



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 2(33) 2015

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2015

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 2(33) 2015

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2015

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 2(33) 2015

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

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

Zaporizhzhya

ZNTU

2015

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії:

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

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

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

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

Потапенко Є. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 12 від 03.06.2015 р.

Журнал верстаний 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).

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

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

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

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

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

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

Потапенко Е. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 12 от 03.06.2015 г.

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

The scientific journal «Radio Electronics, Computer Science, Control» is published by the Zaporizhzhya National Technical University (ZNTU). since 1999 with periodicity four numbers per year.

The journal is registered by the State Committee for information policy, television and radio broadcasting of Ukraine in 29.01.2003. The journal has a State Registration Certificate of printed mass media (series KB №6904).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Members of Editorial Board:

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

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

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

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

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

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

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

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

E. M. Potapenko, 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 № 12 dated 03.06.2015.

The journal is imposed by the editorial-publishing department of ZNTU.

The journal web-site is <http://ric.zntu.edu.ua>.

The address of the editorial office: Editorial office of the journal «Radio Electronics, Computer Science, Control», Zaporizhzhia National Technical University, Zhukovskiy street, 64, Zaporizhzhya, 69063, Ukraine.

Tel.: +38-061-769-82-96 – the editorial-publishing department.

Fax: +38-061-764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	7
<i>Савочкин Д. А., Гимпилевич Ю. Б.</i> ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ RFID-ЛОКАЛИЗАЦИИ.....	7
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	16
<i>Шама Є. О.</i> ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРНОСТІ ОЗНАКОВОГО ПРОСТОРУ РОСЛИННИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ.....	16
<i>Швачич Г. Г., Соболенко О. В.</i> МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ МЕТАЛУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ.....	23
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	30
<i>Олійник А. О.</i> СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ХВОРОГО НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ.....	30
<i>Парфененко Ю. В., Шендрик В. В., Галіченко О. С.</i> ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ СОЦІАЛЬНО-БЮДЖЕТНОЇ СФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ.....	41
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	47
<i>Имамвердиев Я. Н., Сухостат Л. В.</i> МЕТОД ОЦЕНКИ ПЕРИОДА ОСНОВНОГО ТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ.....	47
<i>Красій А. В., Говоруценко Т. О.</i> МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ УСПІШНОСТІ ПРОГРАМНИХ ПРОЕКТІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ПРОГНОЗОВАНИХ ЗНАЧЕНЬ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ.....	54
<i>Молчанова В. С.</i> АДАПТИВНЫЙ ПОРОГОВЫЙ МЕТОД БИНАРИЗАЦИИ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ЧЕРТЕЖЕЙ.....	62
<i>Прогонов Д. А., Куц С. Н.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТЕГАНОГРАММ.....	71
<i>Савков С. О., Мороз В. В.</i> АНАЛІЗ МЕТОДІВ СКЕЛЕТИЗАЦІЇ НЕРЕГУЛЯРНИХ ТЕКСТУР В ЗАДАЧІ ПОШУКУ УНІКАЛЬНИХ ДЕСКРИПТОРІВ ЗОБРАЖЕННЯ.....	81
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	87
<i>Шитикова Е. В., Табуницик Г. В.</i> МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕННЫХ РЕСУРСОВ.....	87

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Savochkin D. A., Gimpilevich Yu. B.</i> OPTIMIZATION OF ANTENNA DEPLOYMENT FOR TWO-DIMENSIONAL RFID LOCALIZATION.....	7
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	16
<i>Shama E. O.</i> THE FUATURE SPACE DIMENSIONALITY REDUCTION OF PLANT OBJECTS BASED ON FACTOR ANALYSIS.....	16
<i>Shvachych G. G., Sobolenko O. V.</i> SIMULATION OF SPEED SCHEDULES FOR METAL ON THE BASIS OF USING THE HIGH-PERFORMANCE MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS.....	23
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	30
<i>Oliinyk A.</i> SYNTHESIS OF NEURO-FUZZY MODEL FOR PATIENT HEALTH PREDICTING BASED ON PARALLEL COMPUTING.....	30
<i>Parfenenko Yu. V., Shendryk V. V., Galichenko O. S.</i> PREDICTION THE HEAT CONSUMPTION OF SOCIAL AND PUBLIC SECTOR BUILDINGS USING NEURAL NETWORKS.....	41
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	47
<i>Imamverdiyev Y. N., Sukhostat L. V.</i> PITCH PERIOD ESTIMATION METHOD USING EMPIRICAL WAVELET TRANSFORM.....	47
<i>Krasiy A. V., Hovorushchenko T. O.</i> THE METHOD OF PREDICTION OF SOFTWARE PROJECTS SUCCESS BASED ON THE ANALYSIS OF PREDICTED VALUES OF SOFTWARE CHARACTERISTICS.....	54
<i>Molchanova V. S.</i> THE ADAPTIVE THRESHOLD BINARIZATION METHOD OF RASTER IMAGES OF TECHNICAL DRAWINGS.....	62
<i>Progonov D. O., Kushch S. M.</i> SPECTRAL ANALYSIS OF STEGANOGRAMS.....	71
<i>Savkov S. O., Moroz V. V.</i> ANALYSIS OF SKELETONIZATION METHODS FOR IRREGULAR TEXTURE IN UNIQUE IMAGE DESCRIPTORS SEARCHING PROBLEM.....	81
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	87
<i>Shitikova Yel., Tabunshchik G.</i> METHOD OF MANAGING UNCERTAINTY IN RESOURCE-LIMITED SETTINGS.....	87

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА ТА ТЕЛЕКОММУНІКАЦІЇ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.396.96

Савочкин Д. А.¹, Гимпилевич Ю. Б.²

¹Аспирант кафедри радіотехніки і телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки і телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕНН ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ RFID-ЛОКАЛИЗАЦИИ

Разработана методика поиска оптимального размещения антенн для систем пространственной локализации на основе технологии радиочастотной идентификации (RFID). Методика основана на минимизации средней ошибки при реализации комбинированного метода локализации, включающего в себя алгоритм трилатерации, алгоритм отпечатков и алгоритм пересечений. В ходе проведенного вычислительного эксперимента установлено, что среди ряда рассмотренных паттернов оптимальным для квадратной зоны локализации является вариант размещения антенн в виде квадратной сетки при ориентации зон действия антенн по направлению к центру зоны локализации.

Ключевые слова: RFID, локализация, оптимизация, комбинированный метод, размещение антенн.

НОМЕНКЛАТУРА

HDOP – horizontal dilution of precision;

RFID – radio frequency identification;

a – вектор размещения антенн;

A – множество векторов a ;

b – отношение длин большой и малой осей эллипсов

зон действия антенн;

$c(a, l)$ – коэффициент покрытия точки l зонами действия антенн при размещении антенн согласно вектору a ;

$C(a)$ – коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн;

$\overline{C(a)}$ – нормированный коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн;

C_{\max} – граница нормирования коэффициента покрытия зоны локализации;

$c_1(a)$ – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади зоны локализации;

$c'_1(a)$ – отношение площади той части центральной области зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади центральной области зоны локализации;

$c_3(a)$ – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия трех или более ан-

тенн, к общей площади зоны локализации при размещении антенн согласно вектору a ;

d – расстояние между RFID-меткой и антенной;

$e(a, l)$ – ошибка локализации для точки l , обеспечиваемая алгоритмом пересечений при размещении антенн согласно вектору a ;

$E(a)$ – средняя ошибка локализации, обеспечиваемая алгоритмом пересечений;

$\overline{E(a)}$ – нормированная средняя ошибка локализации, обеспечиваемая алгоритмом пересечений;

E_{\max} – граница нормирования средней ошибки алгоритма пересечений;

$h(a, l)$ – величина HDOP для точки l при размещении антенн согласно вектору a ;

$H(a)$ – усредненная величина HDOP;

$\overline{H(a)}$ – нормированная усредненная величина HDOP;

H_{\max} – граница нормирования величины HDOP;

$k(\varphi)$ – поправочный эллиптический коэффициент для азимута φ на точку размещения метки относительно точки размещения соответствующей антенны;

l – некоторая точка в пространстве зоны локализации;

$\hat{l}(a, l)$ – оценка местоположения метки, формируемая алгоритмом пересечений при ее расположении в точке l ;

$\hat{l}(a, q, l)$ – оценка местоположения метки, формируемая алгоритмом пересечений при ее расположении в точке l в случае принятия ответов только антеннами множества q и размещения антенн согласно вектору a ;

L – множество точек зоны локализации;

$|L|$ – площадь зоны локализации;

$L_3(a)$ – множество точек той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех различных антенн;

$|L_3(a)|$ – площадь той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех различных антенн при размещении антенн согласно вектору a ;

N – общее число антенн RFID-системы;

$p(d)$ – вероятность получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии d ;

$p(d, \Phi)$ – вероятность получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии d с азимутом Φ ;

$\bar{p}(d, \Phi)$ – вероятность неполучения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии d с азимутом Φ ;

q – некоторое множество номеров антенн;

q_{all} – множество номеров всех антенн системы;

Q – множество всех возможных множеств номеров антенн, принявших сигналы от метки;

$r(l_1, l_2)$ – функция расстояния между точками l_1 и l_2 ;

R_{max} – предельное расстояние между антенной и меткой, после которого вероятность получения ответа от метки антенной равна нулю;

R_{min} – предельное расстояние между антенной и меткой, до которого вероятность получения ответа от метки антенной равна единице;

$S(a)$ – целевая функция оптимизации размещения антенн при реализации комбинированного метода пространственной локализации;

$v(a, q, l)$ – вероятность получения ответов от метки расположенной в точке l только антеннами множества q и размещения антенн согласно вектору a ;

$w(a, l)$ – вероятность размещения метки в точке l ;

$w_{opt}(a)$ – весовой коэффициент алгоритма отпечатков;

$w_{пер}(a)$ – весовой коэффициент алгоритма пересечений;

$w_{трпл}(a)$ – весовой коэффициент алгоритма трилатерации;

z – величина сдвига антенн относительно края зоны локализации;

$\alpha(a, l)$ – геометрическая матрица, используемая при вычислении величины HDOP;

$\beta(a, l)$ – ковариационная матрица, используемая при вычислении величины HDOP;

$\Phi(l, a_i)$ – азимут на точку l относительно точки размещения антенны a_i ;

Ψ – угол поворота эллипсов зон действия антенн.

ВВЕДЕНИЕ

Системы пространственной локализации объектов внутри закрытых помещений находят широкое применение в различных сферах человеческой деятельности.

