мають перспективи використання в задачах семантичного аналізу ПМК, зокрема класифікації, класифікації та визначення авторства текстів.

ПОДЯКИ

Проведені дослідження здійснювались у межах держбюджетної науково-дослідної роботи Вінницького національного технічного університету за темою «Інтелектуальна інформаційна технологія образного аналізу тексту та синтезу інтегрованої бази знань природно-мовного контенту» (№ держреєстрації 0114U003462), а також у відповідності до плану досліджень науково-дослідного центру прикладної та комп'ютерної лінгвістики ВНТУ.

ДОДАТОК 1

```
Текст Java-програми MyBasePipeline3:
package de.tudarmstadt.ukp.tutorial.gscl2013.dkpro;
import static org.apache.uima.fit.factory.AnalysisEngineFactory.createEngineDescription;
import static org.apache.uima.fit.factory.CollectionReaderFactory.createReaderDescription;
import static org.apache.uima.fit.util.JCasUtil.select;
import java.io.FileNotFoundException;
import java.io.PrintWriter;
import java.io.UnsupportedEncodingException;
import java.util.ArrayList;
import java.util.Arrays;
import java.util.Collection;
import java.util.HashMap;
import java.util.HashSet;
import java.util.List;
import java.util.Map;
import java.util.Set;
import javax.xml.transform.TransformerConfigurationException;
import org.apache.uima.fit.pipeline.JCasIterable;
import org.apache.uima.fit.util.JCasUtil;
import org.apache.uima.jcas.JCas;
import org.jgrapht.ext.GraphMLExporter;
import org.jgrapht.ext.IntegerEdgeNameProvider;
import org.jgrapht.ext.IntegerNameProvider;
import org.jgrapht.ext.StringEdgeNameProvider;
import org.jgrapht.ext.StringNameProvider;
import org.jgrapht.graph.ClassBasedEdgeFactory;
import org.jgrapht.graph.DefaultDirectedWeightedGraph;
import org.xml.sax.SAXException;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.coref.type.CoreferenceChain;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.coref.type.CoreferenceLink;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.segmentation.type.Lemma;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.segmentation.type.Sentence;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.segmentation.type.Token;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.api.syntax.type.dependency.Dependency;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.io.text.TextReader;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.opennlp.OpenNlpPosTagger;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.stanfordnlp.StanfordCoreferenceResolver;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.stanfordnlp.StanfordParser;
import de.tudarmstadt.ukp.dkpro.core.tokit.BreakIteratorSegmenter;
public class MyBasePipeline3 {
    private static class LinkCounter { // класс для связи Map с
    графом DefaultDirectedWeightedGraph
    private Map<String, Map<String, Integer>> links;
    private DefaultDirectedWeightedGraph<String,
    RelationshipEdge<String>> g;
    LinkCounter() { //
    links = new HashMap<String, Map<String, Integer>>();
    g = new DefaultDirectedWeightedGraph<String,
    RelationshipEdge<String>>(
    new ClassBasedEdgeFactory(RelationshipEdge.class));
    }
    void addLink(String from, String to, String type) { // метод для
    добавления новой связи
    from = from.toLowerCase();
    to = to.toLowerCase();
    Map<String, Integer> mapFrom = links.get(from);
    if (mapFrom == null) {
    mapFrom = new HashMap<String, Integer>();
    links.put(from, mapFrom);
    }
    }
```

```
Integer countTo = mapFrom.get(to);
mapFrom.put(to, (countTo == null) ? 1 : countTo + 1);
if (!g.containsVertex(from)) {
    g.addVertex(from);
}
if (!g.containsVertex(to)) {
    g.addVertex(to);
}
RelationshipEdge<String> edge = new RelationshipEdge<String>(from,
to, type);
g.addEdge(from, to, edge);
}
void saveLinks(String filename)
throws FileNotFoundException, UnsupportedEncodingException { /
/ метод для запоминания статистики связей в файле links.csv
PrintWriter writer = new PrintWriter(filename, "UTF-8");
for (String keyFrom : links.keySet()) {
    Map<String, Integer> mapFrom = links.get(keyFrom);
    for (String keyTo : mapFrom.keySet()) {
        Integer count = mapFrom.get(keyTo);
        writer.println(keyFrom + ", " + keyTo + ", " + count);
    }
}
writer.close();
}
/* метод - в графе искать v2 и заменять программно на v1, т.е.
найти все связи для v2, запомнить, удалить v2, вставить узел
v1, добавить связи */
void V1ChangeV2(String v1, String v2) {
    try {
        v1 = v1.toLowerCase();
        v2 = v2.toLowerCase();
        Set<RelationshipEdge<String>> targ1 = g.outgoingEdgesOf(v2);
        if (targ1 != null) {
            Set<RelationshipEdge<String>> targ1copy = new
HashSet<RelationshipEdge<String>>();
            targ1copy.addAll(targ1);
            for (RelationshipEdge v : targ1copy) {
                addLink(v1, g.getEdgeTarget(v), v.toString());
                System.out.printf("%n"+v1+" "+g.getEdgeTarget(v)+" "+v);
                g.removeEdge(v);
                //delLink(v2, g.getEdgeTarget(v), v.toString());
            }
        }
        Set<RelationshipEdge<String>> targ2 = g.incomingEdgesOf(v2);
        if (targ2 != null) {
            for (RelationshipEdge v : targ2) {
                addLink(g.getEdgeSource(v), v1, v.toString());
                System.out.printf("%n"+g.getEdgeSource(v)+" "+v1+" "+v);
                //g.removeEdge(v);
                //delLink(g.getEdgeSource(v), v2, v.toString());
            }
        }
        g.removeVertex(v2);
    } catch (Exception e) {
        System.out.println("\nНесподіванка спиткала українськх науковців
під час зміни " + v1 + " на " + v2);
        //e.printStackTrace();
    }
}
private void saveGraph(String filename)
throws FileNotFoundException, UnsupportedEncodingException,
SAXException, TransformerConfigurationException { // метод для
запоминания графа в файле graph.xml
GraphMLExporter<String, RelationshipEdge<String>> me =
new GraphMLExporter<String, RelationshipEdge<String>>((
new IntegerNameProvider<String>(),
new StringNameProvider<String>(),
new IntegerEdgeNameProvider<RelationshipEdge<String>>(),
new StringEdgeNameProvider<RelationshipEdge<String>>());
PrintWriter writer = new PrintWriter(filename, "UTF-8");
me.export(writer, g);
}
Map<String, Map<String, Integer>> getLinks() {
    return links;
}
DefaultDirectedWeightedGraph<String, RelationshipEdge<String>>
getGraph() {
    return g;
}
}
public static void main(String[] args) throws Exception { //
```

```
главный метод класса MyBasePipeline3
JCasIterable pipeline = new JCasIterable( // запуск программного
конвейера для последовательного аннотирования
// (создания многоуровневой разметки) текста
createReaderDescription(TextReader.class,
TextReader.PARAM_SOURCE_LOCATION, "input/Obama.txt",
TextReader.PARAM_LANGUAGE, "en"), // чтение текста
createEngineDescription(BreakIteratorSegmenter.class), // сегмен-
тирование текста
createEngineDescription(OpenNlpPosTagger.class), // морфологичес-
кая разметка
createEngineDescription(StanfordParser.class,
StanfordParser.PARAM_VARIANT, "rnn",
StanfordParser.PARAM_MODE,
StanfordParser.DependenciesMode.CC_PROPAGATED), // синтаксическая
разметка, учитывающая
// сложные зависимости между парами лемм
// Stem
//createEngineDescription(SnowballStemmer.class),
// Lemma
//createEngineDescription(MateLemmatizer.class),
// NamedEntity
//createEngineDescription(OpenNlpNameFinder.class,
// OpenNlpNameFinder.PARAM_VARIANT, "person"),
//createEngineDescription(OpenNlpNameFinder.class,
//OpenNlpNameFinder.PARAM_VARIANT, "organization"),
//CoreferenceChain, CoreferenceLink
createEngineDescription(StanfordCoreferenceResolver.class) //
поиск соответствия местоимений
// SemanticPredicate, SemanticArgument
//createEngineDescription(ClearNlpSemanticRoleLabeler.class)
);
PrintWriter writer = new PrintWriter("output/output.txt", "UTF-
8"); // запись зависимостей по предложениям в файл output.txt
for (JCas jcas : pipeline) {
    LinkCounter linkCounter = new LinkCounter();
    for (Sentence sentence : select(jcas, Sentence.class)) {
        writer.println("sentence: " + sentence.getCoveredText()); /
// запись исходного предложения
Collection<Token> tokens = JCasUtil.selectCovered(jcas,
Token.class, sentence);
List<String> ts = new ArrayList<String>(tokens.size());
/* исключение неинформативных для анализа типов зависимостей */
List<String> excludes = Arrays.asList(new String[]{"det",
"punct", "cop", "cc", "aux", "auxpass", "expl", "mark", "num",
"number", "quantmod", "ref"/**});
for (Dependency dep : JCasUtil.selectCovered(jcas,
Dependency.class, sentence)) {
    String type = dep.getDependencyType();
    if (!excludes.contains(type)) {
        String govLemma = safeVal(dep.getGovernor());
        String depLemma = safeVal(dep.getDependent());
        String depnl = dep.getDependencyType();
        writer.println(depnl + "(" + govLemma + ", " + depLemma + ")");
        // запись очередной зависимости
        linkCounter.addLink(govLemma, depLemma, depnl);
    }
}
//}
//System.out.printf("%n - Semantic structure -%n");
//for (SemanticPredicate pred : selectCovered(
//SemanticPredicate.class, sentence)) {
//System.out.printf(" %16s %10s", pred.getCoveredText(),
//pred.getCategory());
//for (SemanticArgument arg : select(pred.getArguments(),
//SemanticArgument.class)) {
//System.out.printf("\t%s:%s", arg.getRole(),
//arg.getCoveredText());
//}
//}
//System.out.printf("%n");
//}
}
System.out.printf("%n== Coreference chains (for the whole
document) ==%n");
for (CoreferenceChain chain : select(jcas,
CoreferenceChain.class)) { // цикл по все найденным кореференци-
ям для имен и местоимений
    CoreferenceLink link = chain.getFirst();
    //System.out.println(link);
    String v1 = "#";
    String v2 = "$";
```

```

while (link != null) {
//String v = link.getCoveredText().trim();
String v = link.getCoveredText();
while (v.indexOf(" ") != -1) v = v.substring(1+v.indexOf(" "));
System.out.printf("\n: %s |%s|", link.getCoveredText(),
link.getReferenceType());
if (link.getReferenceType() == "PROPER" ||
link.getReferenceType() == "NOMINAL") v1=v;
if (link.getReferenceType() == "PRONOMINAL") v2=v;
if (link.getReferenceRelation() != null) {
//System.out.printf("-[%s]", link.getReferenceRelation());
}
link = link.getNext();
}
if (!v1.equals("#") & !v2.equals("$")) { // если кореференции
найлены, то проводим замену местоимений на номиналы
System.out.printf(v1+" "+v2);
linkCounter.V1ChangeV2(v1, v2); // вызов метода V2ChangeV1
}
System.out.printf("%n");
}
linkCounter.saveLinks("output/links.csv"); // вызов метода
saveLinks
linkCounter.saveGraph("output/graph.xml"); // вызов метода
saveGraph
//GraphAnalyzer.showGraph(linkCounter.getGraph()); // визуа-
лизация графа через вызов метода showGraph класса GraphAnalyzer
}
writer.close();
}
private static String safeVal(Token t) { // функция для опреде-
ления леммы для слова (токена)
Lemma l = t.getLemma();
return l != null ? l.getValue() : "";
}
}
}

```

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бисикало О. В. Субъективная единица смысла образных конструкций / О. В. Бисикало // *Nauka: teoria i praktyka* – 2009 : materialy V miedzynar. naukowii-praktycznej konf., (Przemysl, 7–15 sierpnia 2009). – Przemysl : Nauka i studia, 2009. – Vol. 6. – P. 9–12.
2. Бісикало О. В. Інфологічний підхід до моделювання образного мислення людини [Електронний ресурс] / О. В. Бісикало // *Вісник СумДУ (Серія «Технічні науки»)*. – 2009. – № 2. – С. 15–20. – Режим доступу: http://visnyk.sumdu.edu.ua/arhiv/2009/Tech_2_09/09bovoml.pdf.
3. Vasilevskiy O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 2014, 5.04: 403. – № 3 (7). – 2006. – P. 147–151.
4. Руководство по выражению неопределенностей измерения = Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement : [на-

учн. редактор Слаев В. А.]. – Санкт-Петербург : НПО ВНИИМ им. Д. М. Менделеева, 1999. – 134 с.

5. Васілевський О. М. Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт / О. М. Васілевський // *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. – № 3 (7). – 2006. – С. 147–151.
6. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений» : МИ 2552-99. – Офиц. изд. – Санкт-Петербург : ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. – 27 с.
7. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей / А. Н. Колмогоров. – 2-е изд. – М. : Наука, 1974. – 120 с.
8. Бісикало О. В. Формалізація понять мовного образу та образного сенсу природно-мовних конструкцій / О. В. Бісикало // *Математичні машини і системи*. – 2012. – № 2. – С. 70–73.
9. Бісикало О. В. Формальні методи образного аналізу та синтезу природно-мовних конструкцій : монографія / О. В. Бісикало. – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 316 с.
10. Раскин Л. Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложение / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Х. : Парус, 2008. – 352 с.
11. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій : ДСТУ ISO/IEC 17025-2001. – [Чинний від 2001 – 01 – 01]. – К. : Держстандарт України, 2001. – 31 с. – (Національний стандарт України).
12. Gurevych I. Darmstadt Knowledge Processing Repository Based on UIMA [Electronic resource] / I. Gurevych, M. Muhlhauser, Ch. Muller, J. Steimle, M. Weimer, T. Zesch. – February 9, 2007. – Available at: [www/URL: https://www.ukp.tu-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/Group_UKP/publikationen/2007/gldv-uima-ukp.pdf](http://www.url:https://www.ukp.tu-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/Group_UKP/publikationen/2007/gldv-uima-ukp.pdf).
13. Бісикало О. В. Метод вилучення образних знань з англomовного тексту на основі інструментальних засобів пакету DKPro Core / О. В. Бісикало, І. Гуревич // *Контроль і управління в складних системах: XII міжнар. конф., 14–16 жовтня 2014 р.: тези доповідей*. – Вінниця, 2014. – С. 51.
14. Stanford parser [Електронний ресурс] // *Stanford Dependencies*. – Назва з екрану. – Режим доступу: <http://nlp.stanford.edu/software/stanford-dependencies.shtml>.
15. Free ebooks – Project Gutenberg [Електронний ресурс] / Project Gutenberg Literary Archive Foundation. – Режим доступу: <https://www.gutenberg.org/>.
16. Бісикало О. В. Статистичний аналіз складних залежностей у тексті / О. В. Бісикало // *Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» : Інформаційні системи та мережі*. – 2015. – № 814. – С. 228–236.

Стаття надійшла до редакції 19.11.2015.

Після доробки 25.12.2016.

Бисикало О. В.¹, Василевский А. Н.²

¹Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных систем и автоматизации Винницкого национального технического университета, Винница, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры метрологии и промышленной автоматизации Винницкого национального технического университета, Винница, Украина

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СМЫСЛА ЕСТЕСТВЕННО-ЯЗЫКОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Решена задача оценки неопределенности измерения смысла естественно-языковых конструкций (ЕЯК) на основе формализации понятий лингвистического образа, искусственной когнитивной системы и единицы смысла. В основу модели базы знаний искусственной когнитивной системы заложена статистическая информация относительно ассоциативной сочетаемости лингвистических образов, что обеспечивает возможность унифицированной оценки единицы и количества смысла ЕЯК. Предложен метод измерения смысла ЕЯК на основе нечеткого отношения смысла, обеспечивающий использование информации про связи между леммами текста, что позволяет получить оценку двух типов неопределенности измерения формальных признаков смысла. Получены и интерпретированы формальные оценки неопределенности результатов измерения смысла ЕЯК, что позволяет учитывать информацию про связи между леммами для решения прикладных задач компьютерной лингвистики.

С помощью разработанного на основе пакета DKPro Core программного обеспечения проведены эксперименты с целью исследования предложенного метода в задаче определения информативных признаков текста. В результате проведенных экспериментов полу-

ченею залежності параметрів виявленого Парето-подібного закону розподілення зв'язей між леммами, аналіз яких дозволяє вважати показателем середнього кількості зв'язей лінгвістического образу найбільш інформативним численним ознакою тексту.

Ключевые слова: зміст, неопределенність, текст, природно-язикова конструкція, штучна когнітивна система, лінгвістический образ, лемма.

Bisikalo O. V.¹, Vasilevskiy O. M.²

¹Dr.Sc., Professor, Dean of faculty for computer systems and automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

²PhD, Associate professor, Professor of department of metrology and industrial automatics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

EVALUATION OF UNCERTAINTY MEASURING OF SENSE OF THE NATURAL LANGUAGE CONSTRUCTS

The task of evaluation of measurement uncertainty meaning of natural language constructs (NLC) based on formalization of the concepts of linguistic image, artificial cognitive systems and unit of sense is resolved. The basis of model the knowledge base of artificial cognitive system laid down statistical information regarding the associative compatibility of linguistic images, which enables unified evaluation the unit and the quantity of sense NLC. The method for measuring the sense of NLC based on fuzzy relation of meaning is offered. It provides to use information about the links between lemmas of text that allows you to estimate the measurement uncertainty of two types of sense signs. The results of the formal evaluation of the uncertainty of measurement sense of NLC are received and interpreted what enables into account information about the relationship between lemmas for solve tasks of computational linguistics.

With developed on the basis of the package DKPro Core Software conducted experiments to study the proposed method in the problem of the definition of informative features of the text. The experiments obtained dependence of the parameters detected Pareto-like distribution law relations between lemmas, whose analysis suggests that average number of connections of linguistic image is the most informative numerical feature for the text.

Keywords: sense, uncertainty, text, natural language construct, artificial cognitive system, linguistic image, lemma.