Одной из перспективных технологий, позволяющих реализовать процедуру пространственной локализации, является технология радиочастотной идентификации

RFID. В системах RFID-локализации используются специальные RFID-метки, размещаемые на объектах. Местоположение объектов определяется в ходе выполнения алгоритма локализации, который анализирует измерительную информацию, получаемую от меток с помощью нескольких антенн RFID-системы. Важной задачей при этом является повышение точности локализации объектов. Одним из факторов, оказывающих влияние на точность локализации, является размещение антенн в пространстве.

Целью настоящей работы является разработка методики оптимизации размещения антенн RFID-системы для комбинированного метода двумерной пространственной локализации, включающего в себя несколько различных алгоритмов локализации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе мы рассматриваем случай двумерной локализации, когда интересующие нас объекты оснащены RFID-метками и находятся на полу помещения (или на небольшой высоте над уровнем пола), а антенны системы установлены на потолке. Положим, что система содержит определенное количество практически одинаковых антенн, которые должны быть оптимальным образом размещены (заданы их координаты и углы поворота). В качестве критерия оптимальности мы принимаем критерий минимума средней ошибки локализации при реализации комбинированного метода локализации.

Исходными данными для разрабатываемой нами методики являются размер зоны локализации (области в которой могут размещаться объекты локализации с RFID-метками), число антенн RFID-системы, их параметры, а также множество анализируемых векторов размещения антенн. При этом под параметрами антенн мы понимаем в первую очередь форму и размер зон действия антенн – областей, при расположении в которых RFID-меток, их сигналы успешно принимаются антеннами. В качестве выходных данных наша методика должна выдавать значения целевой функции для каждого анализируемого вектора размещения антенн, тем самым позволяя выбрать наилучший вариант.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В литературе имеется ряд работ, посвященных теме оптимального размещения антенн в пространстве. При этом используется множество различных критериев оптимальности. Так, в [1] представлена методика поиска наилучшего размещения точек доступа в беспроводных сетях. Авторы добиваются максимизации покрытия рабочей области зонами действия антенн, минимизации интерференции между точками доступа, максимизации пропускной способности, а также минимизации числа точек доступа. В [2] помимо максимизации покрытия рабочей области и минимизации общего числа точек доступа авторы добиваются минимизации средних потерь в распространении сигналов. В [3] рассмотрен вопрос оптимального размещения антенн в классической RFID-системе (не обеспечивающей локализацию объектов). В данной работе авторы добиваются минимизации площади областей, в которых пересекаются зоны действия нескольких антенн, минимизации числа «беспо-

лезных» антенн (антенн, внутри областей действия которых не расположены RFID-метки), максимизации числа меток, находящихся внутри зон действия антенн, а также минимизации числа меток, находящихся внутри областей пересечения зон действия антенн.

Известны также работы, посвященные оптимизации размещения антенн при решении задачи локализации объектов в пространстве. В [4] проводится максимизация усредненного отношения величины разрешающей способности к степени изменчивости сигнала во времени. Недостатком данного критерия является необходимость наличия тренировочных (калибровочных) данных. В [5] выполняется минимизация размеров всех образуемых в рабочей области зон неопределенности. При этом под зоной неопределенности понимается такая область, которая образуется путем пересечения двух или более колец с центрами в точках размещения антенн и радиусами, соответствующими минимальным и максимальным дальностям действия антенн. Недостатком этого критерия можно считать его относительно высокую вычислительную сложность. В работе [6] предлагается для максимизации точности локализации добиваться того, чтобы каждая точка зоны локализации была покрыта зонами действия как минимум трех антенн, и при этом минимизировать общее число антенн системы. В [7] авторы стремятся минимизировать среднюю ошибку локализации, используя вероятностную модель распределения измерительной информации в виде уровней сигнала. Недостатком представленного подхода является требование наличия предварительно полученных данных, позволяющих выбрать параметры вероятностной модели.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей работе проводится разработка методики оптимизации размещения антенн RFID-системы для комбинированного метода пространственной локализации. Комбинированный метод основан на объединении нескольких базовых алгоритмов локализации, что позволяет увеличить результирующую точность [8]. В простейшем случае результирующей оценкой местоположения RFID-метки в ходе реализации комбинированного метода считается среднее арифметическое оценок, сформированных базовыми алгоритмами. В этом разделе приводится описание трех базовых алгоритмов: алгоритма трилатерации, алгоритма отпечатков и алгоритма пересечений. Эти алгоритмы входят в состав комбинированного метода локализации, рассматриваемого в дальнейшей работе.

В ходе реализации алгоритма трилатерации (дальномерного алгоритма) для локализуемой метки строятся окружности положения по результатам измерений [8]. Далее находится точка пересечения этих окружностей, которая принимается оценкой положения метки. Радиусы окружностей положения определяются значениями измерительной информации, полученной от метки с помощью антенн (например, уровнями мощности ответных сигналов от метки). Этот алгоритм иллюстрируется рис. 1, на котором изображен случай трилатерации метки с помощью трех антенн (a_1, a_2, a_3 – позиции антенн, d_1, d_2, d_3 – расстояния между антеннами и меткой, красн – результирующая оценка положения метки).

Алгоритм отпечатков требует проведения предварительного этапа сбора измерительной информации в различных точках зоны локализации от тренировочных RFID-меток. Собранные при этом измерительная информация используется как источник эталонных данных на рабочем этапе локализации. При реализации алгоритма для расчета оценки местоположения некоторой метки ее вектор измерительной информации (отпечаток) сравнивается с каждым вектором из сформированной на предварительном этапе базы отпечатков. В ходе сравнения в базе находятся векторы в максимальной степени подобные входному вектору. После этого результирующая оценка местоположения метки рассчитывается как среднее тех позиций, для которых были ранее получены найденные в базе векторы. Наиболее известным частным случаем алгоритма отпечатков является алгоритм k ближайших соседей (k nearest neighbors) [8].

Алгоритм пересечений основан на использовании измерительной информации в виде фактов наличия ответов от меток. При его реализации оценка местоположения некоторой RFID-метки рассчитывается путем нахождения области пересечения зон действия антенн, принявших сигналы от метки, с последующим исключением области объединения зон действия антенн, не принявших сигналы от метки [8]. С целью иллюстрации принципа работы алгоритма на рис. 2 изображена схема размещения четырех антенн (a_1, \dots, a_4) и их зон действия (круги). При таком расположении антенн и размере зон действия формируется тринадцать областей возможного местоположения меток (зон позиционирования), центры масс которых могут быть приняты в виде результирующих оценок алгоритма.

Для создания методики оптимизации размещения антенн RFID-системы при использовании комбинированного метода пространственной локализации вначале необходимо сформировать факторы, характеризующие оп-

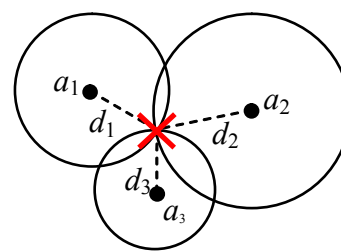


Рисунок 1 – Пример реализации алгоритма трилатерации

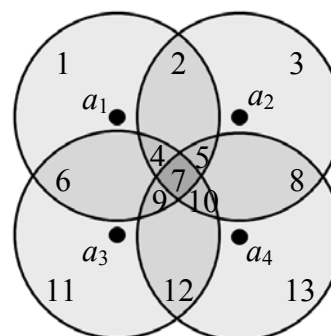


Рисунок 2 – Схема размещения четырех антенн и их зон действия

тимальность каждого из базовых алгоритмов, входящих в состав метода. В данном разделе мы поочередно проводим вывод таких факторов для алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, после чего формируем критерий оптимальности комбинированного метода.

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма трилатерации, мы предлагаем использовать коэффициент горизонтального снижения точности (HDOP). Понятие HDOP широко применяется в теории систем спутниковой навигации для количественной оценки взаимного расположения спутников относительно приемного устройства. Усредненное значение HDOP $H(a)$ можно вычислить путем взятия интеграла от величины HDOP по каждой из точек интересующей нас части зоны локализации:

$$H(a) = \int_{l \in L_3(a)} h(a, l) w(a, l) dl,$$

где $a = \{a_1, \dots, a_N\}$ – каждый элемент вектора содержит позицию и угол поворота антенны; $w(a, l)$ – вероятность размещения RFID-метки в точке l (позволяет выделить наиболее важные части зоны локализации [7]). В дальнейшей работе мы приняли плотность вероятности размещения меток равномерной: $w(a, l) = 1/|L_3(a)|$.

Мы проводим вычисление усредненного значения HDOP лишь по той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия как минимум трех антенн, поскольку классический вариант алгоритма трилатерации для случая двумерной локализации требует получения измерительной информации от метки как минимум тремя различными антеннами. Мы полагаем, что в случае, когда ответы получены двумя или менее антеннами, результирующая оценка комбинированного метода формируется на основе оценок алгоритма отпечатков и алгоритма пересечений, а алгоритм трилатерации не используется.

Известно, что при вычислении значений HDOP для двумерного пространства первоначально формируется геометрическая матрица [9]

$$\alpha(a, l) = \begin{bmatrix} \frac{a_{1x} - l_x}{d_1} & \frac{a_{1y} - l_y}{d_1} \\ \frac{a_{2x} - l_x}{d_2} & \frac{a_{2y} - l_y}{d_2} \\ \frac{a_{3x} - l_x}{d_3} & \frac{a_{3y} - l_y}{d_3} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где $a_1 = (a_{1x}, a_{1y})$, $a_2 = (a_{2x}, a_{2y})$, $a_3 = (a_{3x}, a_{3y})$ – позиции трех ближайших к точке $l = (l_x, l_y)$ антенн; d_1, d_2, d_3 – расстояния от точки l до антенн a_1, a_2, a_3 , соответственно.

После этого вычисляется ковариационная матрица

$$\beta(a, l) = [\alpha(a, l)^T \alpha(a, l)]^{-1}, \quad (3)$$

где $(\cdot)^T$ – операция транспонирования; $(\cdot)^{-1}$ – операция нахождения обратной матрицы.

Окончательно величина HDOP в точке l вычисляется как

$$h(a, l) = \sqrt{\beta(a, l)_{1,1} + \beta(a, l)_{2,2}}. \quad (4)$$

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма отпечатков, будем использовать коэффициент $C(a)$ покрытия зоны локализации зонами действия антенн. Такой коэффициент может определяться по формуле

$$C(a) = \int_{l \in L} c(a, l) w(l) dl, \quad (5)$$

где $c(a, l)$ – определяется как число зон действия, внутри которых находится точка l ; $w(l) = 1/|L|$ – вероятность размещения RFID-метки в точке l .