REFERENCES

1. Bisikalo O.V. Sub'ektivnaya edinitsa smysla obraznykh konstruktsiy, Nauka: teoriya i praktyka – 2009: materialy V miedzynar. naukowi-praktycznej konf., (Przemysl, 7–15 sierpnia 2009). Przemysl, Nauka i studia, 2009, Vol. 6, pp. 9–12
2. Bisikalo O. V. Infologichniy pidhid do modelyuvannya obraznogo mislennya lyudini [Elektronniy resurs], Visnik SumDU (Seriya "Tehnichni nauki"), 2009, No. 2, pp. 15–20. Rezhim dostupu: http://visnyk.sumdu.edu.ua/arhiv/2009/Tech_2_09/09bovoml.pdf.
3. Vasilevskiy O. M. Calibration method to assess the accuracy of measurement devices using the theory of uncertainty, International Journal of Metrology and Quality Engineering, 2014, 5.04: 403, No. 3 (7), 2006, pp. 147–151.
4. Rukovodstvo po vyrazheniyu neopredelennoy izmereniya = Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement : [nauchn. redaktor Slaev V. A.]. Sankt-Peterburg, NPO VNIIM im. D. M. Mendeleeva, 1999, 134 p.
5. Vasilevskiy O. M. Algoritm otsinyuvannya neviznachenosti u vimiryuvannyah pri vikonanni metrologichnih robit, Informatsiyi tehnologiyi ta komp'yuterna inzheneriya, 2006, No. 3 (7), pp. 147–151.
6. Primenenie «Rukovodstva po vyrazheniyu neopredelennosti izmereniya», MI 2552-99. Ofits. izd. Sankt-Peterburg, VNIIM im. D. I. Mendeleeva, 1999, 27 p.
7. Kolmogorov A. N. Osnovnyie ponyatiya teorii veroyatnostey 2-e izd. Moscow, Nauka, 1974, 120 p.
8. Bisikalo O.V. Formalizatsiya ponyat movnogo obrazu ta obraznogo sensu prirodno-movnih konstruktsiy, Matematichni mashini i sistemi, 2012, No. 2, pp. 70–73.
9. Bisikalo O.V. Formalni metodi obraznogo analizu ta sintezu prirodno-movnih konstruktsiy : monografiya. Vinnitsya, VNTU, 2013, 316 p.
10. Raskin L. G., Seraya O. V. Nechetkaya matematika. Osnovy teorii. Prilozheniya. Har'kov, Parus, 2008, 352 p.
11. Zagalni vimogi do kompetentnosti viprobuvalniy ta kalibruvalniy laboratoriy : DSTU ISO/IEC 17025-2001. [Chinniy vid 2001 – 01 – 01]. Kiev, Derzhstandart UkraYini, 2001, 31 p. (Natsionalniy standart UkraYini).
12. Gurevych I., Muhlhauser M., Muller Ch., Steimle J., Weimer M., Zesch T. Darmstadt Knowledge Processing Repository Based on UIMA [Electronic resource]. February 9, 2007, Available at: [https://www.ukp.tu-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/Group_UKP/publikationen/2007/gldv-uima-ukp.pdf](http://www.url: https://www.ukp.tu-darmstadt.de/fileadmin/user_upload/Group_UKP/publikationen/2007/gldv-uima-ukp.pdf).
13. Bisikalo O. V., Gurevich I. Metod viluchennya obraznih znan z anglo-movnogo tekstu na osnovi instrumentalnih zasobiv paketu DKPro Core, Kontrol i upravlinnya v skladnih sistemah: XII mizhnar. konf., 14–16 zhovtnya 2014 r.: tezi dopovidey. Vinnitsya, 2014, pp. 51.
14. Stanford parser [Elektronniy resurs]. Stanford Dependencies. Nazva z ekranu. Rezhim dostupu: <http://nlp.stanford.edu/software/stanford-dependencies.shtml>.
15. Free ebooks – Project Gutenberg [Elektronniy resurs]. Project Gutenberg Literary Archive Foundation. Rezhim dostupu: <https://www.gutenberg.org/>.
16. Bisikalo O. V. Statistichniy analiz skladnih zalezhnostey u teksti, Visnik Nats. un-tu «Lvivska politehnika», Informatsiyi sistemi ta merezhi, 2015, No. 814, pp. 228–236.

¹Д-р техн. наук, науковий керівник Проблемної НДЛ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

²Канд. техн. наук, старший науковий співробітник Проблемної НДЛ АСУ, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

³Аспірантка кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна

ЕВОЛЮЦІЙНА КАСКАДНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ НЕЙРО-ФАЗЗИ ВУЗЛІВ

У статті запропоновано еволюційну каскадну систему обчислювального інтелекту на основі нейро-фаззи вузлів, а також алгоритми її навчання. Запропонована система в процесі навчання налаштовує не тільки свої параметри, але й архітектуру в online режимі. У якості вузлів еволюційної каскадної системи запропоновано використовувати нейро-фаззи системи. Для налаштування параметрів функцій належності нейро-фаззи вузлів запропоновано алгоритм, що ґрунтується на використанні градієнтної процедури мінімізації критерію навчання. У процесі навчання нейро-фаззи вузлів налаштовуються синаптичні ваги, центри і параметри ширини функцій належності нейро-фаззи вузлів. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану архітектуру еволюційної каскадної нейро-фаззи системи. Проведено ряд експериментів з дослідження властивостей запропонованої системи. Результати експериментів підтвердили те, що запропоновану систему можна використовувати для розв'язання широкого кола задач інтелектуального аналізу даних, при цьому обробка даних відбувається в online режимі. Система характеризується простотою чисельної реалізації, а процес обробки даних може бути пришвидшено завдяки можливості паралельного налаштування вузлів еволюційної каскадної системи. Характерною особливістю запропонованої системи є те, що для її налаштування не потрібний великий об'єм навчальної вибірки.

Ключові слова: гібридна система, обчислювальний інтелект, каскадна система, нейро-фаззи система, функція належності, еволюційна система.

НОМЕНКЛАТУРА

TSK – Takagi–Sugeno–Kang system;

ANFIS – adaptive neuro-fuzzy inference system;

МГУА – Метод Групового Урахування Аргументів;

МНК – метод найменших квадратів;

$x(k)$ – вектор вхідних сигналів;

$x_i(k)$ – i -та компонента вектора вхідних сигналів;

h – кількість функцій належності;

k – номер спостереження у навчальній вибірці;

n – кількість входів системи;

N – кількість спостережень у навчальній вибірці;

S – кількість вузлів у першому прихованому шарі системи;

SB – блок селекції;

$N^{[l]}$ – l -й прихований шар системи;

$\hat{y}_j^{[1]}(k)$ – вихідний сигнал j -го вузла першого прихованого шару для k -го вектора вхідних сигналів;

$\hat{y}_j^{[1]*}(k)$ – вихідний сигнал блоку селекції для j -го вузла першого прихованого шару для k -го вектора вхідних сигналів;

$\hat{y}^{[l]}(k)$ – вихідний сигнал l -го прихованого шару системи;

$\hat{y}(k)$ – вихідний сигнал вузла для k -го вектора вхідних сигналів;

$y(k)$ – навчальний сигнал для k -го вектора вхідних сигналів;

μ_{li} – функція належності i -ї компоненти вектора вхідних сигналів до l -го центроїда;

C_{li} – параметр, що визначає центр l -ї функції належності i -ї компоненти;

σ_{li} – параметр ширини l -ї функції належності i -ї компоненти;

$\tilde{x}_l(k)$ – добуток значень l -ї функції належності для k -го вектора вхідних сигналів;

w_l^{ij} – синаптична вага добутку значень l -ї функції належності для вузла з i -ю та j -ю компонентами;

w^{ij} – вектор синаптичних ваг для вузла з i -ю та j -ю компонентами;

$E(k)$ – значення функції критерію навчання для k -го вектора вхідних сигналів;

η_c – параметр кроку навчання для параметра центра функції належності;

η_σ – параметр кроку навчання для параметра ширини функції належності;

$\exp(x)$ – експонента;

α – параметр забування;

δ_{lr} – дельта-функція.

ВСТУП

У наш час гібридні системи обчислювального інтелекту і, перш за все, штучні нейронні мережі та нейро-фаззи системи отримали широке розповсюдження для вирішення різних задач інтелектуального аналізу даних: розпізнавання образів, ідентифікації, емуляції, інтелектуального керування тощо. При цьому на практиці достатньо часто виникають ситуації, коли дані, що підлягають обробці, надходять до входу системи послідовно в online режимі. Така ситуація є предметом розгляду напрямків, що інтенсивно розвиваються в наш час і відомі як Dynamic Data Mining та Data Stream Mining [1], а для роботи в цих умовах найкраще пристосовані так звані «еволюційні системи обчислювального інтелекту» [2–6], які

у процесі навчання налаштовують не тільки свої параметри, але й архітектуру.

Треба відзначити, що процес навчання суттєво ускладнюється, коли навчальні вибірки містять невелику кількість спостережень, що призводить до того, що система або не встигає налаштувати свої параметри (не кажучи про архітектуру), або виникає ефект «перенавчання» (overfitting).

У зв'язку з цим синтез гібридних систем обчислювального інтелекту, що навчаються в online режимі та здатні змінювати свою архітектуру у процесі навчання, є досить цікавою та актуальною задачею.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай задана вибірка даних, кожне спостереження з якої має вигляд $(n \times 1)$ -вимірний вектора сигналів $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$ ($k = 1, 2, \dots, N$ – номер спостереження у навчальній вибірці).

Тоді задача дослідження полягає в навчанні еволюційної каскадної нейро-фаззі системи для обробки вхідних даних і отриманні вихідних значень для розв'язку певної задачі інтелектуального аналізу даних.

Результатом роботи запропонованої системи є вихідний сигнал $\hat{y}(k)$ для кожного спостереження з вибірки даних.

У якості цільової функції використовується середньоквадратична помилка $E(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (y(k) - \hat{y}(k))^2$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На сьогоднішній день існує багато еволюційних систем обчислювального інтелекту, що здатні обробляти дані в online режимі. В основі більшості з них лежать багатошарові нейро-фаззі системи типу TSK або ANFIS. Але у випадках, коли навчальні вибірки містять невелику кількість спостережень, ці системи можуть не встигнути налаштувати свої параметри та архітектуру. Перебороти вказані труднощі можна, декомпозувавши вихідну проблему на ряд задач меншої розмірності, для вирішення яких кількість наявних даних є достатньою.

Одним з найбільш ефективних підходів, що ґрунтуються на цьому принципі, є Метод Групового Урахування Аргументів (МГУА) [7–10], який, на жаль, погано пристосований до роботи в online режимі. Набагато простіше адаптувати до цього режиму так звані «каскадні нейронні мережі» [11–14], хоча до суттєвих недоліків цих систем можна віднести те, що в них використовується «заморожування» (freezing) параметрів.

Спроба створення «гібрида» МГУА і каскадних нейронних мереж, що адаптований до роботи в online режимі, була здійснена в [15], де в якості вузлів були використані складені R нейрони. Ця мережа, що володіє високою швидкістю та апроксимуючими можливостями, налаштовує всі свої параметри і архітектуру в online режимі, однак при цьому потребує достатньо великі за об'ємом навчальні вибірки.

У цій роботі зроблено спробу синтезу еволюційної каскадної системи обчислювального інтелекту, яка призначена для обробки потоку даних, що надходять в online режимі, і яка має суттєво меншу в порівнянні з відомими аналогами кількість параметрів, що налаштовуються.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

На рис. 1 наведено архітектуру еволюційної каскадної системи.

До нульового шару системи надходить $(n \times 1)$ -вимірний вектор вхідних сигналів $x(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k))^T$ (тут $k = 1, 2, \dots, N$ – номер спостереження у навчальній вибірці або індекс поточного дискретного часу), який далі передається на перший прихований шар, що містить c_n^2 вузлів-нейронів, кожен з яких має два входи. На виходах вузлів $N^{[1]}$ першого прихованого шару формуються вихідні сигнали $\hat{y}_s^{[1]}(k)$, $s = 1, 2, \dots, 0,5n(n-1) = c_n^2$. Далі ці сигнали надходять до блоку селекції SB, який виконує сортування вузлів першого прихованого шару за прийнятим критерієм (найчастіше за зростанням значення середнього квадрата помилки). Виходи блоку селекції $\hat{y}_1^{[1]*}(k)$ і

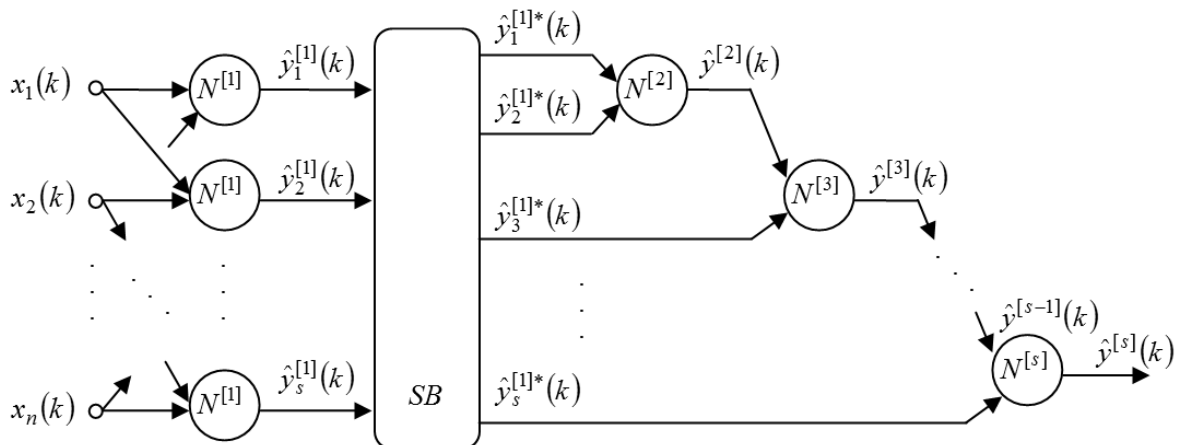


Рисунок 1 – Архітектура еволюційної каскадної системи

$\hat{y}_2^{[1]*}(k)$ надходять до входу єдиного вузла-нейрона другого шару, на виході якого формується вихідний сигнал $\hat{y}^{[2]}(k)$. Цей вихідний сигнал разом з вихідним сигналом блока селекції $\hat{y}_3^{[1]*}(k)$ надходить до входу вузла-нейрона наступного шару. Процес нарощування каскадів триває до досягнення необхідної точності. Варто зауважити, що всі нейрони системи налаштовуються незалежно один від одного. Завдяки цьому об'єм необхідної навчальної вибірки можна скоротити.

У якості вузла каскадної мережі запропоновано використовувати систему, архітектура якої наведена на рис. 2.

Цей вузол є по суті нейро-фаззі системою Ванга-Менделя [16, 17]. На вхід вузла подається двовимірний вектор вхідних сигналів $x(k) = (x_i(k), x_j(k))^T$, що підлягають обробці. Перший шар вузла реалізує фаззіфікацію вхідних змінних. Він містить $2h$ функцій належності $\mu_{li}(x_i(k))$, $\mu_{lj}(x_j(k))$, $l=1, 2, \dots, h$. Елементи першого шару обчислюють рівні належності $0 < \mu_{li}(x_i(k)) \leq 1$, $0 < \mu_{lj}(x_j(k)) \leq 1$. У якості функцій належності найчастіше використовуються гаусіани

$$\mu_{li}(x_i(k)) = \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{li}(k))^2}{2\sigma_{li}^2(k)}\right), \quad (1)$$

де $c_{li}(k)$ – параметр, що визначає центр функції належності, $\sigma_{li}(k)$ – параметр ширини функції належності.

Другий шар забезпечує агрегування рівнів належності, що обчислюються в першому шарі. На виходах другого шару з'являється h агрегованих сигналів $\tilde{x}_l(k) = \mu_{li}(x_i(k))\mu_{lj}(x_j(k))$.

Третій шар – це шар синаптичних ваг, що підлягають налаштуванню у процесі навчання. Виходами третього шару є значення

$$w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k)) = w_l^{ij} \tilde{x}_l(k).$$

Четвертий шар утворений двома суматорами і обчислює суми вихідних сигналів другого та третього шарів. Виходами четвертого шару є значення

$$\begin{cases} \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k)) = \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \tilde{x}_l(k), \\ \sum_{l=1}^h \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k)) = \sum_{l=1}^h \tilde{x}_l(k). \end{cases}$$

У п'ятому (вихідному) шарі нейрона відбувається нормалізація, в результаті якої обчислюється вихідний сигнал вузла $\hat{y}_s^{[1]}(k)$:

$$\begin{aligned} \hat{y}_s^{[1]}(k) &= \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{ij} \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k))} = \frac{\sum_{l=1}^h w_l^{ij} \tilde{x}_l(k)}{\sum_{p=1}^h \tilde{x}_p(k)} = \\ &= \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \frac{\tilde{x}_l(k)}{\sum_{p=1}^h \tilde{x}_p(k)} = \sum_{l=1}^h w_l^{ij} \phi_l^{ij}(x(k)) = (w^{ij})^T \phi^{ij}(x(k)), \end{aligned}$$

$$\text{де } \phi_l^{ij}(x(k)) = \frac{\tilde{x}_l(k)}{\sum_{p=1}^h \tilde{x}_p(k)}$$

$$= \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k)) \left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) \right)^{-1},$$

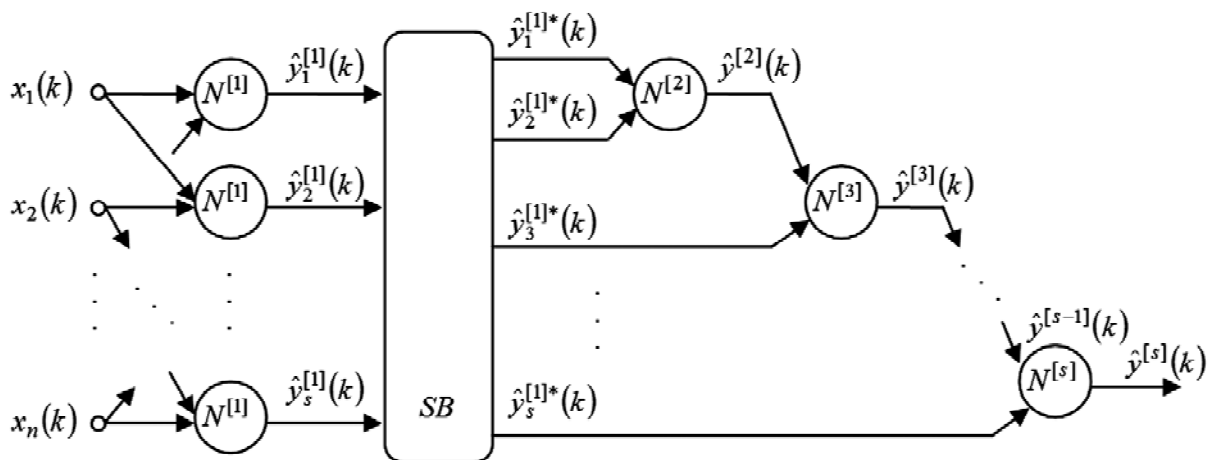


Рисунок 2 – Вузол каскадної мережі

$$w^{ij} = (w_1^{ij}, \dots, w_h^{ij})^T, \quad \varphi^{ij}(x(k)) = (\varphi_1^{ij}(x(k)), \dots, \varphi_h^{ij}(x(k)))^T.$$

Аналогічним чином виконуються обчислення в інших вузлах прихованих шарів. Такий вузол системи подібно до нормалізованої радіально-базисної нейронної мережі реалізує нелінійне відображення вхідних сигналів у вихідні, але містить меншу кількість параметрів, що налаштовуються.