В качестве фактора, характеризующего оптимальность размещения антенн при реализации алгоритма пересечений, примем среднюю ошибку $E(a)$ пространственной локализации, обеспечиваемую алгоритмом. Ошибку $E(a)$ можно записать в виде взвешенного интеграла ошибки локализации по каждой из точек зоны локализации:

$$E(a) = \int_{l \in L} e(a, l) w(l) dl. \quad (6)$$

Ошибка $e(a, l)$ локализации для точки l определяется как расстояние между точкой l и оценкой $\hat{l}(a, l)$ местоположения RFID-метки, формируемой алгоритмом пересечений при расположении метки в точке l

$$e(a, l) = r[l, \hat{l}(a, l)] = \sqrt{[l_x - \hat{l}(a, l)_x]^2 + [l_y - \hat{l}(a, l)_y]^2}. \quad (7)$$

В идеализированном случае при реализации алгоритма пересечений оценка $\hat{l}(a, l)$ положения метки формируется в центре масс той единственной зоны позиционирования, которая включает в себя точку l . Однако из-за различного рода шумов могут возникать ситуации отсутствия ответа от метки при ее расположении внутри зоны действия антенны или наличия ответа при расположении вне зоны действия. Это приводит к возможному смещению оценки местоположения. Учесть подобный эффект можно, реализуя вероятностное вычисление ошибки $e(a, l)$. Для этого нами предлагается учитывать вероятность $p(d)$ получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии d . Можно предположить, что до некоторого предела R_{\min} такая вероятность близка к единице, а далее она монотонно убывает и достигает нуля на расстоянии R_{\max} :

$$p(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } d < R_{\min}; \\ 1 - \frac{d - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}}, & \text{если } R_{\min} \leq d \leq R_{\max}; \\ 0 & \text{если } d > R_{\max}. \end{cases} \quad (8)$$

Выражение (8) справедливо для антенн с изотропной в плоскости локализации диаграммой направленности, формирующих круговые зоны действия. Однако в RFID-системах часто применяются слабонаправленные антенны, при использовании которых форма зон действия принимает эллиптический характер. С целью учета это-

го мы предлагаем рассчитывать значения R_{\min} и R_{\max} с использованием поправочных коэффициентов:

$$\begin{cases} R_{\min}(\varphi) = R_{\min}k(\varphi); \\ R_{\max}(\varphi) = R_{\max}k(\varphi). \end{cases} \quad (9)$$

Эллиптический коэффициент $k(\varphi)$ может быть рассчитан по следующей формуле (выводится из общей формулы эллипса в полярных координатах):

$$k(\varphi) = \frac{b\sqrt{2}}{\sqrt{(1-b^2)\cos(2\varphi-2\psi)+b^2+1}}. \quad (10)$$

Таким образом, выражение (8) может быть переписано для расчета вероятности $p(d, \varphi)$ получения антенной ответа от метки, расположенной на расстоянии d с азимутом φ :

$$p(d, \varphi) = \begin{cases} 1, & \text{если } d < R_{\min}(\varphi); \\ 1 - \frac{d - R_{\min}(\varphi)}{R_{\max}(\varphi) - R_{\min}(\varphi)}, & \text{если } R_{\min}(\varphi) \leq d \leq R_{\max}(\varphi); \\ 0 & \text{если } d > R_{\max}(\varphi). \end{cases} \quad (11)$$

При этом вероятность неполучения антенной ответа от метки будем определять как

$$\bar{p}(d, \varphi) = 1 - p(d, \varphi). \quad (12)$$

С учетом всего вышесказанного, ошибку $e(a, l)$ локализации для точки l следует определять как среднее взвешенное расстояний между точкой l и всеми возможными оценками местоположения метки при ее расположении в точке l . Весовыми коэффициентами усреднения при этом должны служить вероятности формирования конкретных оценок:

$$e(a, l) = \sum_{q \in Q} r[l, \hat{l}(a, q, l)] v(a, q, l). \quad (13)$$

Вероятность $v(a, q, l)$ будем определять по формуле

$$v(a, q, l) = \prod_{i \in q} p[r(l, a_i), \varphi(l, a_i)] \prod_{j \in q_{all} \setminus q} \bar{p}[r(l, a_j), \varphi(l, a_j)], \quad (14)$$

где a_i, a_j – позиции i -й и j -й антенн, соответственно $q_{all} = \{1, \dots, N\}$.

Сформировав факторы, характеризующие оптимальность размещения антенн, для всех базовых алгоритмов локализации, мы можем вывести критерий оптимальности для комбинированного метода локализации. При этом целевая функция $S(a)$ оптимизации размещения антенн комбинированного метода должна вычисляться на основе факторов (1), (5) и (6). Критерием оптимальности будем считать максимум целевой функции

$$S(a) \rightarrow \max_{a \in A}. \quad (15)$$

Определять целевую функцию $S(a)$ будем в следующем виде:

$$S(a) = c'_1(a)^2 c_1(a)^3 [w_{\text{трил}}(a)\overline{H(a)} + w_{\text{отп}}(a)\overline{C(a)} + w_{\text{пер}}(a)\overline{E(a)}], \quad (16)$$

где в качестве центральной области понимался квадрат площадью 80% от площади всей зоны локализации, размещенный в ее центре.

В выражении (16) множители $c'_1(a)$ и $c_1(a)$ возводятся во вторую и третью степени, соответственно, поскольку мы полагаем, что важно иметь полное покрытие всей зоны локализации (и особенно важно – ее центральной части) зонами действия хотя бы одной из имеющихся антенн. Возведение величин $c'_1(a)$ и $c_1(a)$ в степень позволяет существенно снизить значение целевой функции для тех вариантов размещения антенн, при которых не вся зона локализации покрыта зонами действия антенн. Этим достигается исключение таких вариантов в ходе процедуры оптимизации, даже если они обеспечивают высокую точность локализации в других частях зоны локализации.

Весовые коэффициенты $w_{\text{трил}}(a)$, $w_{\text{отп}}(a)$, $w_{\text{пер}}(a)$ позволяют учесть степень точности алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, соответственно. В настоящей работе мы задали их следующим образом:

$$\begin{cases} w_{\text{трил}}(a) = \frac{1}{3}c_3(a); \\ w_{\text{отп}}(a) = w_{\text{пер}}(a) = \frac{1}{3}\left[1 + \frac{1-c_3(a)}{2}\right]. \end{cases} \quad (17)$$

Такой вариант задания весовых коэффициентов используется по причине того, что предполагается, что алгоритм трилатерации функционирует только в той части зоны локализации, которая покрыта зонами действия хотя бы трех антенн.

Нормированная величина HDOP $\overline{H(a)}$ определяется как

$$\overline{H(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{H(a)-1}{H_{\max}-1}, & \text{если } H(a) \leq H_{\max}; \\ 0, & \text{если } H(a) > H_{\max}. \end{cases} \quad (18)$$

В настоящей работе мы приняли $H_{\max} = 2,5$ (субъективная граница между «хорошими» и «средними» значениями).

Нормированный коэффициент покрытия зоны локализации зонами действия антенн $\overline{C(a)}$ определяется как

$$\overline{C(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{C_{\max} - C(a)}{C_{\max}}, & \text{если } C(a) \leq C_{\max}; \\ 1, & \text{если } C(a) > C_{\max}. \end{cases} \quad (19)$$

В настоящей работе мы эмпирически выбрали $C_{\max} = 4$, поскольку ответов от четырех антенн обычно достаточно для высокоточной локализации при использовании метода отпечатков.

Нормированная средняя ошибка $\overline{E(a)}$ алгоритма пересечений определяется как

$$\overline{E(a)} = \begin{cases} 1 - \frac{E(a)}{E_{\max}}, & \text{если } E(a) \leq E_{\max}; \\ 0, & \text{если } E(a) > E_{\max}. \end{cases} \quad (20)$$

В данной работе для рассматриваемого далее размера зоны локализации и зон действия антенн мы эмпирически приняли $E_{\max} = 0,6$ м.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

С целью поиска наилучшего размещения антенн RFID-системы мы провели вычисление величины целевой функции $S(a)$ согласно выражению (16) для различных вариантов размещения 16 антенн. При этом мы рассматривали несколько простых паттернов размещения, представленных на рис. 3. Каждый вариант размещения антенн для каждого из паттернов также характеризовался некоторой величиной сдвига z .

В ходе исследований зона локализации была принята квадратной с размером $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$, а зоны действия антенн задавались в виде эллипсов с размерами малой оси $R_{\min} = 1,6 \text{ м}$, $R_{\max} = 1,9 \text{ м}$ (при отношении длины большой оси к длине малой, равном $b = 1,5625$). Рассматривалось три варианта поворота антенн (и, соответственно, поворота их зон действия y) относительно вертикальной оси: 1) 45° ; 2) 90° ; 3) поворот каждой антенны отдельно по направлению к центру зоны локализации. При этом для каждого паттерна размещения антенн мы рассчитывали величину целевой функции $S(a)$ при изменении значения z от 0 м до 1,5 м с шагом в 5 см.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные нами результаты представлены на рис. 4 в виде зависимостей величины $S(a)$ от значения z . Наилучшие для каждого паттерна варианты (один для случая поворота всех антенн в одном направлении и один для случая поворота всех антенн к центру зоны локализации) представлены на рис. 5 в виде схем.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим результирующие зависимости величины целевой функции $S(a)$ от сдвига z , представленные на рис. 4. Видно, что согласно разработанному критерию наилучшим является вариант размещения антенн с использованием паттерна сетки при величине сдвига $z = 85$ см, шаге сетки 110 см и повороте антенн по направлению к центру зоны локализации (рис. 5б). Полученное при этом значение целевой функции равно $S(a) = 0,504$. Важно отметить, что для всех вариантов рассмотренных паттернов (кроме паттерна треугольников) поворот антенн по направлению к центру зоны локализации позволил добиться увеличения величины целевой функции.

Наихудшие результаты, как и следовало ожидать, в основном были получены при использовании паттернов квадрата и окружности без размещения дополнительной антенны в центре, поскольку в этих случаях центральная часть зоны локализации остается не покрытой зонами действия антенн (рис. 5д–з). Также неудовлетворительные результаты получены для паттерна окружности с размещением дополнительной антенны в центре (рис. 5л). Это происходит из-за того, что, несмотря на внесение центральной антенны, при использовании такого паттерна для любых рассмотренных z в зоне локализации всегда остаются области, которые не покрыты зонами действия антенн (как в центре, так и по краям).