Оскільки вихідний сигнал кожного з вузлів системи $\hat{y}_i^{[1]*}(k)$ лінійно залежить від синаптичних ваг $w_l^{ij}(k)$, для їх налаштування може бути використаний стандартний метод найменших квадратів (МНК). Якщо дані надходять на обробку послідовно в online режимі, то використовується рекурентна форма МНК

$$\begin{cases} w^{ij}(k+1) = w^{ij}(k) + \frac{P^{ij}(k)(y(k) - (w^{ij}(k))^T \varphi^{ij}(x(k))) \varphi^{ij}(x(k))}{\alpha + (\varphi^{ij}(x(k)))^T P^{ij}(k) \varphi^{ij}(x(k))}, \\ P(k+1) = \frac{1}{\alpha} \left(P^{ij}(k) - \frac{P^{ij}(k) \varphi^{ij}(x(k)) (\varphi^{ij}(x(k)))^T P^{ij}(k)}{\alpha + (\varphi^{ij}(x(k)))^T P^{ij}(k) \varphi^{ij}(x(k))} \right), \end{cases} \quad 0 < \alpha \leq 1.$$

Також для налаштування синаптичних ваг може бути використаний оптимальний за швидкістю градієнтний однокроковий алгоритм Качмажа-Уїдрой-Гоффа у вигляді

$$w^{ij}(k+1) = w^{ij}(k) + \frac{y(k) - (w^{ij}(k))^T \varphi^{ij}(x(k))}{\|\varphi^{ij}(x(k))\|^2} \varphi^{ij}(x(k)).$$

Для налаштування параметрів центрів і ширини функцій належності можна використати градієнтні процедури мінімізації критерію навчання

$$E_s^{[1]}(k) = \frac{1}{2} (y(k) - \hat{y}_s^{[1]}(k))^2 = \frac{1}{2} (y(k) - (w^{ij}(k))^T \varphi^{ij}(x(k)))^2. \quad (2)$$

Для спрощення розрахунку похідних і прискорення обчислення значення функції належності можна ввести позначення

$$\tilde{\sigma}_{ri}^2(k) = -0,5\sigma_{ri}^{-2}(k).$$

При застосуванні методу найшвидшого спуску відповідні формули адаптації у загальному випадку для $(n \times 1)$ -вимірного вектора вхідних сигналів набувають вигляду

$$\begin{cases} c_{ri}(k+1) = c_{ri}(k) - \eta_c \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial c_{ri}}, \\ \tilde{\sigma}_{ri}^2(k+1) = \tilde{\sigma}_{ri}^2(k) - \eta_\sigma \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}, \end{cases}$$

де η_c, η_σ – параметри кроку навчання для параметрів центра і ширини відповідно; $r = 1, 2, \dots, h$; $i = 1, 2, \dots, n$.

При використанні в якості функцій належності традиційних гаусіанів (1) відповідні формули градієнта цільової функції (2) для однієї пари $(x(k), y(k))$ навчальних даних набувають вигляду

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial c_{ri}} = \left((w^{ij}(k))^T \varphi^{ij}(x(k)) - y(k) \right) \sum_{l=1}^h w_l^{ij}(k) \frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial c_{ri}}, \\ \frac{\partial E_s^{[1]}(k)}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} = \left((w^{ij}(k))^T \varphi^{ij}(x(k)) - y(k) \right) \sum_{l=1}^h w_l^{ij}(k) \frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}, \end{cases}$$

де

$$\varphi_l^{ij}(x(k)) = \frac{\mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k))}. \quad (3)$$

Похідні $\frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial c_{ri}}$ і $\frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}$, визначені на ос-

нові (3), можна записати як

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial c_{ri}} = \frac{\delta_{lr} \sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) - \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) \right)^2} \times \\ \times \mu_{rj}(x_j(k)) \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}}, \\ \frac{\partial \varphi_l^{ij}(x(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} = \frac{\delta_{lr} \sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) - \mu_{li}(x_i(k)) \mu_{lj}(x_j(k))}{\left(\sum_{p=1}^h \mu_{pi}(x_i(k)) \mu_{pj}(x_j(k)) \right)^2} \times \\ \times \mu_{rj}(x_j(k)) \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}, \end{cases}$$

де δ_{lr} – дельта-функція. Похідні $\frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}}$ і

$\frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2}$, визначені на основі (1), можна записати як

$$\begin{cases} \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial c_{ri}} = \frac{x_i(k) - c_{ri}(k)}{\sigma_{ri}^2(k)} \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{ri}(k))^2}{2\sigma_{ri}^2(k)}\right), \\ \frac{\partial \mu_{ri}(x_i(k))}{\partial \tilde{\sigma}_{ri}^2} = (x_i(k) - c_{ri}(k))^2 \exp\left(-\frac{(x_i(k) - c_{ri}(k))^2}{2\sigma_{ri}^2(k)}\right). \end{cases}$$

Таким чином, виконується паралельне налаштування всіх синаптичних ваг, параметрів центрів та ширини функцій належності вузлів першого прихованого шару системи. Вузли наступних шарів, що утворюють каскадну структуру, налаштовуються аналогічно нейронам першого прихованого шару з тією лише різницею, що їхніми входами є вихідні сигнали $\hat{y}_i^{[1]*}(k)$ блоку селекції SB та попередніх каскадів, а навчальний сигнал $y(k)$ є спільним для всіх елементів еволюційної каскадної системи.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Ефективність запропонованої еволюційної каскадної нейро-фаззі мережі та її процедур навчання була продемонстрована при розв’язанні задачі прогнозування нестационарних сигналів.

У якості тестової вибірки було обрано часовий ряд, що описує щомісячний тиск над рівнем моря за період з 1882 по 1998 рік (Darwin sea level pressure, вибірка отримана зі сховища даних DataMarket). Загальний об’єм вибірки – 1400 спостережень. Навчальна вибірка містила 1100 спостережень, перевірна – 300 спостережень. Для порівняння ефективності запропонованої системи з ефективністю інших існуючих систем було обрано багатошаровий перцептрон, радіально-базисну нейронну мережу та ANFIS.

У якості критерію якості прогнозування було обрано середньоквадратичну помилку (MSE).

На рис. 3 наведено фазовий портрет ряду, що прогнозується.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати проведених експериментів наведено в табл. 1.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як можна побачити з табл. 1, запропонована еволюційна каскадна система досить непогано показала себе при розв’язанні задачі прогнозування. Варто відзначити, що час навчання запропонованої системи був одним з найкращих. Якщо порівнювати якість прогнозів, еволюційна каскадна система продемонструвала найкращий результат.

Результат прогнозування для перевірконої вибірки наведений на рис. 4. Суцільною чорною лінією показаний ряд, що прогнозується, пунктирною – прогноз системи, суцільною сірою – значення помилки.

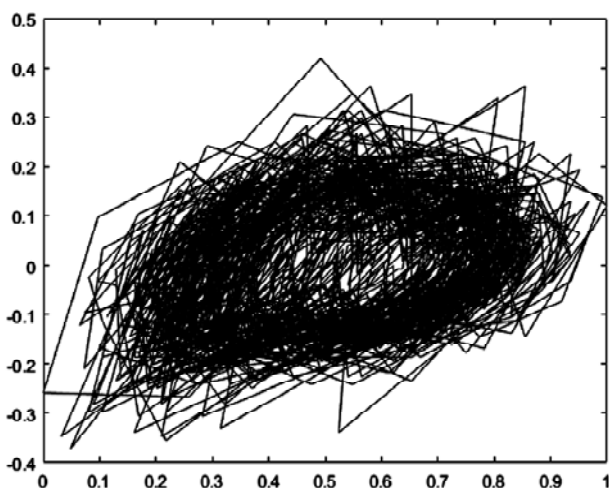


Рисунок 3 – Фазовий портрет ряду

Таблиця 1 – Результати експериментів

Тип системи	Помилка навчання	Помилка тестування	Час навчання, с
Багатошаровий перцептрон	0,0150	0,0168	0,2500
Радіально-базисна нейронна мережа	0,0172	0,0224	0,2391
ANFIS	0,0157	0,0165	0,2031
Еволюційна каскадна система	0,0146	0,0156	0,2067

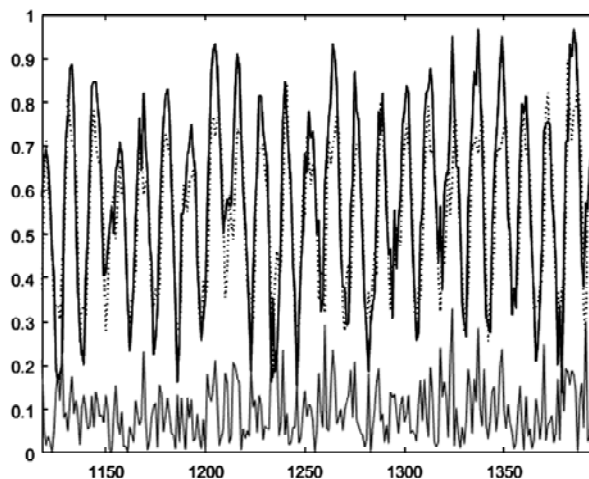


Рисунок 4 – Результати прогнозування ряду

ВИСНОВКИ

Наукова новизна роботи полягає у тому, що запропоновано еволюційну каскадну нейро-фаззі систему та online алгоритм навчання всіх її параметрів, характерною особливістю якої є те, що для свого налаштування вона не потребує великих об’ємів навчальної вибірки. В основі системи лежать ідеї Метода Групового Урахування Аргументів та еволюційних нейро-фаззі систем, що дозволяє знайти не тільки оптимальні значення параметрів, але й отримати найкращу архітектуру для кожної конкретної задачі. Система характеризується простотою чисельної реалізації, а можливість паралельного налаштування її вузлів збільшує швидкість процесу обробки даних.

До практичної цінності отриманих результатів можна віднести те, що запропоновану систему можна використовувати для розв’язання широкого кола задач інтелектуального аналізу даних.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Харківського національного університету радіоелектроніки № 307 «Динамічний інтелектуальний аналіз послідовностей нечіткої інформації за умов суттєвої невизначеності на основі гібридних систем обчислювального інтелекту».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bifet A. Adaptive Stream Mining: Pattern Learning and Mining from Evolving Data Streams / A. Bifet. – IOS Press, 2010. – 224 p.
2. Kasabov N. Evolving fuzzy neural networks : theory and applications for on-line adaptive prediction, decision making and control / N. Kasabov // Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems. – 1998. – Vol. 5, Issue 3. – P. 154–160.
3. Kasabov N. Evolving fuzzy neural networks for on-line supervised/unsupervised, knowledge-based learning / N. Kasabov // IEEE Transactions on Man, Machine, and Cybernetics. – 2001. – Vol. 31, Issue 6. – P. 902–918.
4. Kasabov N. Evolving Connectionist Systems / N. Kasabov. – London : Springer-Verlag, 2003. – 307 p.
5. Lughofer E. Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications / E. Lughofer. – Berlin : Springer, 2011. – 410 p.
6. Ivakhnenko A. G. Polynomial theory of complex systems / A. G. Ivakhnenko // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1971. – Vol. 1, Issue 4. – P. 364–378.
7. Ивахненко А. Г. Самообучающиеся системы распознавания и автоматического управления / А. Г. Ивахненко. – Киев : Техніка, 1969. – 392 с.
8. Ивахненко А. Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными системами / А. Г. Ивахненко. – Киев : Техніка, 1975. – 311 с.
9. Ивахненко А. Г. Помехоустойчивость моделирования / А. Г. Ивахненко, В. С. Степашко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 216 с.

10. Fahlman S. E. The cascade-correlation learning architecture / S. E. Fahlman, C. Lebiere // *NIPS 1989 : Neural Information Processing Systems Conference, Denver, 27-30 November 1989 : proceedings.* – San Mateo, CA : Morgan Kaufman, 1990. – P. 524–532.
11. Prechelt L. Investigation of the CasCor family of learning algorithms / L. Prechelt // *Neural Networks.* – 1997. – Vol. 10, Issue 5. – P. 885–896.
12. Bodyanskiy Ye. Hybrid cascade neural network based on wavelet-neuron / Ye. Bodyanskiy, O. Kharchenko, O. Vynokurova // *Information Theories and Applications.* – 2011. – Vol. 18, Issue 4. – P. 335–343.
13. Bodyanskiy Ye. Evolving cascade neural network based on multidimensional Epanechnikov's kernels and its learning algorithm / Ye. Bodyanskiy, P. Grimm, N. Teslenko // *Information Technologies and Knowledge.* – 2011. – Vol. 5, Issue 1. – P. 25–30.
14. Wang L.-X. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning / L.-X. Wang, J. M. Mendel // *IEEE Transactions on Neural Networks.* – 1992. – Vol. 3, Issue 5. – P. 807–814.
15. Wang L.-X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Stability Analysis* / L. X. Wang. – Upper Saddle River : Prentice Hall, 1994. – 256 p.

Стаття надійшла до редакції 29.03.2016.

Після доробки 11.04.2016.

Бодянский Е. В.¹, Тищенко А. К.², Бойко Е. А.³

¹Д-р техн. наук, научный руководитель Проблемной НИЛ АСУ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

²Канд. техн. наук, старший научный сотрудник Проблемной НИЛ АСУ, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

³Аспирантка кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина

ЭВОЛЮЦИОНИРУЮЩАЯ КАСКАДНАЯ СИСТЕМА НА ОСНОВЕ НЕЙРО-ФАЗЗИ УЗЛОВ

В статье предложена эволюционирующая каскадная система вычислительного интеллекта на основе нейро-фаззи узлов, а также алгоритмы её обучения. Предложенная система в процессе обучения настраивает не только свои параметры, но и архитектуру в online режиме. В качестве узлов эволюционирующей каскадной системы предлагается использовать нейро-фаззи системы. Для настройки параметров функций принадлежности нейро-фаззи узлов предложен алгоритм, основанный на использовании градиентной процедуры минимизации критерия обучения. В процессе обучения нейро-фаззи узлов настраиваются синаптические веса, центры и параметры ширины функций принадлежности нейро-фаззи узлов. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную архитектуру эволюционирующей каскадной нейро-фаззи системы. Проведен ряд экспериментов по исследованию свойств предложенной системы. Результаты экспериментов подтвердили то, что предложенную систему можно использовать для решения широкого круга задач интеллектуального анализа данных, при этом обработка данных происходит в online режиме. Система характеризуется простотой численной реализации, а процесс обработки данных ускоряется благодаря возможности параллельной настройки узлов эволюционирующей каскадной системы. Отличительной особенностью предложенной системы является то, что для ее настройки не требуется большой объем обучающей выборки.

Ключевые слова: гибридная система, вычислительный интеллект, каскадная система, нейро-фаззи система, функция принадлежности, эволюционирующая система.

Bodyanskiy Ye. V.¹, Tyshchenko O. K.², Boiko O. O.³

¹Dr.Sc., Scientific Head of the Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

²Ph.D., Senior Researcher at the Control Systems Research Laboratory, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

Ukraine

³Ph.D. student at the Artificial Intelligence Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

AN EVOLVING CASCADE SYSTEM BASED ON NEURO-FUZZY NODES

An evolving cascade system based on fuzzy-neurons and its learning procedures are proposed in the paper. During a learning procedure in an online mode, the proposed system tunes both its parameters and its architecture. Neuro-fuzzy systems are proposed as nodes of the evolving cascade system. A method based on the gradient procedure of a learning criterion minimization is proposed for membership functions' tuning in the neuro-fuzzy nodes. Synaptic weights, centers and width parameters of the membership functions are tuned during the learning procedure. Software that implements the proposed evolving cascade neuro-fuzzy system's architecture has been developed. A number of experiments has been held in order to research the proposed system's properties. Experimental results have proven the fact that the proposed system could be used to solve a wide range of Data Mining tasks. Data sets are processed in an online mode. The proposed system provides computational simplicity, and data sets are processed faster due to the possibility of parallel tuning for the evolving cascade system. A distinguishing feature of the proposed system is that there is no need of a large training set for the system to be tuned.

Keywords: hybrid system, Computational Intelligence, cascade system, neuro-fuzzy system, membership function, evolving system.

REFERENCES

1. Bifet A. *Adaptive Stream Mining: Pattern Learning and Mining from Evolving Data Streams.* IOS Press, 2010, 224 p.
2. Kasabov N. Evolving fuzzy neural networks : theory and applications for on-line adaptive prediction, decision making and control, *Australian Journal of Intelligent Information Processing Systems*, 1998, Vol. 5, Issue 3, pp. 154–160.
3. Kasabov N. Evolving fuzzy neural networks for on-line supervised/unsupervised, knowledge-based learning, *IEEE Transactions on Man, Machine, and Cybernetics*, 2001, Vol. 31, Issue 6, pp. 902–918.
4. Kasabov N. *Evolving Connectionist Systems.* London, Springer-Verlag, 2003, 307 p.
5. Lughofer E. *Evolving Fuzzy Systems – Methodologies, Advanced Concepts and Applications.* Berlin, Springer, 2011, 410 p.
6. Ivakhnenko A. G. Polynomial theory of complex systems, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1971, Vol. 1, Issue 4, pp. 364–378.
7. Ivakhnenko A. G. Samoobuchayushiesya sistemy raspoznavaniya i avtomaticheskogo upravleniya. Kiev, Technika, 1969, 392 p.
8. Ivakhnenko A. G. Dolgosrochnoe prognozirovanie i upravlenie slozhnyimi sistemami. Kiev, Technika, 1975, 311 p.
9. Ivakhnenko A. G., Stepashko V. S. *Pomexoustojchivost' modelirovaniya.* Kiev, Naukova dumka, 1985, 216 p.
10. Fahlman S. E., Lebiere C. The cascade-correlation learning architecture, *NIPS 1989 : Neural Information Processing Systems Conference, Denver, 27–30 November 1989 : proceedings.* San Mateo, CA, Morgan Kaufman, 1990, pp. 524–532.
11. Prechelt L. Investigation of the CasCor family of learning algorithms, *Neural Networks*, 1997, Vol. 10, Issue 5, pp. 885–896.
12. Bodyanskiy Ye., Kharchenko O., Vynokurova O. Hybrid cascade neural network based on wavelet-neuron, *Information Theories and Applications*, 2011, Vol. 18, Issue 4, pp. 335–343.
13. Bodyanskiy Ye., Grimm P., Teslenko N. Evolving cascade neural network based on multidimensional Epanechnikov's kernels and its learning algorithm, *Information Technologies and Knowledge*, 2011, Vol. 5, Issue 1, pp. 25–30.
14. Wang L.-X., Mendel J. M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning, *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1992, Vol. 3, Issue 5, pp. 807–814.
15. Wang L.-X. *Adaptive Fuzzy Systems and Control. Design and Stability Analysis.* Upper Saddle River, Prentice Hall, 1994, 256 p.

РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ НЕПОЛНОСТЬЮ ОПРЕДЕЛЕННЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДОМ ДЕТЕРМИНИЗАЦИИ

Рассмотрены существующие подходы к расчету, анализу, синтезу и оптимизации систем в условиях неопределенности. Исследование неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Все эти задачи значительно сложнее их детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными (точно известными) параметрами. Такое усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел сложнее алгебры детерминированных чисел. В статье сформулирована и подробно описана задача вычисления и анализа поведения неполностью определенной функции, заданной с точностью до интервала значений. Для решения указанной задачи предложен алгоритм детерминизации, который позволяет свести задачу к двум аналогичным – для верхней и нижней граничных функций исходной неполностью определенной функции. В этом алгоритме автором использован аппарат интервальной математики и интервально-дифференциального исчисления. Далее выделены различные типы возможного поведения интервальных функций (постоянство, возрастание, убывание, расширение, сужение) и различные типы экстремальных точек таких функций (например, точка максимума, точка минимума, точка максимального расширения, точка минимального расширения). Доказаны теоремы, которые позволяют определять участки различного поведения интервальных функций и точки с различными видами экстремума. Подробно рассмотрена работа предложенного алгоритма детерминизации, позволяющего анализировать поведение интервальных функций. Работа проиллюстрирована на конкретном примере.

Ключевые слова: оптимизация, детерминированная функция, интервальная функция, анализ поведения функций, неопределенность.

НОМЕНКЛАТУРА

x_1, x_2, \dots – вещественные независимые переменные;

y_1, y_2 – вещественные зависимые переменные;

X – множество независимых переменных;

Y – множество зависимых переменных;

a_i, b_i – вещественные числа;

f_1, f_2, \dots – вещественные детерминированные функции;

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

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

\vee – символ дизъюнкции (взятия максимума);

\wedge – символ конъюнкции (взятия минимума).

ВВЕДЕНИЕ

Современная наука и практика обработки информации успешно справляется с задачами исследования различных систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Эти задачи обычно формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза тех или иных функций с детерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками изучаемых систем. Но на практике часто встречаются другие системы – системы с неточно известными, т.е. неполностью определенными (недетерминированными) параметрами. Причины появления таких систем заключаются в естественной неопределенности, свойственной многим реальным процессам, происходящим в системах; в неточном задании параметров большинства систем из-за неизбежных погрешностей при их вычислении или измерении; в изменении во времени параметров систем; в необходимости или целесообразности совместного исследования целых семейств однотипных сис-

тем, имеющих одинаковые функции-характеристики и различающихся лишь значениями параметров этих функций. Учет неопределенности систем особенно важен при их проектировании, поскольку полная определенность в работе системы появляется лишь на последних этапах ее создания.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Все эти задачи значительно сложнее их вышеупомянутых детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными параметрами. Усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел сложнее алгебры детерминированных чисел.

В настоящей статье рассматриваются задачи расчета и анализа неточно заданных (недетерминированных) функций интервального типа. В качестве математического аппарата используется интервальная алгебра и интервально-дифференциальное исчисление.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим обычную (детерминированную) функцию одной независимой переменной

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

однозначно отображающую заданное множество $X = \{x\}$ независимых переменных x в заданное множество $Y = \{y\}$ зависимых переменных y в соответствии с некоторым законом f , который и называется функцией. Хорошо известно, что задача расчета (вычисления значений) функции (1) решается с помощью адекватного

этой задаче математического аппарата алгебры вещественных чисел, при использовании подходящих методов вычисления, а задача анализа поведения функции (1) – с помощью адекватного ей аппарата классического дифференциального исчисления [1].

Далее, рассмотрим недетерминированную (конкретно, интервальную) функцию одной независимой переменной [2]

$$\tilde{y} = \tilde{f}(x), \quad (2)$$

однозначно отображающую заданное множество $X = \{x\}$ независимых вещественных (как и в (1)) переменных x в заданное множество $\tilde{Y} = \{\tilde{y}\}$ зависимых переменных-интервалов $\tilde{y} = [y_1, y_2]$, в соответствии с законом \tilde{f} , который и называется интервальной функцией. По определению (2), любую интервальную функцию можно представить в виде пары обычных функций

$$\tilde{f} = \{f_1, f_2\}, \quad (3)$$

которые имеют вид

$$y_1 = f_1(x), y_2 = f_2(x). \quad (4)$$

Из соотношений (3), (4) видно, что интервальная функция \tilde{f} эквивалентна паре обычных функций f_1, f_2 , из которых первая однозначно отображает заданное множество $X = \{x\}$ независимых переменных x функции \tilde{f} в множество $Y_1 = \{y_1\}$ нижних границ интервалов $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ – зависимых переменных этой функции, а вторая однозначно отображает то же множество $X = \{x\}$ в множество $Y_2 = \{y_2\}$ верхних границ интервалов $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ – зависимых переменных функции.

Задача настоящей работы заключается в построении двух систематических процедур (алгоритмов), связанных с изучением поведения интервальных функций (2). А именно: 1) процедура расчета (т.е. вычисления значений) интервальной функции; 2) процедура анализа поведения интервальной функции.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Проблема изучения объектов, характеризующихся той или иной неопределенностью, возникла впервые в начале Второй мировой войны, в связи с необходимостью управления огнем зенитной артиллерии, в условиях случайного движения воздушных целей. Соответствующими задачами занимались выдающиеся математики-вероятностники Н. Винер [3] и А. Н. Колмогоров [4] и их многочисленные последователи. Однако широкое развитие исследований по изучению гражданских объектов, работающих в условиях неопределенности, началось только в конце 1950-х – начале 1960-х гг., в рамках математической статистики и ее новых направлений – обработка данных и планирование экспериментов [5, 6].

1970-е – 1980-е годы привели к более широкому пониманию неопределенности, включившей в себя теперь не только случайность, но и незнание, неединственность возможных исходов, неопределенность целей, многокри-

териальность при решении задач оптимизации. В связи с этим появились новые подходы к описанию неопределенности: теория нечетких множеств, принцип недоопределенной модели, принятие решений в многокритериальных задачах [7, 8, 9].

Наконец, с 1980-х годов начал интенсивно применяться подход к описанию неопределенности, базирующийся на интервальной математике, позволяющей получать оценки характеристик неопределенных систем с гарантированной точностью [10–16]. При этом указанный подход применялся сначала в метрологии для определения интервального значения известной функции при интервальных значениях аргументов. Затем его развитие пошло по двум направлениям. За рубежом этот подход развивался как средство автоматического учета ошибок округления при численном решении задач на компьютерах, в то время как в СССР и России ученые развивали его с целью нахождения области возможных значений результата вычислений с учетом структуры данных и функций, заданных в символьном виде. Но во всех упомянутых выше подходах к изучению систем с неопределенностями не фигурирует элементарная по форме, но очень важная в практических приложениях базовая задача изучения поведения неположительно определенной функции, служащей характеристикой такой системы, которая аналогична базовой для математического анализа задаче анализа поведения полностью определенной функции. Настоящая статья направлена на решение именно этой задачи.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Начнем с решения задачи расчета (вычисления значений) интервальной функции. При этом возможны два случая.

Случай 1. Интервальная функция задана в разделенном виде, в котором верхняя и нижняя границы интервального значения функции выражены каждая по отдельности. Этот вид представления интервальной функции вытекает из соотношений (2)–(4). Именно, из (2), (3) следует явное представление интервальной функции в виде интервала

$$[y_1, y_2] = [f_1(x), f_2(x)], \quad (5)$$

границы которого согласно (5) выражаются формулами

$$y_1 = f_1(x), \quad y_2 = f_2(x). \quad (6)$$

Итак, вычисление интервального значения $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ интервальной функции (2), соответствующего значению x независимой переменной этой функции, осуществляется по алгоритму:

Шаг 1. Записываем вычисляемую интервальную функцию (2) в разделенном виде (5), (6) с помощью нижней f_1 и верхней f_2 граничных функций функции (2).

Шаг 2. Вычисляем нижнюю граничную функцию f_1 , используя для этого какой-либо подходящий известный метод вычисления обычных (детерминированных, т.е. полностью определенных) функций [17].

Шаг 3. Вычисляем соответствующую верхнюю граничную функцию f_2 , используя ту же методику, что и на шаге 2.

Шаг 4. Соединяя вычисленные значения нижней f_1 и верхней f_2 граничных функций, получим явное представление (5) вычисленной интервальной функции (2) в виде интервала.

Случай 2. Интервальная функция задана в неразделенном виде, т.е. в виде суперпозиции элементарных интервальных функций: интервального сложения и вычитания, умножения интервала на вещественное число, умножения и деления интервалов [11]. В указанном случае перед собственно вычислением интервальной функции приводится к разделенному виду, после чего к функции применяется 4-шаговый алгоритм случая 1. Приведение любой интервальной функции к разделенному виду можно осуществить с помощью основных формул интервальной математики, выражающих результаты элементарных преобразований интервалов [11]

$$\begin{aligned} [a_1, a_2] + [b_1, b_2] &= [a_1 + b_1, a_2 + b_2]; \\ [a_1, a_2] - [b_1, b_2] &= [a_1 - b_2, a_2 - b_1]; \\ k \cdot [a_1, a_2] &= \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0; \end{cases} \\ [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] &= [\min_{i,j}(a_i \cdot b_j), \max_{i,j}(a_i \cdot b_j)]; \\ [a_1, a_2] / [b_1, b_2] &= [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1]. \end{aligned} \tag{7}$$

Пример 1. Привести к разделенному виду интервальную функцию

$$\tilde{y} = ([2, 3]x + [1, 2]x) \cdot ([5, 7]x + [4, 6]x) \text{ в области } x \geq 0.$$

Решение. Применяя к заданной интервальной функции последовательно третью, первую и четвертую формулы (7), получим нужный вид функции

$$\begin{aligned} \tilde{y} &= [y_1, y_2] = ([2x, 3x] + [x, 2x]) \times \\ &\times ([5x, 7x] + [4x, 6x]) = [3x, 5x] \cdot [9x, 13x] = \\ &= [\min(3 \cdot 9x^2, 3 \cdot 13x^2, 5 \cdot 9x^2, 5 \cdot 13x^2), \\ &\max(3 \cdot 9x^2, 3 \cdot 13x^2, 5 \cdot 9x^2, 5 \cdot 13x^2)] = [27x^2, 65x^2]. \end{aligned}$$

Таким образом, $y_1 = 27x^2, y_2 = 65x^2$, и наконец, разделенная форма заданной интервальной функции $\tilde{y} = [y_1, y_2] = [27x^2, 65x^2]$.

Перейдем к описанию уже упомянутой ранее (п. 1) задачи анализа поведения интервальной функции. Постановка этой задачи аналогична постановке задачи анализа поведения обычной детерминированной функции и включает, в первую очередь, отыскание

- 1) интервалов возрастания функции;
- 2) интервалов убывания функции;
- 3) интервалов постоянства значений функции;
- 4) точек максимума функции;
- 5) точек минимума функции.

Кроме того, постановка задачи анализа поведения интервальной функции может включать отыскание особых интервалов (особых точек) такой функции. Существование таких интервалов (таких точек) связано с интервальным характером этой функции. У обычных детерминированных функций такие интервалы (точки) отсутствуют.

Очевидно, что решение задач анализа поведения интервальной функции требует сравнения величин интервалов. В связи с этим ниже кратко изложены основные результаты теории сравнения интервалов [18, 19]. Эти результаты составляют теоретическую базу детерминистического подхода к принятию решений в условиях интервальной неопределенности. Теоретические основы других возможных подходов к принятию решений в условиях неопределенности можно найти в литературе [20–23]. Принятие решений в условиях неопределенности является важной составной частью онтологии проектирования [24].

Рассмотрим два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$. Попытаемся сравнить величины этих интервалов, рассматривая их как интервальные числа. Прямое сравнение интервалов \tilde{a} и \tilde{b} на основе отношений отдельных пар вещественных чисел (a_i, b_j) , где $a_i \in \tilde{a}, b_j \in \tilde{b}$, не всегда возможно, так как в общем случае одни пары чисел будут находиться в отношении $(a_i > b_j)$, а другие – в противоположном отношении $(a_i < b_j)$. Поэтому остается только реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая каждый из интервалов как единое целое, не делимое на части. При этом операции нахождения максимума \vee и минимума \wedge двух интервалов $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ можно ввести в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a} \vee \tilde{b} = \{a \vee b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \{a \wedge b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \tag{8}$$

Таким образом, взятие максимума (минимума) двух интервалов \tilde{a} и \tilde{b} определяется, согласно (8), как нахождение множества максимумов (минимумов) двух точных величин a и b , при условии, что эти величины пробегает 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, при этом установив их отношение $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, нужно, чтобы 1) введенные операции \vee, \wedge над этими интервалами существовали; 2) эти операции давали в результате один из операндов: \tilde{a} или \tilde{b} ; 3) указанные две операции были согласованы, т.е. если большим (меньшим) оказывается один из интервалов, то меньшим (большим) является другой из них. Сформулированное условие сравнимости величин интервалов является, очевидно, необходимым и достаточным.

Нетрудно доказать, что условие согласованности операций \vee и \wedge над интервалами всегда выполняется. Очевидно также, что эти операции существуют для любой пары \tilde{a}, \tilde{b} , причем результатом операции в общем случае оказывается некоторый новый интервал, отличный как от \tilde{a} , так и от \tilde{b} . Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости интервалов \tilde{a} и \tilde{b} оказывается условие, по которому операции $\tilde{a} \vee \tilde{b}$ и $\tilde{a} \wedge \tilde{b}$ должны иметь своим результатом один из интервалов – \tilde{a} или \tilde{b} . Из этой формулировки условия сравнимости интервалов выводятся различные его конструктивные формы, удобные для практического применения. Эти формы содержатся в следующих теоремах 1–4.

Теорема 1. Для того чтобы два интервала $\tilde{a}=[a_1, a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1, b_2]$ были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \geq b_1, a_2 \geq b_2, \quad (9)$$

а для того чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \leq b_1, a_2 \leq b_2. \quad (10)$$

Из этой теоремы вытекает, что любые интервалы \tilde{a}, \tilde{b} сравнимы по величине (по отношению \geq или \leq) и находятся в этом отношении только тогда, когда в таком же отношении находятся их одноименные границы a_1, b_1 и a_2, b_2 .

Значение теоремы 1 в том, что она сводит сравнение интервалов и выбор большего (меньшего) из них к очевидной операции сравнения границ указанных интервалов, являющихся вещественными числами.

Теорема 2. Для того чтобы два интервала $\tilde{a}=[a_1, a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1, b_2]$ были несравнимы по величине (по отношению \geq или \leq), т. е. не находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \text{ или } (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \quad (11)$$

Из приведенной выше теоремы 2 вытекает, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} не сравнимы по отношениям \geq и \leq только тогда, когда один из них полностью накрывает другой. Значение теоремы состоит в том, что она выявляет существование определенных случаев несравнимости интервалов по отношениям \geq и \leq , в отличие от обычных вещественных чисел, которые всегда сравнимы по этим отношениям. Несравнимость некоторых интервалов – естественный результат того, что интервальные числа, в отличие от обычных вещественных чисел, задаются не точно, а с неопределенностью (т. е. число принимает некоторое значение в заданном интервале, но при этом не уточняется, какое именно это значение).

Будем рассматривать теперь систему нескольких интервалов

$$\tilde{a}_1=[a_{11}, a_{12}], \tilde{a}_2=[a_{21}, a_{22}], \tilde{a}_3=[a_{31}, a_{32}], \dots \quad (12)$$

Сравнение по отношениям \geq, \leq величин интервалов выписанной системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется в результате попарного сравнения указанных интервалов, выполняемого в соответствии с теоремами 1, 2. Основные результаты, получаемые этим путем, содержатся в теоремах 3 и 4.

Теорема 3. Для того чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении \geq , и этим интервалом являлся \tilde{a}_1 , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\begin{aligned} a_{11} &\geq a_{21}, a_{11} \geq a_{31}, a_{11} \geq a_{41}, \dots \\ a_{12} &\geq a_{22}, a_{12} \geq a_{32}, a_{12} \geq a_{42}, \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Теорема 4. Для того чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении \leq , и этим интервалом являлся \tilde{a}_1 , необходимо и достаточно, чтобы границы данного интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\begin{aligned} a_{11} &\leq a_{21}, a_{11} \leq a_{31}, a_{11} \leq a_{41}, \dots \\ a_{12} &\leq a_{22}, a_{12} \leq a_{32}, a_{12} \leq a_{42}, \dots \end{aligned} \quad (14)$$

Как показывают теоремы 3, 4, интервал является максимальным (минимальным) в системе интервалов только тогда, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница – среди нижних границ всех интервалов и верхняя граница – среди верхних границ всех интервалов. Подобно случаю сравнения двух интервалов, сравнение произвольного числа интервалов не выявит экстремального интервала, если интервалы, входящие в систему, попарно не сравнимы.

До сих пор мы рассматривали процедуры выделения, вообще говоря, нестрого максимального (нестрого минимального) интервала, основанные на теоретико-множественных операциях (8) вычисления нестрогого максимума (нестрогого минимума) двух интервалов. Аналогично этому вводятся процедуры выделения строго максимального (строго минимального) интервала, т. е. единственного интервала, являющегося максимальным (минимальным).

Будем считать равными по определению совпадающие интервалы, т. е. для произвольных интервалов $\tilde{a}=[a_1, a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1, b_2]$, условие их равенства вводится таким образом:

$$(\tilde{a} = \tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1 = b_1, a_2 = b_2). \quad (15)$$

Из выражения (15) следует, что неравными являются интервалы, удовлетворяющие следующему условию:

$$(\tilde{a} \neq \tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1 \neq b_1 \text{ или } a_2 \neq b_2). \quad (16)$$

Теперь определение того факта, что некоторый интервал \tilde{a} является строго максимальным из двух интервалов \tilde{a}, \tilde{b} , можно записать в виде

$$(\tilde{a} > \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \neq \tilde{b}), \quad (17)$$

аналогичным образом, определение того, что некоторый интервал \tilde{a} является строго минимальным из двух интервалов \tilde{a}, \tilde{b} , записывается в виде

$$(\tilde{a} < \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \neq \tilde{b}). \quad (18)$$

Здесь \vee и \wedge – теоретико-множественные операции (8) вычисления максимума и минимума двух интервалов.

Из формулировки условий (17), (18) сравнимости интервалов в виде строгих неравенств между ними можно вывести различные конструктивные формы этих условий, удобные для использования. Такие формы содержатся в теоремах 5–8, которые подобны теоремам 1–4, дающим удобные конструктивные формы сравнимости интервалов в виде нестрогих неравенств.

Теорема 5. Для того чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2], \tilde{b} = [b_1, b_2]$ были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} > \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 > b_1, a_2 \geq b_2) \text{ или } (a_1 \geq b_1, a_2 > b_2), \quad (19)$$

а для того чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} < \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 \leq b_2) \text{ или } (a_1 \leq b_1, a_2 < b_2). \quad (20)$$

Из теоремы 5 ясно, что интервалы \tilde{a} и \tilde{b} сравнимы по величине (отношению $>$ или $<$) и находятся в указанном отношении лишь тогда, когда в том же отношении находятся их нижние границы a_1, b_1 (при этом верхние границы a_2, b_2 находятся в соответствующем нестрогом отношении – для $>$ это \geq , а для $<$ это \leq) или же, наоборот, их верхние границы (при этом нижние границы a_1, b_1 находятся в соответствующем нестрогом отношении).