Проведенный в работе экспериментальный анализ не позволяет заявить о том, что полученное наилучшее размещение антенн является оптимальным не только среди рассмотренных, но и среди всех возможных размещений. Однако мы считаем, что разработанный критерий оптимальности адекватен и позволяет добиться минимальной средней ошибки локализации при использовании рассмотренного в работе комбинированного метода локализации.

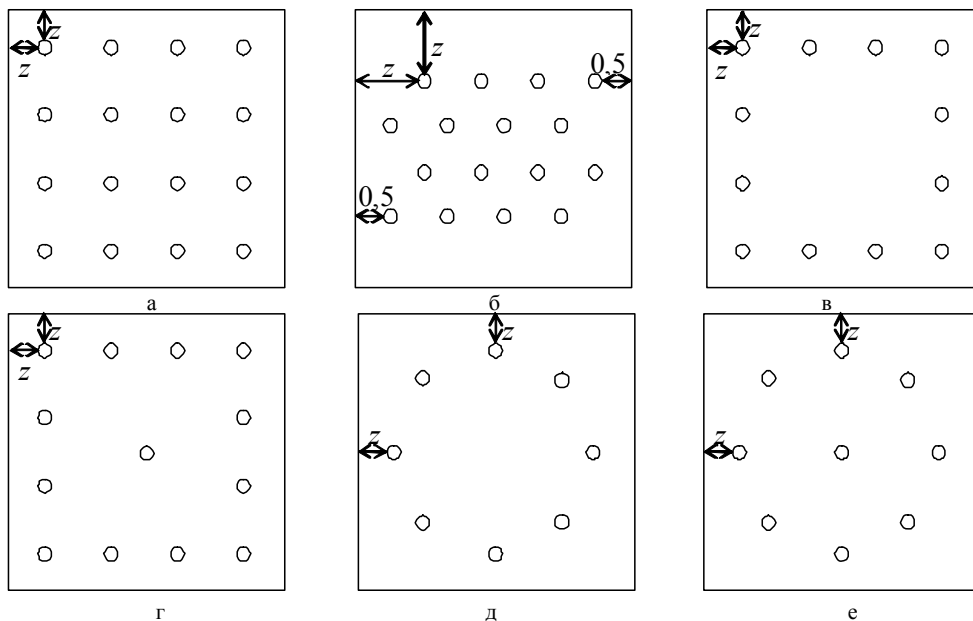


Рисунок 3 – Паттерны размещения антенн: а – сетка, б – треугольники, в – квадрат, г – квадрат с антенной в центре, д – окружность, е – окружность с антенной в центре

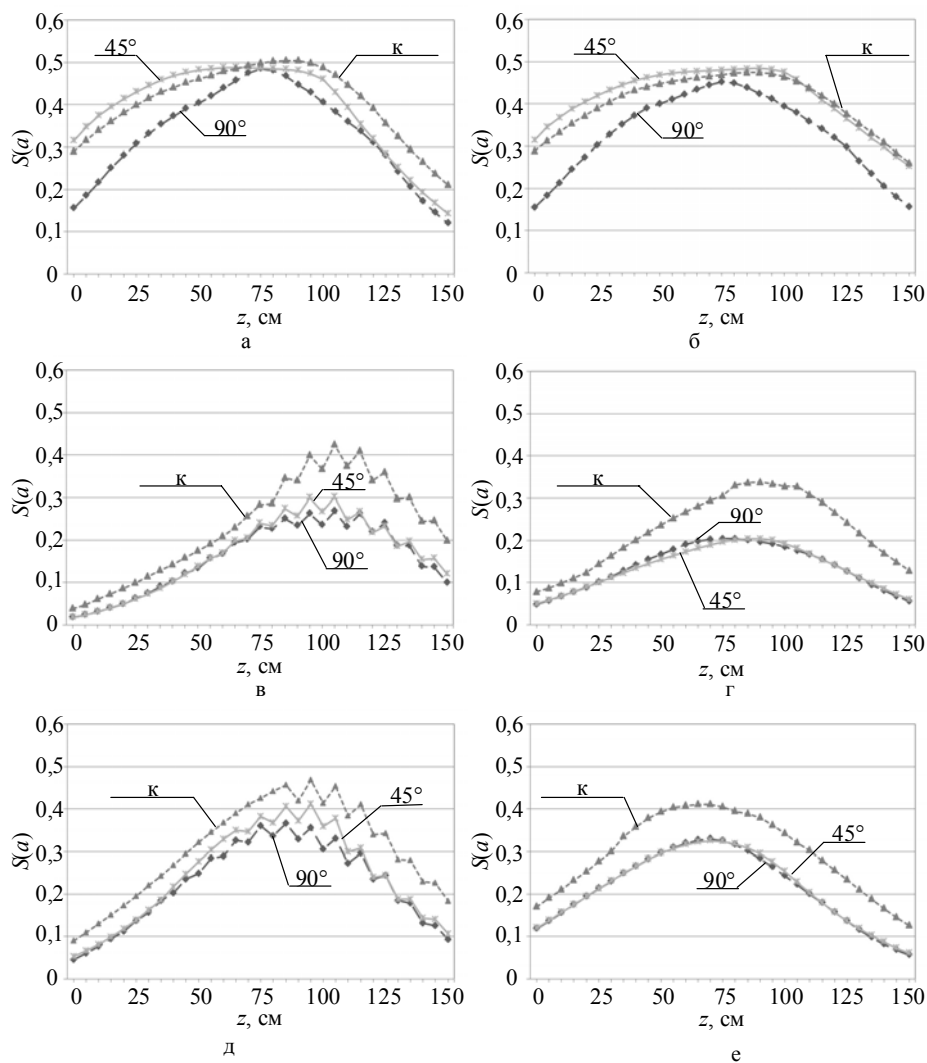


Рисунок 4 – Зависимости величины целевой функции $S(a)$ от сдвига z при различных вариантах поворота зон действия антенн и для различных паттернов размещения антенн: а – сетка, б – треугольники, в – квадрат, г – окружность, д – квадрат с антенной в центре, е – окружность с антенной в центре

ВЫВОДЫ

Разработана методика оптимизации размещения антенн для систем двумерной пространственной локализации RFID-меток при использовании комбинированного метода локализации. Используемый при этом критерий оптимальности основан на минимизации величины среднего HDOP, максимизации коэффициента покрытия зоны локализации зонами действия антенн и минимизации средней ошибки локализации алгоритма пересечений. В ходе экспериментальных исследований определено, что наилучшим среди рассмотренных паттернов размещения антенн является паттерн квадратной сетки при ориентации антенн по направлению к центру зоны локализации. В будущем планируется провести доработку методики с целью обеспечить возможность поиска оптимального размещения не только среди ряда заранее заданных паттернов, но и среди бесконечного множества нерегулярных вариантов размещения. Для этого планируется использовать эвристические алгоритмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wang C. S. Goal-programming-driven genetic algorithm model for wireless access point deployment optimization / C. S. Wang, C. T. Chang // *Mathematical problems in engineering*. – 2012. – Vol. 2012. – P. 1–14.
2. Tak S. Modeling and performance study of AP placement framework for indoor location-awareness and network performance / S. Tak, T. Kim, D. Kim, Y. Kim // *8th International conference on ubiquitous information management and communication*. Siem Reap, 9–11 January 2014 : proceedings. – Siem Reap, 2014. – P. 1–8.
3. Botero O. RFID network topology design based on Genetic Algorithms / O. Botero, H. Chaouchi // *2011 IEEE International conference on RFID-technologies and applications (RFID-TA)*. Sitges, 15–16 September 2011 : proceedings. – Sitges, 2011. – P. 300–305.
4. Fang S. H. A novel access point placement approach for WLAN-based location systems / S. H. Fang, T. N. Lin // *2010 IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC)*, Sydney, 18–21 April 2010 : proceedings. – Sydney, 2010. – P. 1–4.
5. Ji Y. Optimal sniffers deployment on wireless indoor localization / Y. Ji, S. Biaz, S. Wu, B. Qi // *16th International conference on*

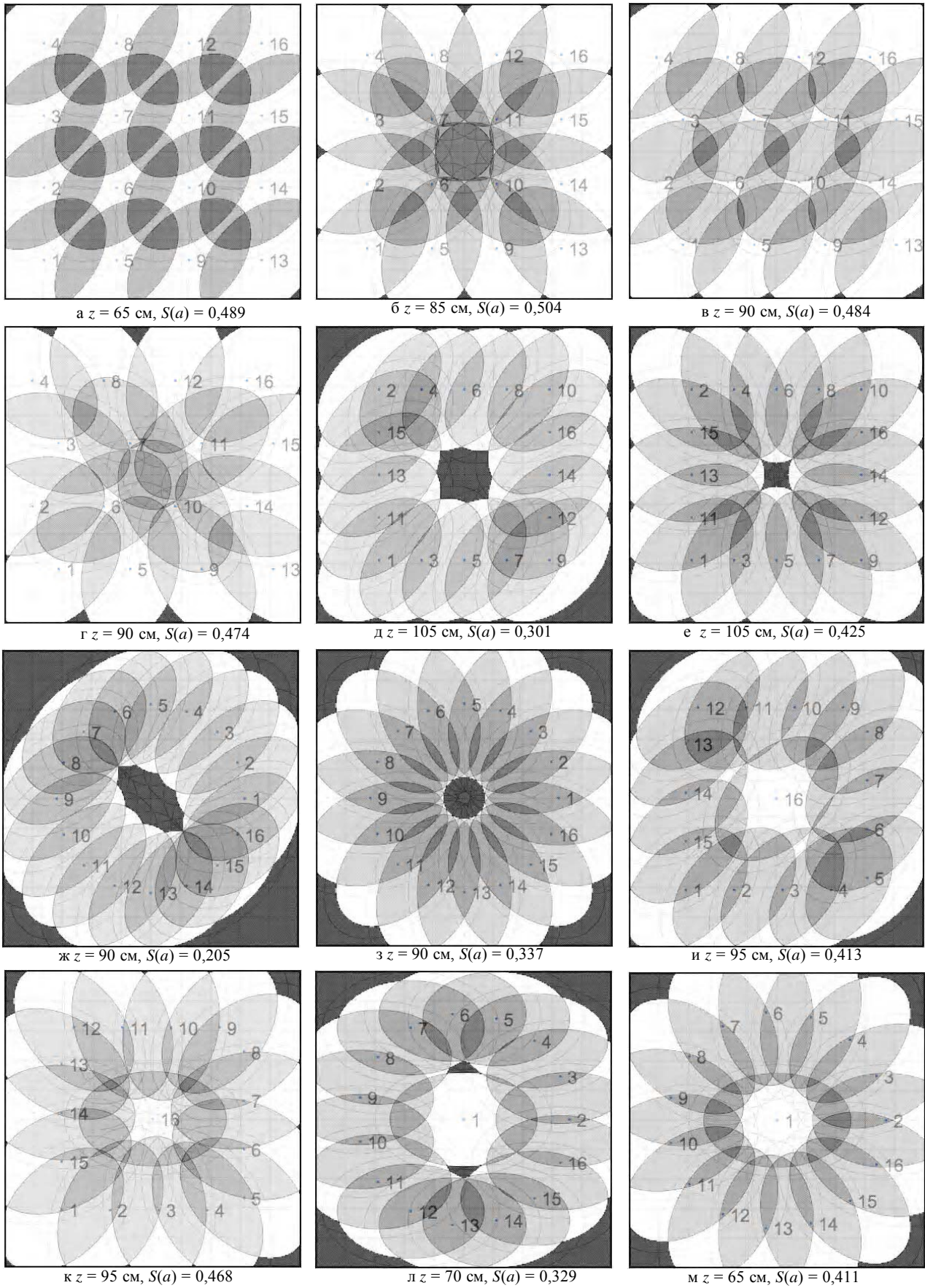


Рисунок 5 – Наилучшие варианты размещения антенн среди различных паттернов: а, б – сетка, в, г – треугольники, д, е – квадрат, ж, з – окружность, и, к – квадрат с антенной в центре, л, м – окружность с антенной в центре