Теорема 6. 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 $>$ или $<$), т.е. не находились в отношении $\tilde{a} > \tilde{b}$ или $\tilde{a} < \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \text{ или } (b_1 < a_1, b_2 > a_2) \text{ или } (a_1 = b_1, a_2 = b_2). \quad (21)$$

Итак, произвольные интервалы \tilde{a} и \tilde{b} не сравнимы по отношениям $>$ и $<$ только в тех случаях, когда один из них полностью покрывает другой либо когда интервалы равны между собой.

Значение теоремы 6 в том, что она показывает существование случаев несравнимости интервалов по отношениям $>$ и $<$ даже тогда, когда сравниваемые интервалы не равны между собой, а только покрывают один другой. Эта ситуация отличается от ситуации со сравнением вещественных чисел, где неравные числа всегда сравнимы по отношениям $>$ и $<$.

Рассмотрим теперь систему нескольких интервалов (12). Сравнение по отношениям $>$ и $<$ величин интервалов системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется путем попарного сравнения этих интервалов, в соответствии с теоремами 5 и 6. Основные результаты, получаемые этим путем, изложены в теоремах 7, 8.

Теорема 7. Для того чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении $>$, и этим интервалом был \tilde{a}_1 , необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} > a_{21}, a_{12} \geq a_{22}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{21}, a_{12} > a_{22}) \\ (a_{11} > a_{31}, a_{12} \geq a_{32}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{31}, a_{12} > a_{32}) \\ (a_{11} > a_{41}, a_{12} \geq a_{42}) \text{ или } (a_{11} \geq a_{41}, a_{12} > a_{42}) \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Теорема 8. Для того чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в

отношении $<$, и этим интервалом являлся \tilde{a}_1 , необходимо и достаточно, чтобы границы данного интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left. \begin{aligned} (a_{11} < a_{21}, a_{12} \leq a_{22}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{21}, a_{12} < a_{22}) \\ (a_{11} < a_{31}, a_{12} \leq a_{32}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{31}, a_{12} < a_{32}) \\ (a_{11} < a_{41}, a_{12} \leq a_{42}) \text{ или } (a_{11} \leq a_{41}, a_{12} < a_{42}) \\ \dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

4 АНАЛИЗ ПОВЕДЕНИЯ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ

В предыдущем разделе мы изложили вспомогательный для задачи анализа поведения интервальной функции материал, связанный со сравнением интервальных величин. Теперь мы займемся собственно анализом поведения интервальных функций.

Рассмотрим произвольную интервальную функцию (2). Будем считать, что эта функция задана в разделенном виде (5), (6). Это не ограничивает общности рассмотрения, так как функция, заданная в неразделенном виде, всегда может быть приведена к разделенному виду (п. 2). Будем также полагать, что нижняя и верхняя граничные функции интервальной функции непрерывны и дифференцируемы. Сформулируем условия, при которых функция возрастает, убывает, остается постоянной, достигает максимума (минимума), ведет себя иным способом.

По аналогии с обычными (детерминированными) функциями [1] мы введем понятия возрастания, убывания, постоянства, максимума и минимума интервальной функции.

Определение 1. Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется возрастающей на интервале (a, b) , если для любых x_1 и x_2 из указанного интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_1) < \tilde{f}(x_2)$.

Определение 2. Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется убывающей на интервале (a, b) , если для любых x_1 и x_2 из данного интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_1) > \tilde{f}(x_2)$.

Определение 3. Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется постоянной на интервале (a, b) , если для любых x_1 и x_2 из этого интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется равенство $\tilde{f}(x_1) = \tilde{f}(x_2)$.

Определение 4. Точка $x = x_0$ называется точкой максимума заданной интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а само число $\tilde{f}(x_0)$ – максимумом этой функции, если для всех точек x из некоторой окрестности точки x_0 , не совпадающих с x_0 , истинно строгое неравенство $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$.

Определение 5. Точка $x = x_0$ называется точкой минимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ – минимумом этой функции, если для всех точек x из некоторой окрестности точки x_0 , не совпадающих с x_0 , выполняется строгое неравенство $\tilde{f}(x_0) < \tilde{f}(x)$.

Определение 6. Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется расширяющейся на интервале (a, b) , если для любых точек x_1 и x_2 из этого интервала, для которых $x_1 < x_2$, интервал $\tilde{f}(x_2)$ полностью «накрывает» интервал $\tilde{f}(x_1)$.

Определение 7. Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется сужающейся на интервале (a, b) , если для любых точек x_1, x_2 из этого интервала, для которых $x_1 < x_2$, интервал $\tilde{f}(x_1)$ полностью покрывает интервал $\tilde{f}(x_2)$.

Определение 8. Точку $x = x_0$ будем называть точкой максимального расширения интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $D(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$ – максимальной шириной указанной функции, если для всех точек x из некоторой окрестности точки x_0 , не совпадающих с x_0 , интервал полностью покрывает интервал $\tilde{f}(x)$.

Определение 9. Точку $x = x_0$ будем называть точкой максимального сужения интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $d(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$ – минимальной шириной функции $\tilde{f}(x)$, если для всех точек x некоторой окрестности точки x_0 , не совпадающих с x_0 , интервал полностью «накрывает» $\tilde{f}(x_0)$.

Сформулируем и докажем условия, которые определяют то или иное поведение интервальной функции.

Теорема 9. Для того чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ являлась возрастающей на интервале (a, b) , необходимо и достаточно, чтобы на указанном интервале ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ была возрастающей, а верхняя граничная функция $f_2(x)$ – неубывающей либо, наоборот, функция $f_2(x)$ была возрастающей, а функция $f_1(x)$ – неубывающей.

Доказательство. Представим нашу интервальную функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ в интервальной форме (5): $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$. Возрастание данной функции на интервале (a, b) по определению (1) означает, что для любых x_1, x_2 из этого интервала, таких, что $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $[f_1(x_1), f_2(x_1)] < [f_1(x_2), f_2(x_2)]$, которое, по теореме 5, приводит к двум возможным вариантам:

$$f_1(x_1) < f_1(x_2), f_2(x_1) \leq f_2(x_2) \text{ или } f_1(x_1) \leq f_1(x_2), f_2(x_1) < f_2(x_2).$$

Итак, либо на всем интервале (a, b) нижняя граничная функция $f_1(x)$ нашей интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ является возрастающей, а верхняя граничная функция $f_2(x)$ – неубывающей либо наоборот, $f_2(x)$ является возрастающей, $f_1(x)$ – неубывающей, что и требовалось доказать.

Теорема 10. Для того чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ была убывающей на интервале (a, b) , необходимо и достаточно, чтобы на указанном интервале ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ была убывающей, а верхняя граничная функция $f_2(x)$ – невозрастающей либо, наоборот, функция $f_2(x)$ была убывающей, а функция $f_1(x)$ – невозрастающей.

Доказательство аналогично доказательству теоремы 9, однако использует определение 2 вместо определения 1.

Теорема 11. Для того чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ была постоянной на интервале (a, b) , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале ее нижняя $f_1(x)$ и верхняя $f_2(x)$ граничные функции были постоянными.

Доказательство следует прямо из определения интервала как множества всех вещественных чисел между заданными двумя числами – границами интервала, включая сами границы.

Теорема 12. Для того чтобы $x = x_0$ была точкой максимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ – максимумом этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в указанной точке достигала максимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и не достигала минимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ либо, наоборот, достигала максимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ и не достигала минимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$.

Доказательство. Представим нашу интервальную функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ в интервальной форме (5): $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$. Существование максимума этой функции в точке $x = x_0$ по определению 4 означает, что для всех точек x из некоторой окрестности точки x_0 , не совпадающих с x_0 , выполняется неравенство $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$ или, в интервальной форме $[f_1(x_0), f_2(x_0)] > [f_1(x), f_2(x)]$, причем последнее неравенство, согласно теореме 5, эквивалентно условию

$$(f_1(x_0) > f_1(x), f_2(x_0) \geq f_2(x)) \text{ или } (f_1(x_0) \geq f_1(x), f_2(x_0) > f_2(x)).$$

Условия левой скобки показывают, что в точке x_0 функция $f_1(x)$ обращается в максимум, функция $f_2(x)$ при этом не обращается в минимум. Условия правой скобки говорят, что в точке x_0 функция $f_2(x)$ обращается в максимум, а функция $f_1(x)$ не обращается в минимум, что и требовалось доказать.

Теорема 13. Для того чтобы $x = x_0$ была точкой минимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ – минимумом этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в указанной точке достигала минимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и не достигала максимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ либо, наоборот, достигала минимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ и не достигала максимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$.

Доказательство теоремы 13 аналогично доказательству теоремы 12, но использует определение 5.

Теорема 14. Для того чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ являлась расширяющейся на интервале (a, b) , необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале была убывающей ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и была возрастающей ее верхняя граничная функция $f_2(x)$.

Доказательство. Для любых точек x_1, x_2 из интервала (a, b) , таких, что $x_1 < x_2$, в силу расширения функции f

на этом интервале должно выполняться условие: интервал $\tilde{f}(x_2)$ полностью покрывает интервал $\tilde{f}(x_1)$. Выражая интервалы $\tilde{f}(x_1)$ и $\tilde{f}(x_2)$ в явной интервальной форме $\tilde{f}(x_1)=[f_1(x_1), f_2(x_1)]$, $\tilde{f}(x_2)=[f_1(x_2), f_2(x_2)]$, имеем условие накрытия интервалов:

$$f_1(x_2) < f_1(x_1), f_2(x_2) > f_2(x_1).$$

Первое из неравенств показывает, что функция $f_1(x)$ убывающая, а второе – что функция $f_2(x)$ возрастающая. Что и требовалось доказать.

Теорема 15. Для того чтобы интервальная функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была сужающейся на интервале (a, b) , необходимо и достаточно, чтобы на данном интервале была убывающей ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ и была возрастающей ее нижняя граничная функция $f_1(x)$.

Доказательство аналогично доказательству теоремы 14.

Теорема 16. Для того чтобы точка $x = x_0$ являлась точкой максимального расширения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, а число $D(x_0)=f_2(x_0)-f_1(x_0)$ – максимальной шириной этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки x_0 слева функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была расширяющейся, а в некоторой окрестности точки x_0 справа она была сужающейся.

Теорема 17. Для того чтобы точка $x = x_0$ была точкой максимального сужения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, а число $d(x_0)=f_2(x_0)-f_1(x_0)$ минимальной шириной данной функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки x_0 слева функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была сужающейся, а в некоторой окрестности точки x_0 справа она была расширяющейся.

Доказательства теорем 16, 17 вытекают прямо из определений 8, 9 точек максимального расширения и сужения интервальной функции.

Анализ поведения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, как показывает изложенный в этом параграфе материал, всегда сводится к анализу поведения двух обычных детерминированных функций: нижней $f_1(x)$ и верхней $f_2(x)$ граничных функций функции $\tilde{f}(x)$. Это позволяет нам использовать для анализа поведения интервальных функций хорошо известные и разработанные методы анализа поведения обычных (детерминированных) функций, основанные на применении классического дифференциального исчисления [1]. При этом алгоритм анализа поведения произвольной интервальной функции может быть описан следующим образом.

Шаг 1. Проверка формы, в которой представлена интервальная функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, подлежащая анализу. Если она неразделенная, т.е. не имеющая вид интервала $\tilde{y}=[y_1, y_2]=[f_1(x), f_2(x)]$, где $y_1=f_1(x)$ и $y_2=f_2(x)$ – соответственно нижняя и верхняя граничные функции заданной интервальной функции, то выполняем переход к шагу 2. Если она разделенная, т.е. имеющая указанный вид, то переход к шагу 3.

Шаг 2. Приведение функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ из неразделенного вида к разделенному с помощью основных формул интервальной математики (7) (см. пример 1).

Шаг 3. Анализ поведения нижней граничной функции $y_1=f_1(x)$ нашей интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ с помощью известных методов анализа поведения обычных (детерминированных) функций, на основе классического дифференциального исчисления. В ходе анализа устанавливаем интервалы возрастания и убывания функции f_1 и точки ее максимумов и минимумов.

Шаг 4. Анализ поведения верхней граничной функции $y_2=f_2(x)$ той же самой интервальной функции. Он выполняется теми же методами и по той же программе, что и предыдущий шаг.

Шаг 5. Составление сводной таблицы поведения граничных функций $y_1=f_1(x)$, $y_2=f_2(x)$ путем заполнения в ней первых трех строк (табл. 1), в соответствии с результатом анализа поведения функций $f_1(x)$ и $f_2(x)$ (шаги 3, 4).

Шаг 6. Анализ сводной таблицы с помощью теорем 9–15, позволяющих идентифицировать последовательные интервалы $(-\infty, x_1), (x_1, x_2), \dots, (x_{n-1}, x_n), (x_n, \infty)$ в ней как интервалы возрастания, убывания, расширения или сужения анализируемой интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, а промежуточные точки x_1, x_2, \dots, x_n между интервалами как точки максимума (минимума) или точки максимума (минимума) ее расширения или сужения. Например, если на некотором интервале (x_i, x_{i+1}) функция $f_2(x)$ возрастает, а на соседнем интервале (x_{i+1}, x_{i+2}) убывает, так что в точке x_{i+1} она максимальна, и при этом функция $f_1(x)$ на обоих интервалах постоянная, то согласно теоремам 9, 10, 12 интервальная функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ на интервале (x_i, x_{i+1}) возрастает, в точке x_{i+1} достигает максимума, затем на интервале (x_{i+1}, x_{i+2}) убывает.

После выполнения шага 6 заполняется четвертая строка сводной таблицы поведения и на этом анализ поведения заданной интервальной функции заканчивается.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Характерный возможный вид четвертой строки сводной таблицы поведения интервальной функции проиллюстрирован в табл. 1.

По результатам анализа можно вычертить график функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ (рис. 1).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема анализа поведения неположительно определенных функций существенно отличается от аналогичной проблемы для полностью определенных функций, что связано с известным отличием проблемы сравнения неположительно определенных (в рассматриваемом случае – интервальных) чисел от проблемы сравнения полностью определенных чисел.

Вследствие этих отличий для анализа поведения полностью определенных функций имеются простые и ясные методики, основанные на использовании дифференциального исчисления, позволяющие разбить область определения любой функции на подобласти, в которых

Таблица 1 – Фрагмент сводной таблицы поведения интервальной функции

y	$(-\infty, x_1)$	x_1	(x_1, x_2)	x_2	(x_2, x_3)	x_3	(x_3, x_4)	...	(x_{n-1}, x_n)	x_n	(x_n, ∞)
$y_1 = f_1(x)$	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	...	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная
$y_2 = f_2(x)$	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная	...	монотонная	возможный экстремум f_1 или f_2	монотонная
$\tilde{y} = \tilde{f}(x)$	возрастание	максимум	убывание	минимум	расширение	максимальное расширение	сужение	...	сужение	максимальное сужение	расширение

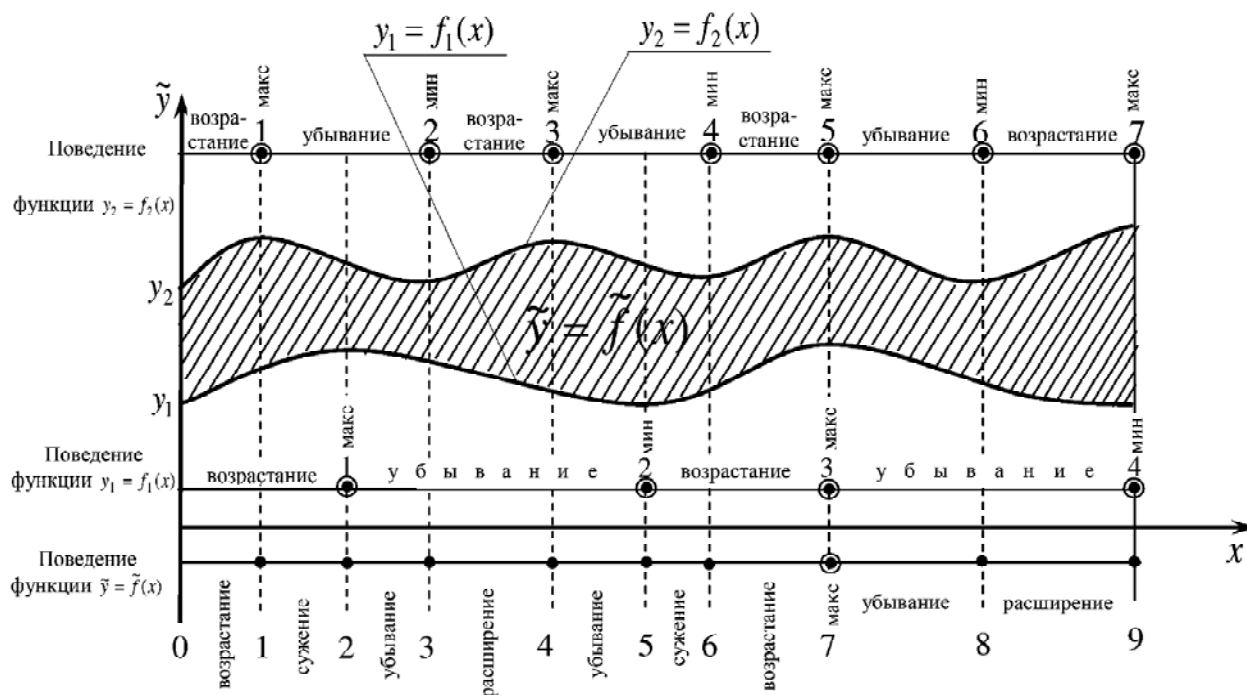


Рисунок 1 – Пример интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ ($y_1 = f_1(x)$ – нижняя граничная функция, $y_2 = f_2(x)$ – верхняя граничная функция)

функция изменяется монотонно: возрастает или убывает, в то время как анализ поведения неполностью определенной – интервальной – функции оказывается более сложным.

Этот анализ, как показано в статье, базируется на сравнении интервалов путем сравнения их границ и далее сводится к анализу поведения двух полностью определенных функций, являющихся нижней и верхней граничными функциями исходной интервальной функции.

Такой анализ позволяет разбить область определения произвольной неполностью определенной (интервальной) функции на подобласти, в которых интервал возможных значений функции изменяется одним из четырех способов: монотонно возрастает, монотонно убывает, монотонно расширяется, монотонно сужается.

При этом, если первые два способа поведения недетерминированной (интервальной) функции аналогичны соответствующим способам поведения полностью определенной (детерминированной) функции, то третий и четвертый способы поведения интервальной функции являются принципиально новыми и невозможны у полностью определенных функций. Последние два способа

поведения интервальной функции возникают вследствие появления у функции подобластей, в которых различные значения этой функции несравнимы и потому стандартное поведение функции – возрастание или убывание – оказывается невозможным. Конечно, два указанных нестандартных способа поведения интервальной функции являются следствием недостатка информации об этой функции, проявляющемся в ее неточном, интервальном задании.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье сформулирована и рассмотрена задача вычисления и анализа поведения неполностью определенной функции, заданной с точностью до интервала значений.

В качестве математического аппарата использованы интервальная алгебра и дифференциальные характеристики верхней и нижней границ интервальных функций, которые можно рассматривать как специальное дифференциальное исчисление для неточно задаваемых функций интервального типа.

Разработаны систематические методы решения задач расчета и анализа поведения недетерминированных фун-

кий інтервального типу, в яких функції визначаються з точністю до інтервала можливих значень.

Представлено алгоритм детермінізації, який дозволяє звести розв'язувану задачу до двох аналогічних – для верхньої і нижньої граничних функцій вихідної невідомою визначеної функції.

Виділено різні типи можливого поведіння інтервальних функцій (постійність, зростання, зменшення, розширення, звуження) і різні типи екстремальних точок таких функцій (наприклад, точка максимуму, точка мінімуму, точка максимального розширення, точка мінімального звуження).

Доказано теореми, які дозволяють визначати ділянки різного поведіння інтервальних функцій і точки з різними видами екстремума.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фихтенгольц Г. М. Курс диференціального і інтегрального числення. Т. 1 / Г. М. Фихтенгольц. – М.: Физматлит, 2001. – 616 с.
2. Левин В. И. Интервальная производная и начала недетерминистского дифференциального исчисления / В. И. Левин // Онтология проектирования. – 2013. – № 4. – С. 72–84.
3. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series / N. Wiener. – N.Y.: Technology Press and Wiley, 1949. – 180 p. (раскритиченный отчет 1942 года).
4. Колмогоров А. Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных случайных последовательностей / А. Н. Колмогоров // Известия АН СССР. Математика. – 1941. – № 5. – С. 3–14.
5. Налимов В. В. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
6. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1971. – 320 с.
7. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 176 с.
8. Нариньяни А. С. Недоопределенность в системе представления и обработки знаний / А. С. Нариньяни // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. – 1986. – № 5. – С. 17–25.
9. Hyyonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach / E. Hyyonen // Artificial Intelligence. – 1992. Vol. 58. – P. 19.
10. Moore R. E. Interval Analysis / R. E. Moore. – N. Y.: Prentice-Hall, 1966. – 230 p.
11. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер. – М.: Мир, 1987. – 360 с.
12. Канторович Л. В. О некоторых новых подходах к вычислительным методам и обработке наблюдений / Л. В. Канторович // Сибирский математический журнал. – 1962. Т. 3, № 5.
13. Вошинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров. – М.: МЭИ-Техника, 1989. – 226 с.
14. Вошинин А. П. Интервальный анализ данных / А. П. Вошинин, А. Ф. Бочков, Г. Р. Сотиров // Заводская лаборатория. – 1990. – № 7. – С. 76–81.
15. Куржанский А. Б. Задача идентификации – теория гарантированных оценок / А. Б. Куржанский // Автоматика и телемеханика. – 1991. – № 4. – С. 75–89.
16. Вошинин А. П. Интервальный метод калибровки / А. П. Вошинин // Датчики и системы. – 2000. – № 7. – С. 63–69.
17. Милн В. Э. Численный анализ / В. Э. Милн. – М.: Издательство иностранной литературы, 1980. – 350 с.
18. Левин В. И. Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности / В. И. Левин. – Пенза: Изд-во Пензенского технологического ин-та, 1999. – 101 с.
19. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Автоматика и вычислительная техника. – 2012. – № 4. – С. 157–163.
20. Tsoukias A. A Characterization of PQI Interval Orders / A. Tsoukias, P. Vincke // Discrete Applied Mathematics. – 2003. – № 127 (2). – P. 387–397.
21. Ozturk M. Positive and Negative Reasons in the Interval Comparisons: Valued PQI Interval Orders / M. Ozturk, A. Tsoukias // Proceedings of the 10th Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU-2004), Perugia, Italy, July 4–9, 2004. – P. 983–989.
22. Давыдов Д. В. Идентификация параметров линейных интервальных управляемых систем с интервальным наблюдением / Д. В. Давыдов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2008. – № 6. – С. 25–29.
23. Пивяский С. А. Простой и универсальный метод принятия решений в пространстве критериев «стоимость-эффективность» / С. А. Пивяский // Онтология проектирования. – 2014. – № 3. – С. 89–102.
24. Боргест Н. М. Ключевые термины онтологии проектирования / Н. М. Боргест // Онтология проектирования. – 2013. – № 3. – С. 9–31.

Статья поступила в редакцию 10.01.2016.

После доработки 25.01.2013.

Левин В. И.

Д-р техн. наук, профессор, провідний науковий співробітник Пензенського державного технологічного університету, Пенза, Росія

РОЗРАХУНОК І АНАЛІЗ ПОВОДЖЕННЯ НЕЦІЛКОМ ВИЗНАЧЕНИХ ФУНКЦІЙ МЕТОДОМ ДЕТЕРМІНІЗАЦІЇ

Розглянуто існуючі підходи до розрахунку, аналізу, синтезу й оптимізації систем в умовах невизначеності. Дослідження невизначених систем формулюється у вигляді задач розрахунку, аналізу і синтезу різних функцій з недетермінованими параметрами, що слугують відповідними характеристиками даних систем. Усі ці задачі є значно складнішими за їхніх детермінованих аналогів, що приходить вирішувати при дослідженні систем з детермінованими (точно відомими) параметрами. Таке ускладнення пов'язане з тим, що алгебра недетермінованих чисел є складнішою алгебри детермінованих чисел. У статті сформульована і докладно описана задача обчислення й аналізу поведінки нецілком визначеної функції, заданої з точністю до інтервалу значень. Для вирішення зазначеної задачі запропонований алгоритм детермінізації, що дозволяє звести задачу до двох аналогічних – для верхньої і нижньої граничних функцій вихідної нецілком визначеної функції. У цьому алгоритмі автором використаний апарат інтервальної математики та інтервально-диференційного числення. Далі виділені різні типи можливого поведіння інтервальних функцій (сталість, зростання, зменшення, розширення, звуження) і різні типи екстремальних точок таких функцій (наприклад, точка максимуму, точка мінімуму, точка максимального розширення, точка мінімального звуження). Доведено теореми, що дозволяють визначати ділянки різного поведіння інтервальних функцій і точки з різними видами екстремума. Докладно розглянута робота запропонованого алгоритму детермінізації, що дозволяє аналізувати поведінку інтервальних функцій. Робота проілюстрована на конкретному прикладі.

Ключові слова: оптимізація, детермінована функція, інтервальна функція, аналіз поведінки функцій, невизначеність.

Levin V. I.

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

CALCULATION AND ANALYSIS OF INCOMPLETELY DEFINED FUNCTIONS BY DETERMINATION METHOD

This article reviews current approaches to the calculation, analysis, synthesis and optimization under uncertainty. Studying uncertain systems is formulated as problems of the calculation, analysis and synthesis of various non-deterministic functions with parameters that serve as the relevant characteristics of these systems. All these problems are much more difficult their deterministic counterparts which should be solved in the study of systems with deterministic (exactly known) parameters. Complexity is due to the fact that the non-deterministic algebra is more complicated than algebra of deterministic numbers. The article stated and described in detail the problem of calculating and analyzing the behavior of a function which is given up to a range of values. To solve this problem, the algorithm of determination is presented. This algorithm reduces the problem to the two same – for the lower and upper boundary functions of the original incompletely defined function. In this algorithm author uses interval mathematics and interval-differential calculus. The different types of possible behavior of interval functions are highlighted (consistency, increase, decrease, expansion, contraction) and various types of extreme points of such functions (for example, the maximum point, a minimum point, the point of maximum expansion, the point of minimum extension) are shown. Theorems that allow you to define areas of different behavior of interval functions and points with different types of extreme are proved. The work of the proposed algorithm of determination for analyzing the behavior of interval functions is considered in detail. Operation of algorithm is illustrated by concrete example.

Keywords: optimization, deterministic function, non-deterministic function, uncertainty, analysis of behavior of function, uncertainty.

REFERENCES

1. Fih tengolc G.M. Kurs differencialnogo i integralnogo ischisleniya. V. 1. Moscow, Fizmatlit, 2001, 616 p.
2. Levin V.I. Intervalnaya proizvodnaya i nachala nedeterministkogo differencialnogo ischisleniya, *Ontologiya proektirovaniya*, 2013, No. 4, pp. 72–84.
3. Wiener N. Extrapolation, Interpolation and Smoothing of Stationary Time Series. N.Y., Technology Press and Wiley, 1949, 180 p. (expired report of 1942 year).
4. Kolmogorov A. N. Interpolirovanie i extrapolirovanie stacionarnykh sluchaynykh posledovatelnostey, *Izvestiya AN SSSR: Seriya Matematicheskaya*, 1941, No. 5, pp. 3–14.
5. Nalimov V. V., Chernova N. A. Statisticheskie metody planirovaniya ekstremalnykh eksperimentov. Moscow, Nauka, 1965, 340 p.
6. Nalimov V. V., Chernova N. A. Teoriya experimenta. Moscow, Nauka, 1971, 320 p.
7. Zadeh L. A. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning, *Information Sciences*, 1975, No. 8; 9, pp. 199–249, 301–357; 43–80.
8. Narinyani A. S. Nedoopredelennost v sisteme predstavleniya i obrabotki znaniy, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 1986. Vol. 24, No. 5, pp. 17–25.
9. Hyvonen E. Constraint Reasoning Based on Interval Arithmetic: the Tolerance Propagation Approach, *Artificial Intelligence*, 1992, Vol. 58, pp. 19.
10. Moore R.E. Interval Analysis. N. Y., Prentice-Hall, 1966, 230 p.
11. Alefeld G., Herzberger J. Introduction to Interval Computation. N.Y., Academic Press, 1983, 352 p.
12. Kantorovich L.V. O nekotorykh novykh podhodakh k vychislitelnykh metodam i obrabotke nablyudeniy, *Siberian Mathematical Journal*, 1962, Vol. 3, No. 5.
13. Voschinin A.P. G.R. Sotirov. Optimizaciya v usloviyah neopredelennosti. Moscow, MEI-Tehnika, 1989, 226 p.
14. Voschinin A. P., Bochkov A. F., Sotirov G. R. Intervalniy analiz dannyh. Industrial Laboratory, 1990, Vol. 56, No. 7, pp. 76–81.
15. Kurzhanskii A.B. Identification Problem – Theory of Guaranteed Estimates, *Automation and Remote Control*, 1991, Vol. 52, No. 4, Part 1, pp. 447–465.
16. Voschinin A.P. Intervalniy metod kalibrovki, *Datchiki i Sistemy*, 2000, No. 7, pp. 63–69.
17. Milne W. E. Numerical Calculus. Princeton, University Press, 1949, 393 p.
18. Levin V. I. Intervalnye metody optimizacii system v usloviyah neopredelennosti. Penza, Penza Technological Institute Publishing, 1999, 95 p.
19. Levin V.I. Optimization in Terms of Interval Uncertainty: The Determinization Method, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, Vol. 46, No. 4, pp. 157–163.
20. Tsoukias A., Vincke P. A Characterization of PQI Interval Orders, *Discrete Applied Mathematics*, 2003, No. 127 (2), pp. 387–397.
21. Ozturk M., Tsoukias A. Positive and Negative Reasons in the Interval Comparisons: Valued PQI Interval Orders, *Proceedings of the 10th Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU-2004)*, Perugia, Italy, July 4–9, 2004, pp. 983–989.
22. Davydov D. V. Identification of Parameters of Linear Interval Controllable Systems with the Interval Observation, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2008, Vol. 47, No. 6, pp. 861–865.
23. Piyavskiy S. A. Prostoy i universalniy metod prinyatiya resheniy v prostranstve kriteriev “stoimost-effektivnost”, *Ontologiya proektirovaniya*, 2014, No. 3, pp. 89–102.
24. Borgest N. M. Klyucheveye terminy ontologii proektirovaniya, *Ontologiya proektirovaniya*, 2013, No. 3, pp. 9–31.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА СИНТЕЗА НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЕ

Решена задача разработки нелинейной модели, описывающей зависимости между характеристиками системы, в которой осуществляется синтез нейро-нечетких сетей, параметрами исследуемого метода и временем, затраченным системой на выполнение синтеза моделей. Объект исследования – процесс синтеза нейро-нечетких моделей для индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью. Предметом исследования является параллельная компьютерная система, выполняющая метод синтеза нейро-нечетких сетей. Цель работы заключается в повышении эффективности применения параллельных компьютерных систем для решения задач медицинского направления. Предложена нелинейная модель, позволяющая прогнозировать затраченное параллельной системой время на выполнение метода синтеза нейро-нечетких сетей и, таким образом, осуществлять рациональный выбор ресурсов компьютерной системы. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенную модель. Выполнены эксперименты, подтверждающие адекватность предложенной модели. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать применение разработанной модели на практике.

Ключевые слова: синтез модели, параллельная система, планирование ресурсов, нейронная сеть, среднеквадратичная ошибка.

НОМЕНКЛАТУРА

CPU – Central Processing Unit;

GPU – Graphical Processing Unit;

G – критерий качества сети;

N_χ – число возможных решений на этапе инициализации метода;

$R^{(i)}$ – множество решений на i -й итерации метода;

$G^{(i)}$ – множество значений целевой функции для решений $\chi_k^{(i)}$ на i -й итерации метода;

$R^{(i,j)}$ – j -е подмножество множества $R^{(i)}$;

$\chi_k^{(i)}$ – k -е решение во множестве $R^{(i)}$;

$G_k^{(i)}$ – значение целевой функции k -го решения множества $R^{(i)}$;

D – обучающая выборка;

X – множество входных признаков, описывающих время выполнения метода синтеза нейро-нечетких сетей в параллельной системе;

x_i – множество значений i -го признака в обучающей выборке D ;

x_{ij} – значение i -го признака для j -го экземпляра, соответствующее значению i -й характеристики j -го эксперимента;

N – количество экземпляров в выборке D ;

Y – множество значений выходного параметра;

x_1 – тип системы (0 – кластер CPU, 1 – GPU);

x_2 – число процессов, на которых выполняется метод;

x_3 – пропускная способность сети параллельной системы, Гб/с;

x_4 – число возможных решений, с которыми работает метод;

y – время, затраченное системой на синтез нейро-нечеткой сети, с;

x_{jn} – нормированное значение i -го признака j -го экземпляра;

x_{\min} и x_{\max} – соответственно, минимальное и максимальное значения i -го признака в обучающей выборке D ;

φ – аргумент функции активации, представляющий собой дискриминантную функцию;

w – матрица весовых коэффициентов;

x – множество аргументов дискриминантной функции;

w_0 – значение смещения функции $\varphi(w;x)$

$|x|$ – количество аргументов функции $\varphi(w;x)$

$\Psi_{(\mu,\rho)}$ – функция активации ρ -го нейрона μ -го слоя

$\Phi_{(\mu,\rho)}$ – дискриминантная функция ρ -го нейрона μ -го слоя.

ВВЕДЕНИЕ

Артериальная гипертония является распространенным заболеванием в Украине и в мире. При этом широкой причиной смертности является несвоевременное выявление заболевания, особенно среди жителей сельской местности [1]. Для предотвращения опасных последствий важно своевременно выявлять и прогнозировать развитие гипертонии для каждого пациента. Такое прогнозирование успешно выполняется при помощи соответствующих нейро-нечетких моделей [2–4].

Для учета динамики изменения состояния здоровья пациента необходимо с течением времени синтезировать новые модели на основе увеличения выборки наблюдений за показателями заболевания. Это требует больших затрат временных и вычислительных ресурсов. Поэтому в данной сфере нашли применение методы параллельных вычислений [5], которые реализуются при помощи кластеров вычислительных узлов [6] и графических процессоров CUDA [7]. Поскольку использование кластерных ресурсов является дорогостоящим, то важно рационально планировать выбор вычислительных ресурсов для достижения желаемой производительности.

Целью данной работы является повышение эффективности применения параллельных компьютерных систем

для синтеза нейро-нечетких сетей и решения задачи индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим метод синтеза нейро-нечетких сетей для прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью [2]. Пусть имеем выборку $D = \langle X, Y \rangle$ данных о состоянии здоровья пациентов, полученную в г. Запорожье. Задача синтеза нейро-нечеткой модели заключается в идентификации ее параметров таким образом, чтобы обеспечивалось приемлемое значение критерия качества G , например, значения среднеквадратичной ошибки. На рис. 1 показан граф параметрического синтеза нейро-нечетких моделей в ярусно-параллельной форме [2]. Как видно, процесс параметрического синте-

за нейро-нечетких моделей начинается с этапа инициализации, на котором создается начальное множество решений $R^{(0)} = \{\chi_1^{(0)}, \chi_2^{(0)}, \dots, \chi_{N_\chi}^{(0)}\}$, затем это множество разбивается на подмножества $R^{(0,j)}$, каждое из которых оценивается на отдельном процессе параллельной системы. В ходе работы метода поиск решений происходит с помощью стохастического подхода, используя операторы отбора, скрещивания и мутации. При этом элементы подмножества $R^{(i,j)}$ обрабатываются на j -м процессе параллельной системы. Каждая итерация случайного поиска $RS(R^{(i)})$, продемонстрированная в виде графа на рис. 2 [2], требует существенных вычислительных затрат и поэтому распараллеливается по процессам компьютерной системы. Основным параметром метода, влия-