- computer communications and networks, 2007. ICCCN 2007, Honolulu, 13–16 August 2007 : proceedings. – Honolulu, 2007. – P. 251–256.
6. Farkas K. Optimization of Wi-Fi access point placement for indoor localization / K. Farkas, A. Huszak, G. Godor // *Informatics & IT today*. – 2013. – Vol. 1, No. 1. – P. 28–33.
 7. Battiti R. Optimal wireless access point placement for location-dependent services / R. Battiti, M. Brunato, A. Delai // *Information engineering and computer science*. – 2003. – 12 p.
 8. Savochkin D.A. Combinational RFID-based localization using different algorithms and measurements / D. A. Savochkin // *20th International conference on microwaves, radar, and wireless communications*. Gdansk, 16-18 June 2014 : proceedings. – Gdansk, 2014. – P. 238–243.
 9. Levanon N. Lowest GDOP in 2-D scenarios / N. Levanon // *IEE Proceedings-radar, sonar and navigation*. – 2000. – Vol. 147, No. 3. – P. 149–155.

Статья поступила в редакцию 21.01.2015.

После доработки 02.02.2015.

Савочкін Д. О.¹, Гімпілевич Ю. Б.²

¹Аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки та телекомунікацій Севастопольського національного технічного університету, Севастополь, Україна

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІЩЕННЯ АНТЕН ДЛЯ СИСТЕМ ПРОСТОРОВОЇ ДВОВИМІРНОЇ RFID-ЛОКАЛІЗАЦІЇ

Розроблено методику пошуку оптимального розміщення антен для систем просторової локалізації на основі технології радіочастотної ідентифікації (RFID). Методика заснована на мінімізації середньої помилки при реалізації комбінованого методу локалізації, що включає в себе алгоритм трилатерації, алгоритм відбитків і алгоритм перетинів. У ході проведеного обчислювального експерименту встановлено, що серед низки розглянутих патернів оптимальним для квадратної зони локалізації є варіант розміщення антен у вигляді квадратної сітки при орієнтації зон дії антен у напрямку до центру зони локалізації.

Ключові слова: RFID, локалізація, оптимізація, комбінований метод, розміщення антен.

Savochkin D. A.¹, Gimpilevich Yu. B.²

¹Post-graduate student of Department of Radioelectronics and Telecommunications, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of Department of Radioelectronics and Telecommunications, Sevastopol National Technical University, Sevastopol, Ukraine

OPTIMIZATION OF ANTENNA DEPLOYMENT FOR TWO-DIMENSIONAL RFID LOCALIZATION

This paper presents a method of search for the optimal antenna deployment for use in spatial localization systems based on the radio frequency identification technology (RFID). It involves minimizing the average error of a combinational localization method consisted of a trilateration algorithm, fingerprinting algorithm, and an intersectional algorithm. During the computational experiment we found the optimal solution among several antenna deployment patterns for a square localization field. The solution is a grid pattern with antenna interrogation zones oriented towards the field center.

Keywords: RFID, localization, optimization, combinational method, antenna deployment.

REFERENCES

1. Wang C. S., Chang C. T. Goal-programming-driven genetic algorithm model for wireless access point deployment optimization, *Mathematical problems in engineering*, 2012, Vol. 2012, pp. 1–14.
2. Tak S., Kim T., Kim D., Kim Y. Modeling and performance study of AP placement framework for indoor location-awareness and network performance, *8th International conference on ubiquitous information management and communication*. Siem Reap, 9–11 January 2014 : proceedings, Siem Reap, 2014, pp. 1–8.
3. Botero O., Chaouchi H. RFID network topology design based on Genetic Algorithms, *2011 IEEE International conference on RFID-technologies and applications (RFID-TA)*. Sitges, 15–16 September 2011, proceedings, Sitges, 2011, pp. 300–305.
4. Fang S. H., Lin T. N. A novel access point placement approach for WLAN-based location systems, *2010 IEEE Wireless communications and networking conference (WCNC)*. Sydney, 18–21 April 2010, proceedings, Sydney, 2010, pp. 1–4.
5. Ji Y., Biaz S., Wu S., Qi B. Optimal sniffers deployment on wireless indoor localization, *16th International conference on computer communications and networks*. Honolulu, 2007, ICCCN 2007, 13–16 August 2007, proceedings, Honolulu, 2007, pp. 251–256.
6. Farkas K., Huszak A., Godor G. Optimization of Wi-Fi access point placement for indoor localization, *Informatics & IT today*, 2013, Vol. 1, No. 1, pp. 28–33.
7. Battiti R., Brunato M., Delai A. Optimal wireless access point placement for location-dependent services, *Information engineering and computer science*, 2003, 12 p.
8. Savochkin D. A. Combinational RFID-based localization using different algorithms and measurements, *20th International conference on microwaves, radar, and wireless communications*. Gdansk, 16–18 June 2014, proceedings, Gdansk, 2014, pp. 238–243.
9. Levanon N. Lowest GDOP in 2-D scenarios, *IEE Proceedings-radar, sonar and navigation*. 2000, Vol. 147, No. 3, pp. 149–155.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 528.85

Шама Є. О.

Аспірант кафедри радіотехніки та телекомунікацій Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

ЗМЕНШЕННЯ РОЗМІРНОСТІ ОЗНАКОВОГО ПРОСТОРУ РОСЛИННИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ФАКТОРНОГО АНАЛІЗУ

У статті показана можливість зменшення кількості інформативних ознак для багатоспектральних даних рослинного походження за допомогою методів факторного аналізу. Для дослідження були використані реальні коефіцієнти відбиття кукурудзи, мишію та амброзії. Перед використанням метода факторного аналізу була виконана процедура перевірки відповідності початкового набору даних до нормального закону розподілу. Факторний аналіз проводився окремо для трьох рослин: кукурудзи, мишію та амброзії. Для кожної рослини встановлені розміри нового простору, а також надана якісна оцінка кореляції між елементами нового і початкового простору даних. Перехід до нового ознакового простору виконувався за умови, що рівень інформативності підтримувався на рівні не менше 80% по відношенню до початкового набору даних. Для кожного виду рослини була проведена процедура перевірки правильності вибору кількості ознак за допомогою розрахунку спільностей. Отримані результати можуть бути використані при побудові класифікатора рослинних об'єктів.

Ключові слова: факторний аналіз, ознаковий простір, спектральні коефіцієнти яскравості, ознаки, класифікатор.

НОМЕНКЛАТУРА

a_{ik} – факторні навантаження i -го значення k -го фактору;

F_k – k -й загальний фактор;

h_i^2 – спільність i -го значення;

N – кількість вимірювань, що зроблені для окремої рослини за допомогою спектрометра;

P – кількість факторів;

S_i^2 – специфічність i -го значення;

S_j – стандартне відхилення j -го значення;

$x_{\bullet j}$ – середнє значення j -ї ознаки;

X_j – j -та спостережувана змінна;

z_{ij} – компоненти матриці стандартизованих початкових даних;

U_j – j -та складова специфічних факторів;

λ_i – i -та довжина хвилі;

μ_i – i -й вимірюваний спектральний коефіцієнт відбиття;

$\mu_{i,\max}$ – i -й максимальний вимірюваний спектральний коефіцієнт відбиття;

$\mu_{i,\min}$ – i -й мінімальний вимірюваний спектральний коефіцієнт відбиття;

ω_i – i -й нормований спектральний коефіцієнт відбиття.

ВСТУП

Відомо, що велика розмірність ознакового простору становить суттєву проблему для багатьох процедур розпізнавання образів, зокрема рослинних об'єктів.

Об'єктом дослідження є процес зменшення розмірності простору ознак для побудови розпізнавальних моделей.

На сьогоднішній день зростає кількість теоретичних робіт по методам зменшення розмірності ознакового простору для класифікації образів [1]. Деякі з цих методів прагнуть сформувати нові ознаки на основі лінійних комбінацій старих ознак, а інші прагнуть створити меншу підмножину початкових ознак. Основна проблема цієї теорії полягає в тому, що поділ розпізнавання образів на виділення ознак, а потім класифікацію теоретично є штучним. Повністю оптимальний видільник ознак є не чим іншим, як оптимальним класифікатором. А тому, вирішивши задачу зменшення інформативних ознак, при збереженні необхідного рівня інформативності, можна спростити задачу побудови класифікатора рослинних об'єктів.

Більшість запропонованих методів зменшення розмірності [1] забезпечують функціональне відображення, так що можливо знайти відображення довільного вектора ознак [2]. Класичними процедурами зменшення розмірності є аналіз головних компонент і факторний аналіз

[3], обидва з яких зменшують розмірність шляхом формування лінійних комбінацій ознак. Метою аналізу головних компонент (розкладання Кархунена-Лоева) є знаходження зображень у просторі меншої розмірності, яке враховує дисперсію ознак. Метою факторного аналізу є знаходження зображень у просторі меншої розмірності, яке враховує кореляцію між ознаками. Різні алгоритми факторного аналізу об'єднані тим, що в усіх них відбувається перехід до нового базису в початковому n -мірному просторі, тому у статті буде використаний факторний аналіз, так як він є загальним методом зменшення розмірності серед методів головних компонентів та факторного аналізу.