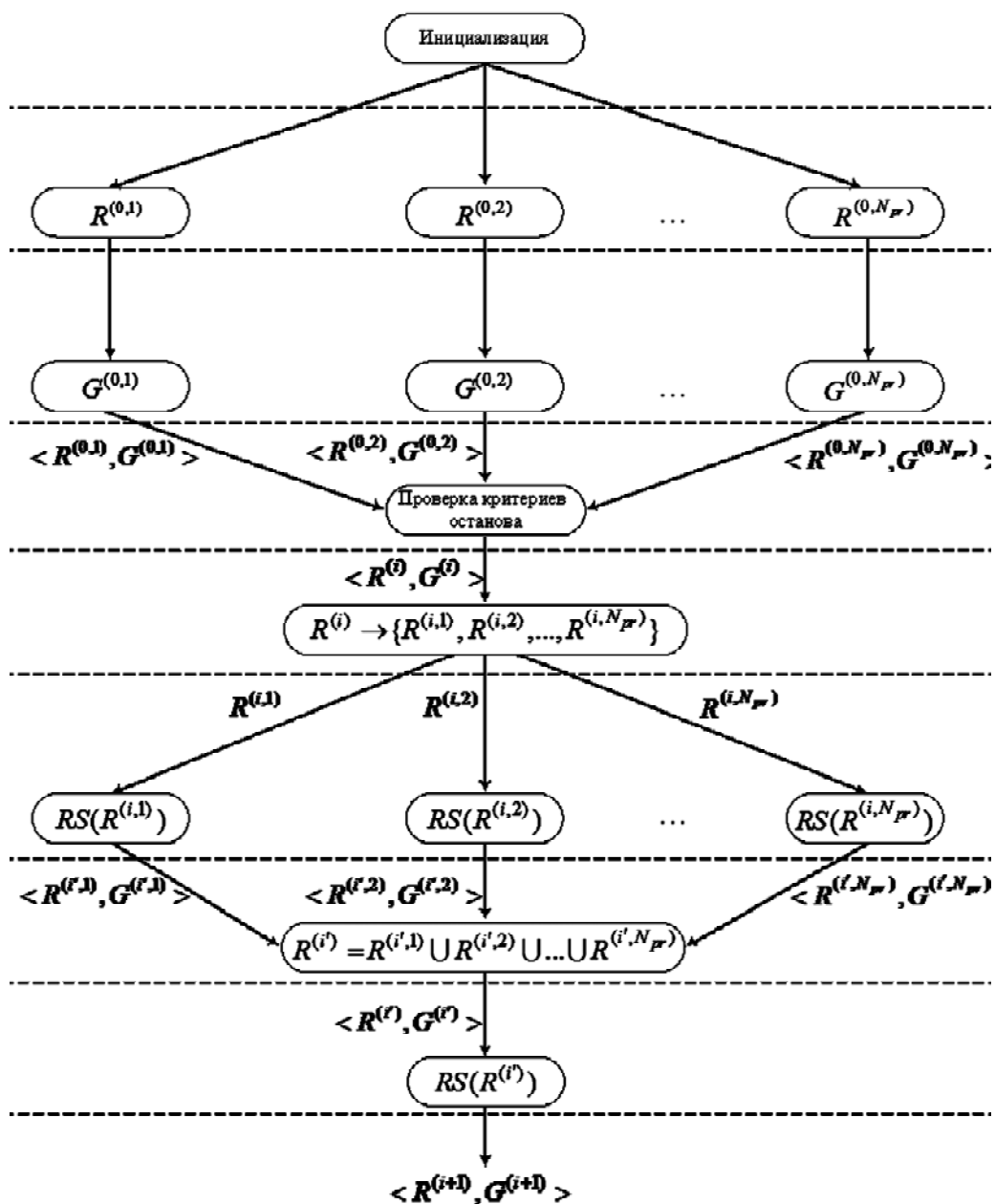


Рисунок 1 – Граф параметрического синтеза нейро-нечетких моделей в ярусно-параллельной форме

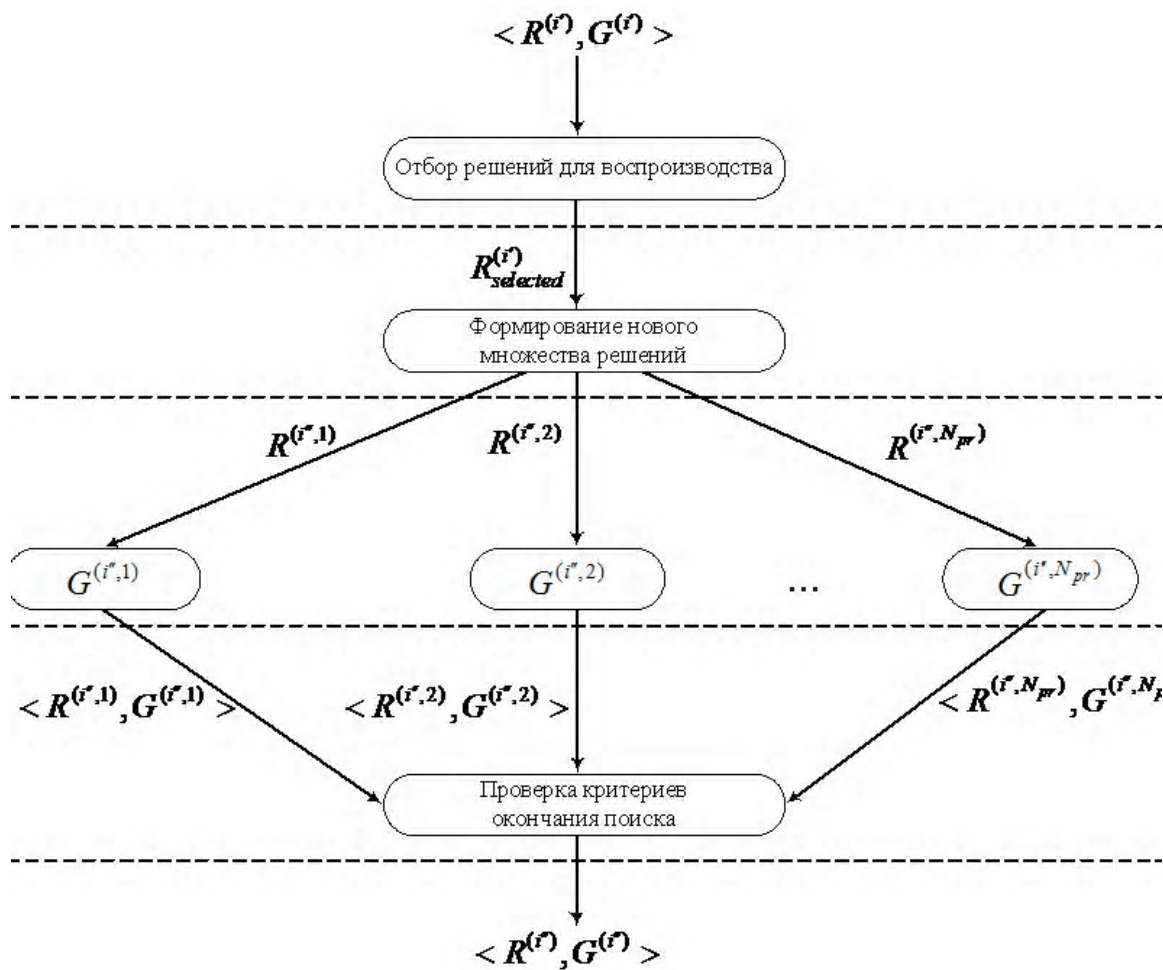


Рисунок 2 – Граф одной итерации случайного поиска

яющим как на точность синтезированных моделей, так и на время, затрачиваемое параллельной системой на выполнение метода, является число возможных решений N_{χ} на этапе инициализации метода. Чем больше значение N_{χ} , тем больше вычислительного времени требуется системе, но и тем выше точность синтезированных системой моделей.

В данной работе ставится задача экспериментально исследовать рассмотренный метод в параллельной компьютерной системе и разработать нелинейную модель, описывающую зависимости между характеристиками системы, в которой осуществляется синтез нейро-нечетких сетей, а так же параметрами исследуемого метода и временем, затраченным системой на выполнение синтеза моделей. Это позволит рассчитывать время, необходимое компьютерной системе для индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью, и таким образом, рационально планировать выбор ресурсов компьютерной системы для достижения желаемой производительности.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Планирование ресурсов компьютерных систем выполняется на основе специфики параметров решаемых задач и характеристик компьютерных систем. Основным мето-

дом, при помощи которого можно выполнить такое планирование, является моделирование поведения компьютерной системы в решении определенной задачи [8–10].

Методы регрессионного и имитационного моделирования позволяют с приемлемой точностью строить модели планирования ресурсов компьютерных систем, в которых между параметрами такой модели существует хорошая линейная корреляционная зависимость [11]. При отсутствии такой зависимости существенно снижается точность модели, поэтому предпочтительнее применять метод нейросетевого моделирования [12], позволяющий описать нелинейные зависимости между характеристиками компьютерной системы, параметрами задачи, решаемой в такой системе, и временем, затраченным на решение задачи.

Известный инструментарий GridSim [13], применяемый для моделирования поведения компьютерных систем, в процессе построения модели требует ввести оценочные значения временных затрат на выполнения каждого элемента решаемой задачи. В задаче индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью такие значения отсутствуют для отдельно взятой компьютерной системы, поэтому в данной работе разработано собственное программное обеспечение, на основе которого применен метод нейросетевого моделирования.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными характеристиками параллельной системы, влияющими на время выполнения метода синтеза нейро-нечетких сетей, являются тип системы (кластер CPU или GPU), число процессов, на которых выполняется задача, и пропускная способность сети. Число возможных решений N_χ как параметр исследуемого метода так же оказывает существенное влияние на затраченное системой время. Рассмотренный метод был применен на кластере CPU и на GPU, в результате чего была сформирована обучающая выборка (1), содержащая, 174 результата выполнения метода, каждый из которых характеризовался четырьмя признаками:

$$D = \langle X, Y \rangle, \quad (1)$$

где $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN}\}$, $N=174$, $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$.

В результате обучающая выборка представляла собой таблицу чисел, состоящую из 174 строк и пяти столбцов, содержащих значения четырех входных признаков и одного выходного для каждого случая применения рассмотренного метода в параллельной системе. Фрагмент обучающей выборки приведен в табл. 1.

Для исключения влияния различного порядка значений признаков на синтезируемую модель выполнялось нормирование признаков, т.е. приведение диапазона их значений к единому интервалу $x_{in} \in [0;1]$ по формуле (2):

$$x_{ijn} = \frac{x_{ij} - x_{i \min}}{x_{i \max} - x_{i \min}}, \quad (2)$$

где $i = \overline{1;4}$, $j = \overline{1;174}$.

Моделирование решения задачи индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью в параллельной системе осуществлялось на основе построенной обучающей выборки с помощью трехслойного персептрона [14, 15], первый слой которого содержал четыре нейрона, второй слой – три нейрона, третий слой – один нейрон. Все нейроны имели сигмоидную функцию активации (3):

$$\psi(\varphi) = \frac{1}{1 + e^{-\varphi}}, \quad (3)$$

где $\varphi = \varphi(w; x)$.

Таблица 1 – Фрагмент обучающей выборки

Номер эксперимента	Значения признаков				Y
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	0	1	20	50	101,18
2	0	2	20	50	57,67
3	0	3	20	50	40,02
4	0	4	20	50	30,61
5	0	5	20	50	26,23
6	0	6	20	50	23,17
7	0	7	20	50	21,09
8	0	8	20	50	18,09
9	0	9	20	50	16,84
10	0	10	20	50	15,79
...
174	1	260	64	100	62,81

При синтезе нейромодели в качестве дискриминантной функции [16] использовалась взвешенная сумма (4):

$$\varphi(w; x) = w_0 + \sum_{i=1}^{|x|} w_i x_i, \quad (4)$$

где w_i определяет вес i -го входного параметра x_i в функции $\varphi(w; x)$.

Таким образом, структура синтезируемой трехслойной нейромодели Y_{NN} может быть представлена следующим образом (5):

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)}(\varphi_{(3,1)}(w_{(3,1)}; \psi_{(2)})); \\ \psi_{(2)} = \{\psi_{(2,1)}; \psi_{(2,2)}; \psi_{(2,3)}\}; \\ \psi_{(2,k)} = \psi_{(2,k)}(\varphi_{(2,k)}(w_{(2,k)}; \psi_{(1)})), k = 1,2,3; \\ \psi_{(1)} = \{\psi_{(1,1)}; \psi_{(1,2)}; \psi_{(1,3)}; \psi_{(1,4)}\}; \\ \psi_{(1,l)} = \psi_{(1,l)}(\varphi_{(1,l)}(w_{(1,l)}; X)), l = 1,2,3,4. \end{cases} \quad (5)$$

Для построения нейромодели и определения значений ее параметров (весовых коэффициентов и смещений каждого нейрона) на ее входы подавались значения пронормированных признаков, на выход – значение времени выполнения метода синтеза нейро-нечетких сетей в параллельной системе. В качестве целевой функции при обучении нейромодели использовался минимум среднеквадратичной ошибки.

Обучение нейронной сети выполнялось на основе метода обратного распространения ошибки [17]. Приемлемым считалось достижение среднеквадратичной ошибки, не превышающей 10^{-4} . Фрагмент матрицы весовых коэффициентов w построенной модели приведен в табл. 2.

После подстановки значений весовых коэффициентов и смещений в (5) с учетом функции активации (3) и дискриминантной функции (4) получаем математическое описание синтезированной нейросетевой модели (6), описывающей зависимости между характеристиками системы, в которой осуществляется синтез нейро-нечетких сетей, параметрами исследуемого метода и временем, затраченным системой на выполнение синтеза сетей. Графическая интерпретация синтезированной нейромодели приведена на рис. 3.

$$\begin{cases} Y_{NN} = \psi_{(3,1)} \left(1 + e^{-(-2,873 + 5,42\psi_{(2,1)} - 10,94\psi_{(2,2)} + 28,35\psi_{(2,3)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(2,1)} = \left(1 + e^{-(-8,65 - 5,2\psi_{(1,1)} - 4,17\psi_{(1,2)} - 4,95\psi_{(1,3)} - 1,74\psi_{(1,4)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(2,2)} = \left(1 + e^{-(-0,43 - 3,63\psi_{(1,1)} + 1,57\psi_{(1,2)} - 4,44\psi_{(1,3)} - 2,46\psi_{(1,4)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(2,3)} = \left(1 + e^{-(-5,37 - 9,56\psi_{(1,1)} - 24,6\psi_{(1,2)} + 2,94\psi_{(1,3)} + 33,79\psi_{(1,4)})} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,1)} = \left(1 + e^{-(-2,38 + 7,7x_1 - 5,1x_2 + 2,2x_3 - 6,85x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,2)} = \left(1 + e^{-(-6,22 - 5,06x_1 + 22,21x_2 + 18,14x_3 + 6,49x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,3)} = \left(1 + e^{-(-10,35 - 0,07x_1 + 11,12x_2 - 1,84x_3 + 9,29x_4)} \right)^{-1}; \\ \psi_{(1,4)} = \left(1 + e^{-(-2,07 + 5,13x_1 - 35,66x_2 + 4,49x_3 + 2,06x_4)} \right)^{-1}. \end{cases} \quad (6)$$

Таблица 2 – Фрагмент матрицы весовых коэффициентов w

Номер слоя, μ	Номер нейрона в слое, ρ	Значение смещения w_0	Связи (соединения)	
			узел, от которого идет соединение	значение весового коэффициента
1	1	-2,38	признак x_1	7,7
			признак x_2	-5,1
			признак x_3	2,2
			признак x_4	-6,85
	2	-6,22	признак x_1	-5,06
			признак x_2	22,21
			признак x_3	18,14
			признак x_4	6,49
	3	-10,35	признак x_1	-0,07
			признак x_2	11,12
			признак x_3	-1,84
			признак x_4	9,29
	4	-2,07	признак x_1	5,13
			признак x_2	-35,66
			признак x_3	4,49
			признак x_4	2,06
...
3	1	-2,873	нейрон (2, 1)	5,54
			нейрон (2, 2)	-10,94
			нейрон (2, 3)	28,35

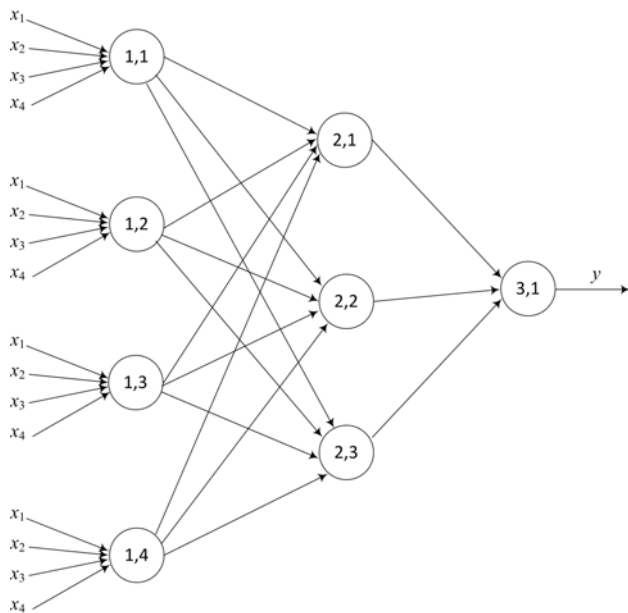


Рисунок 3 – Синтезированная нейросетевая модель

Таким образом, построенная нейросетевая модель представляет собой иерархическую структуру, содержащую нейроны, и позволяет рассчитывать время, необходимое компьютерной системе для индивидуального прогнозирования состояния больного гипертонической болезнью. При этом значение среднеквадратичной ошибки модели составило $2,95 \cdot 10^{-5}$, что является приемлемым для подобного рода задач, решаемых при помощи синтезированной модели.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для выполнения экспериментального исследования рассмотренного метода и предложенной нейросетевой модели использованы следующие компьютерные системы:

- кластер Института проблем моделирования в энергетике имени Г.Е. Пухова НАН Украины (ИПМЭ) г. Киев: процессоры Intel Xeon 5405, оперативная память – 4×2 Гб DDR-2 на каждый узел, коммуникационная среда InfiniBand 20Гб/с, middleware Torque и OMPI;

- кластер Запорожского национального технического университета (ЗНТУ) г. Запорожье: процессоры Intel E3200, оперативная память 1 Гб DDR-2 на каждый узел, коммуникационная среда Gigabit Ethernet 1 Гб/с, middleware Torque и MPICH;

- GPU NVIDIA GTX 285+ 240 ядер CUDA;
- GPU NVIDIA GTX 960 1024 ядра CUDA.

В экспериментах число процессов x_2 , на которых выполнялся метод, варьировалось от 1 до 32 для кластеров и от 60 до 260 для GPU. Пропускная способность сети x_3 – от 1 до 20 Гб/с, число возможных решений на этапе инициализации метода N_χ – от 50 до 100. Для проведения экспериментов было разработано программное обеспечение на языке Си с применением библиотеки MPI [18].

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты экспериментов на кластерах ЗНТУ ($N_\chi=50$) и ИПМЭ ($N_\chi=100$) приведены на рис. 4 и рис. 5, соответственно. Рис. 6 демонстрирует экспериментальную проверку предложенной модели на GPU NVIDIA GTX 285+, при этом $N_\chi=50$. Рис. 7 демонстрирует результаты экспериментов на GPU NVIDIA GTX 960 с $N_\chi=100$. Сплошной линией показано время, фактически затраченное системой на выполнение метода синтеза нейро-нечетких сетей, а пунктирной линией – расчетное время при помощи предложенной модели.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Тестовая выборка, состоящая из результатов 53х экспериментов, включала экземпляры решений задачи в параллельной системе, не входящие в обучающую выборку. При проведении экспериментов на более производительном оборудовании число возможных решений задавалось $N_\chi=100$, а на более слабом – $N_\chi=50$. Это было сделано для соблюдения адекватности сложности решаемых задач используемым ресурсам.

Как видно из рис. 4–7, время решения задачи на кластере и на GPU, рассчитанное при помощи предложенной модели, почти всегда несколько меньше, чем фактическое время. Это можно объяснить тем, что время, затраченное на синхронизацию и на пересылки данных между процессами кластера и между потоками GPU, значительно варьируется в зависимости от применяемой среды передачи данных и от числа возможных решений N_χ на этапе инициализации рассмотренного метода. При этом, чем больше задействовано процессов кластера или потоков GPU, тем существеннее влияние синхронизаций и пересылок и тем больше отклонение между фактическим и предсказанным временем решения задачи.

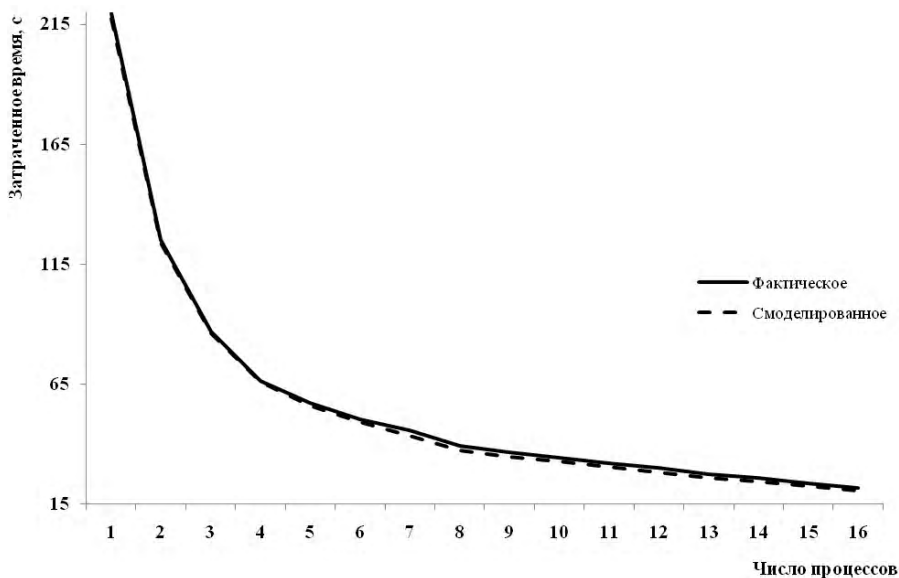


Рисунок 4 – Результаты экспериментов на кластере ИПМЭ ($N_{\chi}=100$)

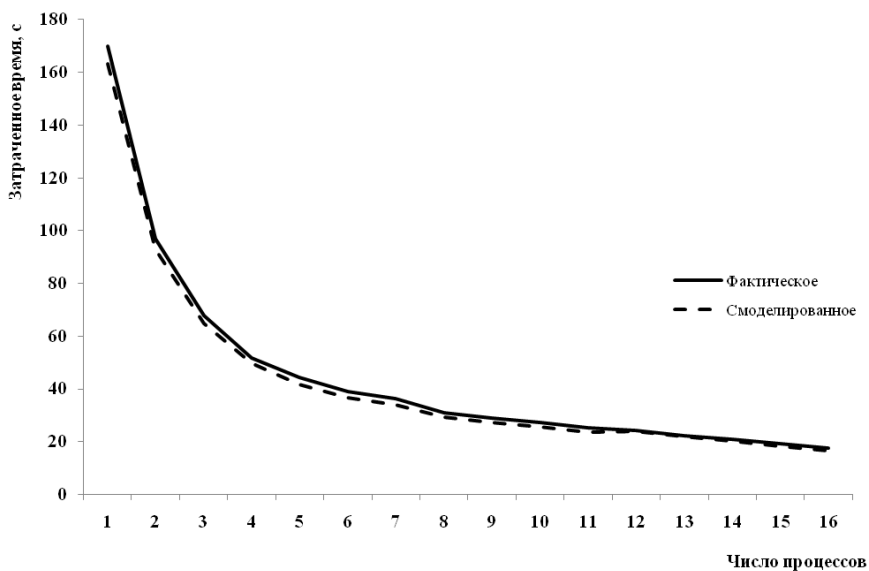


Рисунок 5 – Результаты экспериментов на кластере ЗНТУ ($N_{\chi}=50$)

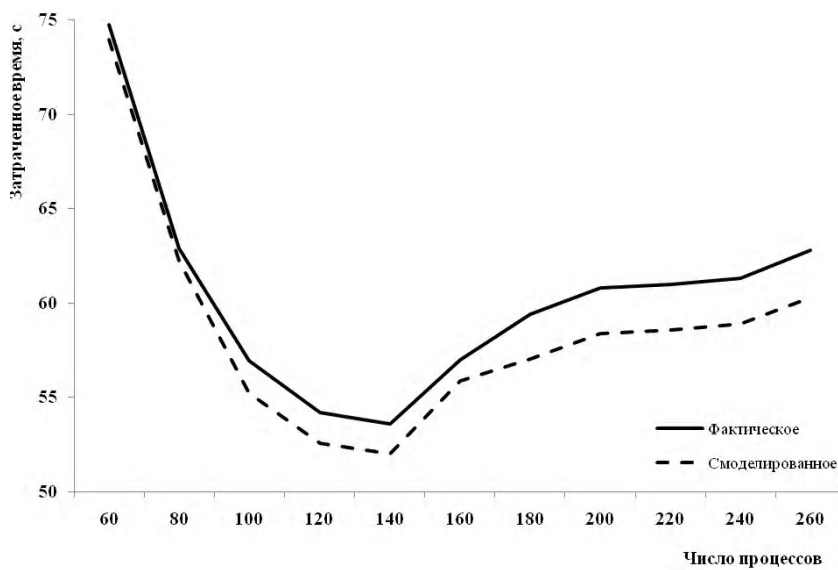


Рисунок 6 – Результаты экспериментов на GPU NVIDIA GTX 960 ($N_{\chi}=100$)

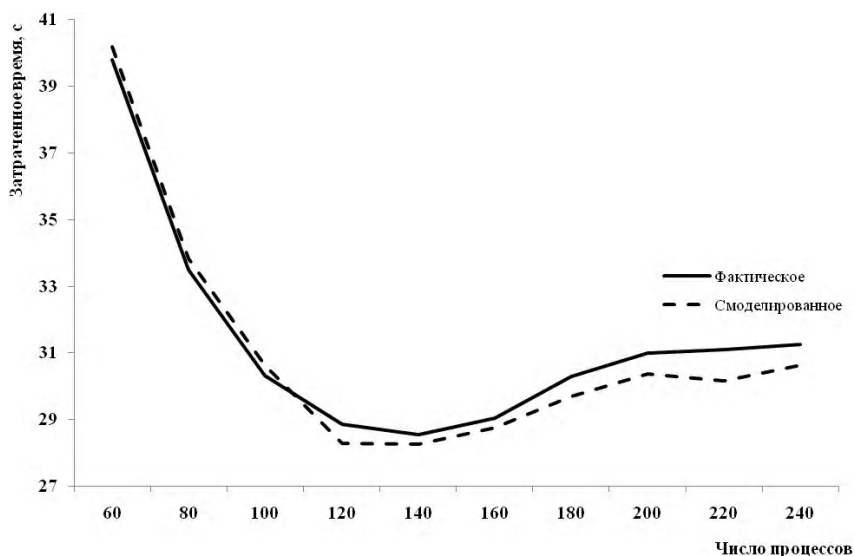


Рисунок 7 – Результати експериментів на GPU NVIDIA GTX 285+ ($N_{\chi}=50$)

Значення середньоквадратичної помилки на тестовій вибірці складало $7,61 \times 10^{-4}$, що на порядок краще, ніж на навчаючій вибірці, але залишається в межах прийнятних значень і дозволяє рекомендувати запропоновану модель на практиці для раціонального вибору ресурсів комп'ютерної системи в розв'язанні задачі індивідуального прогнозування стану великої гіпертонічної хвороби.

ВИВОДИ

В роботі підвищена ефективність застосування паралельних комп'ютерних систем для синтезу нейро-нечітких мереж і розв'язання задачі індивідуального прогнозування стану великої гіпертонічної хвороби.

Наукова новизна полягає в тому, що запропонована нейро-мережева модель, яка враховує тип комп'ютерної системи, кількість процесорів, на яких виконується задача, пропускну здатність мережі передачі даних і кількість можливих рішень на етапі ініціалізації методу. Модель дає можливість прогнозувати витрачене паралельною системою час на виконання методу синтезу нейро-нечітких мереж.

Практична цінність отриманих результатів полягає в розробленому програмному забезпеченні, яке реалізує запропоновану модель і дозволяє раціонально планувати вибір ресурсів комп'ютерної системи для розв'язання розглянутої задачі.

БЛАГОДАРНОСТІ

Робота виконана в межах науково-дослідницької роботи «Дослідження і розробка методів підвищення ефективності комп'ютерних систем та мереж, пошук шляхів удосконалення навчального процесу» кафедри комп'ютерних систем і мереж Запорізького національного технічного університету. Вибірка для проведення експериментального дослідження на кластері надана професором Запорізького національного технічного університету С. А. Субботиним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лашкул З. В. Особливості епідеміології артеріальної гіпертензії та її ускладнень на регіональному рівні з 1999 по 2013 роки / З. В. Лашкул // Сучасні медичні технології. – 2014, № 2. – С. 134–141.
2. Sergey Subbotin Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence / Sergey Subbotin, Andrii Oliinyk, Stepan Skrupsky – Information and Digital Technologies 2015 ISBN 978-1-4673-7185-8, 7–9 July 2015, Zilina, Slovakia. – P. 336–344

3. Oliinyk A. O. Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search / Andrii Oliinyk, Stepan Skrupsky, Sergey Subbotin // Automatic Control and Computer Sciences ISSN 0146-4116. – 2015. Vol. 49, No. 1. – P. 11–20. DOI: 10.3103/S0146411615010071
4. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посібник / С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.
5. Oliinyk A. O. Using Parallel Random Search to Train Fuzzy Neural Networks / A. O. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, S. A. Subbotin // Automatic Control and Computer Sciences. – 2014. – Vol. 48, Issue 6. – P. 313–323. DOI: 10.3103/S0146411614060078
6. Характеристики ГРІД-вузла НАНУ. – Режим доступу: URL: http://www.ipme.kiev.ua/ukr/grid_vuzol/charakter-g.html. – Загл. з екрану.
7. Introduction to GPUs. – Режим доступу: URL: <https://www.cs.utexas.edu/~pingali/CS378/2015sp/lectures/IntroGPUs.pdf>. – Загл. з екрану.
8. Sulistio A. Simulation of Parallel and Distributed Systems: A Taxonomy - and Survey of Tools / A. Sulistio, C. S. Yeo, R. Buyya // International Journal of Software Practice and Experience. Wiley Press. – 2002. – P. 1–19.
9. Методи і моделі планування ресурсів в GRID-системах : монографія / [В. С. Пономаренко, С. В. Листрової, С. В. Минухін, С. В. Знахур]. – Х. : ІД «ИНЖЭК», 2008. – 408 с.
10. Петренко А. І. Комп'ютерне моделювання ГРІД-систем / А. І. Петренко // Електроніка і зв'язь 5' Тематичний випуск «Електроніка і нанотехнології». – 2010. – С. 40–48.
11. Скрупський С. Ю. Імітаційні моделі розподілених систем компресії відеоінформації / С. Ю. Скрупський, Р. К. Кудерметов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2012. – № 15 (203). – С. 190–202.
12. Кучер В. О. Нейросетевая модель выбора эвристики предоставления ресурсов на уровне потока заданий в grid-системе / В. О. Кучер // 14-th International conference on System Analysis and Information Technologies SAIT 2012 Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «KPI», Kyiv, Ukraine, April 24, 2012 ISBN 978-966-2748-07-9. – P. 287–288.
13. Buyya R. Gridsim: a toolkit for the modeling and simulation of distributed resource management and scheduling for grid computing / R. Buyya, M. Murshed // Concurrency and computation: practice and experience. – 2002. – Vol. 14. – P. 1175–1220.
14. Руденко О. Г. Штучні нейронні мережі / О. Г. Руденко, Є. В. Бодяньський. – Х. : Компанія СМІТ, 2006. – 404 с.
15. Интеллектуальные информационные технологии проектирования автоматизированных систем диагностирования и распознавания об-

- разов : монографія / С. А. Субботін, Ан. А. Олейник, Е. А. Гофман, С. А. Зайцев, Ал. А. Олейник ; под ред. С. А. Субботіна. – Харків : ООО «Компанія Сміт», 2012. – 317 с.
16. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг. – М. : Вильямс, 2006. – 1408 с.
17. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / С. Ю. Скрупський С. Ю.

- нографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
18. Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP / M. J. Quinn. – New York, NY : McGraw-Hill, 2004. – 529 p.

Статья поступила в редакцию 01.02.2016.

Канд.техн.наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ СИНТЕЗУ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ В ПАРАЛЕЛЬНІЙ КОМП'ЮТЕРНІЙ СИСТЕМІ

Вирішено задачу розробки нелінійної моделі, що описує залежність між характеристиками системи, в якій здійснюється синтез нейро-нечітких мереж, параметрами досліджуваного методу і часом, що витрачається системою на виконання синтезу моделей. Об'єкт дослідження – процес синтезу нейро-нечітких моделей для індивідуального прогнозування стану хворого гіпертонічною хворобою. Предметом дослідження є паралельна комп'ютерна система, що виконує метод синтезу нейро-нечітких мереж. Мета роботи полягає у підвищенні ефективності використання паралельних комп'ютерних систем для вирішення задач медичного призначення. Запропоновано нелінійну модель, що дозволяє прогнозувати витрачений паралельною системою час на виконання методу синтезу нейро-нечітких мереж і, таким чином, здійснювати раціональний вибір ресурсів комп'ютерної системи. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану модель. Виконано експерименти, що підтверджують адекватність запропонованої моделі. Результати експериментів дозволяють рекомендувати використання розробленої моделі на практиці.

Ключові слова: синтез моделі, паралельна система, планування ресурсів, нейронна мережа, середньоквадратична помилка.

Skrupsky S. Yu.

PhD, Associate Professor of Computer systems and networks department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF METHOD FOR THE SYNTHESIS OF NEURO-FUZZY MODELS IN A PARALLEL COMPUTER SYSTEM

The article deals with the problem of the development of the non-linear model describing dependences between the characteristics of a system, in which synthesis of neuro-fuzzy networks is realized, the parameters of the investigated method and the time spent on execution of the models synthesis. The object of research is a synthesis of neuro-fuzzy models for individual prediction of the hypertensive patient state. The subject of research is a parallel computer system that performs the method of neuro-fuzzy networks synthesis. The purpose of the work is to improve the efficiency of parallel computer systems solving the problems of medical direction. A non-linear model to predict the time used by a parallel system to perform the method of neuro-fuzzy network synthesis and thus to execute a rational choice of the computer system resources has been proposed. The software that implements the proposed model has been developed.

Experiments confirming the adequacy of the proposed model have been executed. The experimental results allow us to recommend the application of the developed model in practice.

Keywords: synthesis of model, parallel system, resource planning, neural network, mean-squared error.

REFERENCES

- Lashkul Z. V. Osoblyvosti epidemiologii arterialnoi hipertenzii ta yii uskladnen na rehionalnomu rivni z 1999 po 2013 roky, *Suchasni medychni tekhnologii*, 2014, No. 2, pp. 134–141.
- Sergey Subbotin, Andrii Oliinyk, Stepan Skrupsky Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence, *Information and Digital Technologies 2015 ISBN 978-1-4673-7185-8, 7–9 July 2015*. Zilina, Slovakia, pp. 336–344
- Andrii Oliinyk, Stepan Skrupsky, Sergey Subbotin Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search, *Automatic Control and Computer Sciences ISSN 0146-4116*, 2015, Vol. 49, No. 1, pp. 11–20. DOI: 10.3103/S0146411615010071
- Subbotin S.O. Podannia y obrobka znan u systemakh shtuchnoho intelektu ta pidtrymky pryiniattia rishen : navch. posibnyk. Zaporizhzhia, ZNTU, 2008, 341 p.
- Oliinyk A. O., Skrupsky S. Yu., Subbotin S. A. Using Parallel Random Search to Train Fuzzy Neural Networks, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, Vol. 48, Issue 6, pp. 313–323. DOI: 10.3103/S0146411614060078
- Kharakterystyky HRID-vuzla NANU. Rezhym dostupa: URL: http://www.ipme.kiev.ua/ukr/grid_vuzol/charakter-g.html. – Zahl. z ekranu.
- Introduction to GPUs. Rezhym dostupa, URL: <https://www.cs.utexas.edu/~pingali/CS378/2015sp/lectures/IntroGPUs.pdf>. Zahl. z ekranu.
- Sulistio A., Yeo C. S., Buyya R. Simulation of Parallel and Distributed Systems: A Taxonomy – and Survey of Tools, *International Journal of Software Practice and Experience*. Wiley Press, 2002, pp. 1–19.
- Ponomarenko S., Listrovoj S. V., Minuxin S. V., Znaxur S. V. Metody i modeli planirovaniya resursov v GRIDsystemax, monografiya. Har'kov, ID «INZhE'K», 2008, 408 p.
- Petrenko A. I. Kompiuterne modeliuvannia HRID-system, *E'lektronika i svyaz' 5' Tematicheskij vypusk «E'lektronika i nanotekhnologii»*, 2010, pp. 40–48.
- Skrupskij S. Yu., Kudermetov R. K. Imitacionnye modeli raspredelennyx sistem kompressii videoinformacii, *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: «Informatyka, kibernetyka ta obchysluvalna tekhnika»*, 2012, No. 15 (203), pp. 190–202.
- Kucher V. O. Nejrosetevaya model' vybora e'vristsiki predstavleniya resursov na urovne potoka zadaniy v grid-sisteme, *14-th International conference on System Analysis and Information Technologies SAIT 2012 Institute for Applied System Analysis, National Technical University of Ukraine «KPI»*. Kyiv, Ukraine, April 24, 2012 ISBN 978-966-2748-07-9, pp. 287–288.
- Buyya R., Murshed M. Gridsim: a toolkit for the modeling and simulation of distributed resource management and scheduling for grid computing, *Concurrency and computation: practice and experience*, 2002, Vol. 14, pp. 1175–1220.
- Rudenko O. H., Bodianskyi Ye. V. Shtuchni neuronni merezhi. Har'kov, Kompaniia SMIT, 2006, 404 p.
- Subbotin S. A., Olejnik An. A., Gofman E. A., Zajcev S. A., Olejnik Al. A.; pod red. S. A. Subbotina Intellektual'nye informacionnye tekhnologii proektirovaniya avtomatizirovannyx sistem diagnostirovaniya i raspoznavaniya obrazov : monografiya. Har'kov, ООО «Компанія Сміт», 2012, 317 p.
- Rassel S., Norvig P. Iskustvennyj intellekt: sovremennyy podhod. Moscow, Vil'yams, 2006, 1408 p.
- Subbotin S. O., Oliinyk A. O., Oliinyk O. O.; pid zah. red. S. O. Subbotina Neiteratyvni, evoliutsiini ta multyahentni metody syntezy nechitkolohichnykh i neiromerezhnykh modelei: monografiya. Zaporizhzhia, ZNTU, 2009, 375 p.
- Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. New York, NY, McGraw-Hill, 2004, 529 p.