Предметом дослідження є процедура зменшення розмірності ознакового простору коефіцієнтів відбиття рослинних об'єктів за допомогою методів факторного аналізу. При цьому, початкова (перед проведенням процедури зменшення ознакового простору) розмірність коефіцієнтів відбиття рослинних об'єктів, складає 256, яка визначається роздільною здатністю вимірювального приладу – спектрометра.

Мета роботи полягає у дослідженні можливості зменшення кількості інформаційних ознак за допомогою використання методів факторного аналізу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай ми маємо масив експериментально отриманих даних коефіцієнтів відбиття рослинних об'єктів X_j . Розмірність масиву коефіцієнтів відбиття рослинних об'єктів – $256 \times N$, де 256 – розмірність ознакового простору (визначається роздільною здатністю спектрометра). Тоді, задача зменшення ознакового простору рослинних об'єктів, полягає у тому, щоб отримати масив меншої розмірності даних для відповідної рослини, за допомогою якого можна зробити процедуру розпізнавання із заздалегідь встановленим рівнем вірогідності. Тобто необхідно згенерувати вихідний масив даних F_k , який був би меншим за розміром і за допомогою якого можливо було б зробити процедуру розпізнавання рослини за видом. Так, якщо вихідний масив можливо описати

за допомогою лінійного перетворення $F_k = \sum_{j=1}^m a_{jk} \cdot X_j$,

то вирішувана задача в рамках цієї статті полягає в здобутті нового масиву, у якого $m \ll N$ і $m \rightarrow \min$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Найбільш відомими методами розпізнавання є метод потенціальних функцій [1, 7], дискримінантний аналіз [1, 2, 7], метод граничних спрощень [8], регресійний аналіз [2], метод групового урахування аргументів [7], нейромереві методи [1, 2]. Порівняльний аналіз основних методів розпізнавання – кореляційних, ознакових (статистичних і детермінованих), нейромеревих [2] – дозволяє зробити висновок, що метод факторного аналізу є найбільш ефективним для вирішення завдань розпізнавання [9]. Крім того, факторні методи забезпечують більш високу стійкість роботи системи розпізнавання в умовах перешкод і дозволяють об'єднати процедуру розпізнавання і процедуру зменшення ознак.

Розпізнавання рослинних об'єктів за допомогою факторного аналізу розглянуто у ряді робіт [3, 5, 9]. Але в цих роботах класифікація рослинних об'єктів проводилась лише на два класи (корисну культуру і бур'яни). Проте на практиці доцільною є класифікація на більшу кількість класів, що обумовлюється необхідністю використання різних гербіцидів для різних видів бур'янів. Більша кількість класів обумовлена тим, що для боротьби з бур'янами при хімічній обробці застосовують різні види гербіцидів. Необхідність розпізнавання рослинних об'єктів на три класи визначається також алгоритмом роботи інтелектуального обприскувача для обробки просяних культур в рослинництві. Також процедура розпізнавання в моделях на основі дискримінантного аналізу [1, 6], нейронної мережі [2, 4, 8], регресійного аналізу [7], як правило, характеризується великою надлишковістю і в них висувуються високі вимоги до обчислювальних ресурсів. Для того, щоб виключити недоліки цих методів, доцільно застосувати процедуру факторного аналізу для зменшення надлишковості даних моделі при розпізнаванні рослинних об'єктів, що скоротить час навчання та суттєво збільшить швидкість прийняття рішень і дозволить зменшити вимоги до обчислювальних ресурсів.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Факторний аналіз дозволяє розв'язати дві важливі проблеми, які виникають під час дослідження: компактно описати об'єкт виміру і в той же час всебічно. За допомогою факторного аналізу можливе виявлення прихованих змінних факторів, що відповідають за наявність лінійних статистичних кореляцій між спостережуваними змінними [4].

При проведенні факторного аналізу, в один чинник об'єднуються змінні, що сильно корелюють між собою, як наслідок відбувається перерозподіл дисперсії між компонентами і виходить максимально проста і наявна структура факторів. Після об'єднання корельованість компонентів, всередині кожного фактору між собою, буде вищим, ніж їх корельованість з компонентами з інших факторів. Ця процедура також дозволяє виділити латентні змінні, що може бути корисним при побудові класифікатора рослинних об'єктів.

Таким чином можна виділити дві мети факторного аналізу:

- визначення взаємозв'язків між змінними (класифікація змінних);
- зменшення кількості змінних необхідних для опису даних.

При факторному аналізі, коли необхідно подати початкові змінні у вигляді лінійної комбінації факторів F , які розраховані так, щоб найкращим способом (з мінімальною погрішністю) подати X , можна показати [10]:

$$X_j = \sum_{k=1}^p a_{jk} \cdot F_k + U_j, \quad k=1,2,\dots,p; \quad j=1,2,\dots,m. \quad (1)$$

Одним з найбільш поширених методів пошуку факторів є метод головних компонент (саме цей метод буде використовувати в межах факторного аналізу). Його основна відмінність від факторного аналізу полягає в тому,

що головні компоненти F_k пов'язані із спостережуваними змінними X_j лінійними функціями перетворення:

$$X_j = \sum_{k=1}^p a_{jk} \cdot F_k \text{ і } F_k = \sum_{j=1}^m a_{jk} \cdot X_j. \quad (2)$$

Суть цього методу полягає в заміні корельованих компонентів некорельованими чинниками. Іншою важливою характеристикою методу є можливість обмежитися найбільш інформативними головними компонентами і виключити інші з аналізу, що спрощує інтерпретацію результатів. Цінність методу головних компонентів також в тому, що він – єдиний математично обґрунтований метод факторного аналізу [5]. Але слід зауважити, що за твердженням деяких дослідників, метод головних компонентів не є методом факторного аналізу, оскільки не розщеплює дисперсію індикаторів на загальну і унікальну [6].

Метод головних компонент є простішим в розрахунках і інтерпретації, але одна з головних труднощів його використання – необхідність перетворення початкових даних, які представлені в різних одиницях виміру, в величини, які можливо співставити. Традиційним методом перетворення, але не обов'язковим, є нормування по стандартним відхиленням, коли матриця Z стандартизованих початкових даних визначається за формулою:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\cdot j}}{S_j}, j=1,2,\dots,m; i=1,2,\dots,n. \quad (3)$$

Також слід зауважити, що при проведенні факторного аналізу за допомогою методу головних компонент може використовуватись така характеристика, як спільність, яка визначається формулою:

$$h_i^2 = \sum_{k=1}^M a_{ik}^2 + S_i^2, \quad (4)$$

Тобто спільність є дисперсією змінних, обумовленою факторами, а специфічність являє собою частину дисперсії, яка обумовлена випадковими помилками або змінними, неврахованими в моделі. Відповідно до постановки завдання необхідно шукати такі фактори, при яких сумарна спільність є максимальною, а специфічність – мінімальною.

У роботі [7] виділяють такі умови проведення факторного аналізу: всі ознаки повинні бути кількісними; кількість спостережень має бути не менше як у два рази більшою кількості змінних; вибірка має бути однорідною; факторний аналіз здійснюється по корелюючими змінними.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виміри спектральних коефіцієнтів відбиття проводилися влітку 2013 року на полі ТОВ «Агрофірма «Матвіївка» (Запорізька область, Україна). В якості корисної культури була обрана кукурудза. Також на полі зустрічались такі бур'яни: амброзія, берізка, мишій, пирій, пастуша сумка, суріпиця та ін. Серед бур'янів, для дослідження, були відібрані мишій та амброзія, оскільки вони склали переважну долю бур'янів на полі. Вимірювання проводилися максимально наближеним до реальних польових робіт на самохідній установці: швидкість руху 0,5–

1 м/с, відстань об'єктива до рослини – приблизно 0,3 м. Переміщення об'єктива приймача спектрометра від однієї рослини до іншої в продовж рядка проводилося рівномірно, без ривків. Вимірювання проводилися впродовж проходу міжряддя як в одному напрямку так і в іншому. Пристрій, за допомогою якого проводилися вимірювання спектральних коефіцієнтів відбиття, містив спектрометр Red Tide650 з волоконно-оптичним кабелем P200 – 2 – UV – VIS і лінзою 74 – VIS (фірма Ocean Optics) та веб-камеру A4Tech PK-838G.

Вимірювання спектральних характеристик рослин проводилися за допомогою приладу, який автоматично з періодом 1 с зберігав поточну інформацію (коефіцієнт відбиття і координати місця) і фотографію зовнішнього вигляду рослини.

З усіх експериментальних даних, для подальшого дослідження було відібрано 2268 спектральних коефіцієнтів відбиття рослин. Критерієм відбору була можливість візуального визначення виду рослин по зображеннях і формі спектральної кривої. Назва і кількість рослин, які були відібрані для подальшого дослідження, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Видовий склад досліджуваних рослин

Вид рослини	Латинська назва	Кількість екземплярів
Кукурудза	<i>Zéa máys</i>	699
Амброзія	<i>Ambrósia artemisiifólia</i>	882
Мишій	<i>Setaria viridis</i>	687
Усього		2268

РЕЗУЛЬТАТИ

За допомогою спектрометра експериментально були отримані спектральні коефіцієнти відбиття рослин, які були потім експериментально оброблені. Було отримано три матриці: матриця коефіцієнтів відбиття для кукурудзи – 699×256, матриця коефіцієнтів відбиття для мишію – 687×256 і матриця коефіцієнтів відбиття для амброзії – 882×256. Наступним етапом було нормування цих даних. Кожна з трьох матриць піддавалася нормуванню за лінійним законом:

$$\omega_i = \frac{\mu_i - \mu_{i,\min}}{\mu_{i,\max} - \mu_{i,\min}}. \quad (5)$$

Перед проведенням факторного аналізу необхідно перевірити генеральну сукупність даних для кожної рослини на відповідність нормальному розподілу.

Нормальність розподілу даних для кукурудзи, мишію і амброзії була перевірена у статистичному пакеті програм. Для перевірки розподілу на нормальність використовувались нормовані значення мишію. Результати перевірки наведені на рис. 1 і в табл. 2.

Таким чином, аналіз досліджуваного розподілу вибірок визначив його наближеність до нормального, на що вказують як вид гістограми, так і значення коефіцієнтів асиметрії та ексцесу: вони одного порядку по відношенню до початкових значень вибірок, а також мають малі значення стандартних помилок. Для усіх видів аналізу статистично значимими вважали відмінності при $P < 0,05$.

Набір початкових ознак для кукурудзи та амброзії також піддавався аналогічній процедурі перевірки на нормальність і також було встановлено наближеність роз-

поділів цих рослин до нормального закону (що не дивно, бо природа походження і умови виміру коефіцієнтів яскравості для усіх трьох рослин є однаковими).

Наступним етапом було проведення факторного аналізу. При проведенні факторного аналізу в програмному пакеті були встановлені наступні параметри: метод виділення факторів – компонентний аналіз; максимальна кількість факторів – 256; мінімальне власне число – 0.

Факторний аналіз будемо використовувати окремо для кожного виду рослинних об'єктів: корисної культури (кукурудза), однодольного бур'яну (мишії), дводольного бур'яну (амброзія). Умовою переходу від початкового *n*-мірного простору до нового ознакового простору, буде

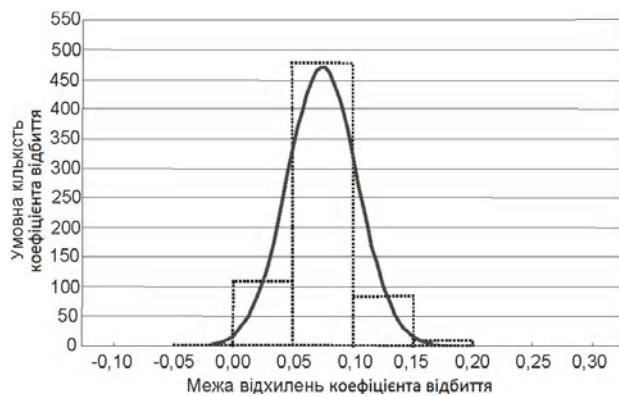


Рисунок 1 – Гістограма усередненої вибіркової сукупності значень мишію. Суцільна лінія – крива нормального закону розподілу

рівень інформативності нового простору, який повинен бути не менше 80% по відношенню до початкового.

Рівень інформативності факторного ознакового простору встановимо рівним 80% по відношенню до початкового. Це є достатнім рівнем інформативності при переході від одного ознакового простору до іншого [8]. Для визначення кількості факторів, які можна залишити і при цьому відповідати встановленому рівню інформативності визначимо вклад головних компонент для кожної рослини.

На таблицях 3 та 4 в перших стовбцях наведені оцінки власних чисел, в третьому стовбці – накопичені значення власних чисел, у другому і у четвертому стовбцях – відносний вклад кожної головної компоненти та накопичений відносний вклад відповідно.

У першому наближенні накопичений відносний вклад можна вважати рівнем інформативності нового ознакового простору по відношенню до початкового (для більш точного значення рівня інформативності необхідно зробити перерахунок через власні числа з урахуванням довірчих інтервалів) [9]. Як бачимо, для досягнення встановленого рівня інформативності, для кукурудзи можна залишити 3 фактора, для мишію – 8 факторів і для амброзії – 2 фактора.

Для інтерпретації нових ознак необхідно провести аналіз матриці факторних навантажень з урахуванням нової кількості факторів для кожної рослини.

5 ОБГОВОРЕННЯ

Як бачимо з таблиць 5 і 6, для кукурудзи перший фактор найбільш корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 353–464 нм, 631–704 нм і

Таблиця 2 – Результати розрахунку критеріїв асиметрії та ексцесу для мишію

Змінна	Середнє значення	Мінімум	Максимум	Станд. відхилення	Асиметрія	Похибка асиметрії	Ексцес	Похибка ексцесу
1	0,083706	0	0,600420	0,071435	1,47213	0,093251	5,46625	0,186233
2	0,015076	0	0,124923	0,018389	1,58612	0,093251	3,48430	0,186233
3	0,013580	0	0,153521	0,018177	2,09398	0,093251	7,26450	0,186233
4	0,057173	0	0,203566	0,025330	1,11122	0,093251	3,16737	0,186233
5	0,054378	0	0,243602	0,025989	1,15261	0,093251	4,32015	0,186233
6	0,059009	0	0,225000	0,027683	1,38278	0,093251	5,47856	0,186233
7	0,054660	0	0,204996	0,026185	0,82713	0,093251	1,94301	0,186233

Таблиця 3 – Вклад головних компонент в сумарну дисперсію початкових ознак для кукурудзи і для мишію

№ фактору	Власні значення для кукурудзи				Власні значення для мишію			
	Значення	% від загального	Накопичене значення	% накопичення	Значення	% від загального	Накопичене значення	% накопичення
1	163,3985	63,827	163,3985	63,827	101,1679	39,5187	101,1679	39,518
2	29,9047	11,681	193,3032	75,509	70,7136	27,6224	171,8815	67,141
3	13,4457	5,252	206,7489	80,761	15,0487	5,8784	186,9302	73,019
4	2,9825	1,165	209,7314	81,926	9,94743	3,7009	196,4046	76,720
5	1,5078	0,588	211,1577	82,515	4,8562	1,8969	201,2607	78,617
6	0,9185	0,358	212,1577	82,874	1,5239	0,5952	202,7847	79,212
7	0,8381	0,327	212,9958	83,201	1,4546	0,5682	204,2393	79,781
8	0,7767	0,303	213,7725	83,504	1,0522	0,4110	205,2914	80,192
9	0,7139	0,278	214,4864	83,783	1,0216	0,3990	206,3130	80,591
10	0,6942	0,271	215,1806	84,057	0,9499	0,3710	207,2629	80,962
11	0,6580	0,257	215,8387	84,312	0,8506	0,3322	208,1135	81,294
12	0,6277	0,245	216,4664	84,557	0,8196	0,3201	208,9331	81,614
13	0,5955	0,232	217,0618	84,789	0,7968	0,3112	209,7298	81,925
14	0,5709	0,223	217,6327	85,012	0,7567	0,29558	210,4865	82,221
15	0,5537	0,216	218,1864	85,229	0,7094	0,2771	211,1959	82,498
16	0,5488	0,214	218,7352	85,443	0,7006	0,2773	211,8965	82,772
17	0,5163	0,201	219,2515	85,645	0,6876	0,2685	212,5841	83,040
18	0,5048	0,197	219,7563	85,842	0,6605	0,2580	213,2446	83,298
19	0,4910	0,191	220,2474	86,034	0,6506	0,2541	213,8951	83,552

Таблиця 4 – Вклад головних компонент в сумарну дисперсію початкових ознак для амброзії

№ фактору	Власні значення для амброзії			
	Значення	% від загального	Накопичене значення	% накопичення
1	145,327	56,76864	145,3277	56,7686
2	79,2253	30,94740	224,5530	87,7160
3	13,0125	5,08299	237,5655	92,7990
4	6,7203	2,62510	244,2858	95,4241
5	3,1865	1,24471	247,4722	96,6688
6	1,4380	0,56172	248,9103	97,2306
7	0,9799	0,38276	249,8901	97,6133
8	0,7389	0,28863	250,6290	97,9020
9	0,6168	0,24094	251,2458	98,1429
10	0,5851	0,22856	251,8309	98,3715
11	0,3474	0,13571	252,1783	98,5072
12	0,2324	0,09077	252,4107	98,5979
13	0,1990	0,07772	252,6097	98,6757
14	0,1852	0,07233	252,7948	98,7480
15	0,17764	0,06892	252,9713	98,8169
16	0,1617	0,06318	253,1330	98,8801
17	0,1588	0,06203	253,2918	98,9421
18	0,1416	0,05530	253,4334	98,9974
19	0,1335	0,05215	253,5669	99,0496
20	0,1194	0,04475	253,6862	99,0962
21	0,1146	0,06318	2553,8008	99,1409

Таблиця 5 – Факторні навантаження для кукурудзи та для амброзії

Змінні	Факторні навантаження (для кукурудзи)			Факторні навантаження (для амброзії)	
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 1	Фактор 2
1	0,3154	-0,00652	0,13011	-0,5882	0,0373
2	-0,9133	0,00270	-0,02649	-0,3287	-0,20267
3	-0,8951	-0,01129	-0,02044	-0,3214	-0,17772
4	-0,9299	0,02037	0,01800	-0,8883	-0,26265
5	-0,9362	0,02430	0,06539	-0,8995	-0,28255
6	-0,9240	0,02867	0,07868	-0,8882	-0,26591
7	-0,9262	0,02683	0,00677	-0,8948	-0,27936
8	-0,9344	0,04891	0,06100	-0,8981	-0,27451
9	-0,9203	0,03827	0,05974	-0,9045	-0,27820
10	-0,9367	0,02823	0,04644	-0,9076	-0,27883
Нова 1	-0,9327	0,01571	0,15592	-0,9072	-0,27496
Нова 2	-0,9316	0,02617	0,09776	-0,9078	-0,27583
Нова 3	-0,9281	0,04715	0,16311	-0,9086	-0,27435
Нова 4	-0,9229	0,04346	0,14530	-0,9095	-0,27747
Нова 5	-0,9211	0,03981	0,18024	-0,9131	-0,27920
Нова 6	-0,9326	0,03498	0,12592	-0,9163	-0,28652
Нова 7	-0,9298	0,05401	0,13759	-0,9231	-0,28774
Нова 8	-0,9184	0,02574	0,20173	-0,9204	-0,27198
Нова 9	-0,9200	0,06748	0,18150	-0,9230	-0,28410
Нова 10	-0,9235	0,09543	0,17181	-0,9256	-0,28923
Нова 11	-0,8994	0,10865	0,22821	-0,9270	-0,28758
Нова 12	-0,8508	0,08934	0,31835	-0,9261	-0,28418
Нова 13	-0,9194	0,10535	0,08860	-0,9284	-0,29927
Нова 14	-0,9212	0,10979	0,11372	-0,9272	-0,30349

802–1050 нм, другий фактор – корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 718–753 нм і третій фактор – корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 507–540 нм.

Для миші перший фактор найбільш корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 414–504 нм, 547–683 нм і 712–850 нм; другий фактор – корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 850–1050 нм; третій фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 510–535 нм; четвертий фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 437–480 нм; п'ятий фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 400–434 нм; шостий фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 353 нм,

370 нм і 976 нм; сьомий фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 350 нм і 996 нм; восьмий фактор – з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 350–360 нм.

Для амброзії перший фактор найбільш корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 360–504 нм, 614–675 нм, 695–944 нм і 712–850 нм; другий фактор – корельований з початковими ознаками, що відповідають довжинам хвиль 495–510 нм, 535–593 нм, 678–690 нм, 947–1038 нм.

Для перевірки достатності розміру нового простору для кожної рослини, була проведена процедура розрахунку сумарної спільності і спільності по кожному фактору. Так, для амброзії сумарна спільність дорівнює 254,28, для першого фактору – 145,27, для другого фактору – 124,55. Тобто загальна спільність за двома факторами дорівнює $145,27 + 124,55 = 269,82$. Оскільки загальна спільність за двома факторами (269,82) більше ніж сумарна спільність (254,28), то розмірність ознакового простору у кількості двох обрано вірно. У табл. 7 наведено результат розрахунку спільності для амброзії. Графіки власних значень для кукурудзи, миші та амброзії наведені рис. 2–4.

Аналогічна процедура перевірки нових розмірностей була проведена для кукурудзи та миші. В результаті проведених розрахунків, розмірність ознакових просторів для кукурудзи та миші обрано вірно, оскільки для миші сума спільностей по факторам дорівнює 356,87, а сумарна спільність 224,78. Для кукурудзи: сума спільностей по факторам – 256,14, а сумарна спільність – 229,24.

6 ВИСНОВКИ

В роботі розглянута задача зменшення кількості інформаційних ознак за допомогою факторного аналізу, а саме методу головних компонентів.

В результаті проведення експериментальних досліджень встановлено, що можливо перейти до нового простору з меншою кількістю ознак при збереженні рівня інформативності не менше 80%. Так для кукурудзи

Таблиця 6 – Факторні навантаження для мишію

Змінні	Факторні навантаження (для мишію)							
	Фактор 1	Фактор 2	Фактор 3	Фактор 4	Фактор 5	Фактор 6	Фактор 7	Фактор 8
1	-0,0832	0,00065	-0,13211	0,259002	0,121068	0,141987	0,782968	-0,162445
2	-0,1140	-0,44176	-0,04021	-0,238139	-0,088848	-0,385649	-0,031048	0,477626
3	-0,0672	-0,41766	-0,03178	-0,320021	-0,026030	-0,079956	-0,299183	-0,486865
4	-0,2888	-0,64547	-0,03854	-0,235601	-0,035044	-0,041635	-0,060987	-0,088411
5	-0,3005	-0,60634	-0,03809	-0,231377	-0,056948	-0,041635	0,051629	0,100092
6	-0,3465	-0,60569	-0,10694	-0,226901	-0,054001	-0,167011	0,081305	0,191632
7	-0,3274	-0,65189	-0,05375	-0,200093	-0,124574	-0,062364	0,003541	-0,067721
8	-0,3494	-0,62809	-0,14527	-0,187012	-0,091447	-0,229901	-0,024393	-0,074242
9	-0,3689	-0,56764	-0,12693	-0,208454	-0,156561	-0,083712	0,064355	0,037291
10	-0,3340	-0,61098	-0,07223	-0,163582	-0,112814	-0,254564	0,072627	0,001780
Нова 1	-0,3455	-0,69667	-0,07004	-0,145086	-0,046614	0,036432	-0,012333	-0,037291
Нова 2	-0,3741	-0,67225	-0,14621	-0,171111	-0,099000	-0,089167	0,014638	0,001780
Нова 3	-0,4215	-0,69452	-0,18345	-0,149507	-0,070722	0,185336	-0,010266	0,020758
Нова 4	-0,4024	-0,66716	-0,13470	-0,159141	-0,091824	0,131594	-0,032505	-0,019124
Нова 5	-0,3559	-0,71232	-0,10534	-0,125823	-0,070673	0,001574	0,012386	0,117445
Нова 6	-0,4320	-0,67551	-0,11532	-0,144367	-0,127146	-0,024959	0,010995	-0,012405
Нова 7	-0,4828	-0,63595	-0,14191	-0,067666	-0,123461	0,020609	0,013794	-0,040740
Нова 8	-0,4398	-0,69172	-0,17675	-0,075642	-0,076265	0,158533	-0,037117	0,022666
Нова 9	-0,4870	-0,64593	-0,14645	-0,133559	-0,135250	0,132538	0,018388	0,037193
Нова 10	-0,5379	-0,62809	-0,12343	0,021363	-0,172884	0,028273	-0,012258	-0,042859
Нова 11	-0,5832	-0,62341	-0,17869	0,034503	-0,174038	0,156002	-0,036742	0,083318
Нова 12	-0,5296	-0,66663	-0,23535	0,018286	-0,136432	0,258610	-0,062037	0,079887
Нова 13	-0,6214	-0,53139	-0,06501	0,025591	-0,274416	0,009128	-0,000690	0,083146

Таблиця 7 – Результат розрахунку спільностей для амброзії

Змінна	Спільність для амброзії		
	Від фактора 1	Від фактора 2	Значення R-Square
1	0,345961	0,347358	0,951460
2	0,108021	0,149095	0,811392
3	0,103269	0,134854	0,855376
4	0,789116	0,858102	0,995631
5	0,809054	0,888888	0,997044
6	0,788982	0,859689	0,997014
7	0,800586	0,878628	0,997250
8	0,806656	0,882010	0,997462
9	0,818060	0,895454	0,998322
10	0,823716	0,901460	0,998506

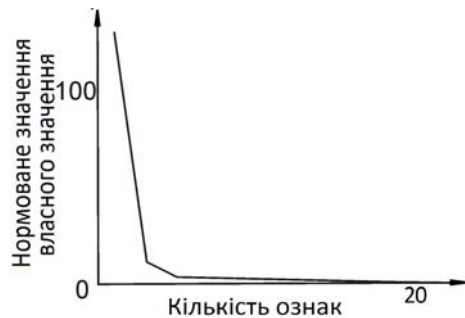


Рисунок 4 – Графік власних значень для амброзії

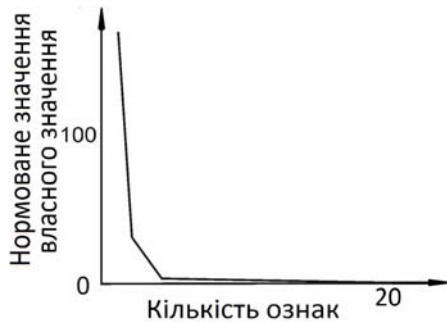


Рисунок 2 – Графік власних значень для кукурудзи

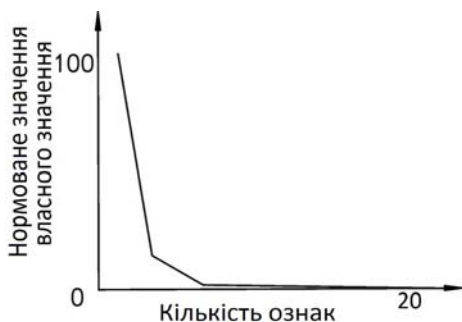


Рисунок 3 – Графік власних значень для мишію

розмірність нового простору дорівнює три, для мишію вісім, а для амброзії два. Різницю в кількості ознак для досліджуваних рослин, можна пояснити різною геометричною структурою листків, їхньою відмінністю у морфологічному та анатомічному складу, а це в свою чергу накладає відбиток на структурі багатоспектральних даних.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що результати розрахунків можуть бути корисними при побудові класифікатора рослинних об'єктів. Як зазначалось, при використанні факторного аналізу, окремі процедури виявлення ознак і класифікація не потрібні, вони вже закладені в самому методі., а тому класифікатор, в алгоритм розпізнавання рослин якого буде закладений метод факторного аналізу, буде мати більш просту схему побудови, а це в свою чергу дасть вигоду в економічному сенсі.

7 ПОДЯКИ

Стаття пов'язана з бюджетною науково-дослідною роботою Запорізького національного технічного університету «Методи, моделі та пристрої прийняття рішень в системах розпізнавання образів», номер державної реєстрації 0111U000059.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение / Н. Г. Загоруйко. – М. : Сов. радио, 1972. – 270 с.
2. Дуда Р. Распознавание образов и анализ сцен / Р. Дуда, П. Харт. – М. : Мир, 1976. – 326 с.
3. Харман Г. Современный факторный анализ / Г. Харман. – М. : Статистика, 1972. – 488 с.
4. Бююль А. SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей / А. Бююль, П. Цефель. – СПб.: ООО «ДиаСофтЮП», 2002. – 603 с.
5. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ: пер. с англ. / [Дж.-О. Ким, Ч. У. Мьюллер, У. Р. Клекка и др.; под ред. И. С. Енюкова. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 215 с.
6. Прикладная статистика. Классификация и снижение размерности. Справочное издание / [С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин]. – М. : Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
7. Купер К. Индивидуальные различия / К. Купер. – М. : Аспект Пресс, 2000. – 527 с.
8. Боровиков В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов / В. Боровиков. – СПб: Питер, 2001. – 656 с.
9. Митина О. В. Факторный анализ для психологов / О. В. Митина, И. Б. Михайловская. – М. : Учебно-методический коллектор, Психология, 2001. – 169 с.
10. Краснополюсовский А. С. Факторный классификационный анализ за методом функционально-статистичних випробувань / А. С. Краснополюсовський // Радіоелектронні та комп'ютерні системи. – 2004. – № 4. – С. 46–50.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2014.
Після доробки 27.01.2015.

Шама Е. А.

Аспирант кафедры радиотехники и телекоммуникации Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

УМЕНЬШЕНИЕ РАЗМЕРНОСТИ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ ФАКТОРНОГО АНАЛИЗА

В статье показана возможность уменьшения числа информативных признаков для многоспектральных данных растительного происхождения с помощью методов факторного анализа. Для исследования были использованы реальные коэффициенты отражения кукурузы, мышия и амброзии. Перед использованием метода факторного анализа была выполнена процедура проверки соответствия начального набора данных нормальному закону распределению. Факторный анализ проводился отдельно для трех растений: кукурузы, мышия и амброзии. Для каждого растения установлены размеры нового пространства, а также предоставлена качественная оценка корреляции между элементами нового и начального пространства данных. Переход к новому признаковому пространству производился при условии, что уровень информативности поддерживался на уровне не менее 80% по отношению к начальному набору данных. Для каждого вида растения была проведена процедура проверки правильности выбора количества признаков с помощью расчета общностей. Полученные результаты могут быть использованы при построении классификатора растительных объектов.

Ключевые слова: факторный анализ, признаковое пространство, спектральные коэффициенты яркости, признаки, классификатор.

Shama E. O.

Post-graduate Student of Department of Radio Engineering of Zaporizhzhya National Technical University, Ukraine

THE FEATURE SPACE DIMENSIONALITY REDUCTION OF PLANT OBJECTS BASED ON FACTOR ANALYSIS

A possibility of reducing the number of informative features for multispectral phytogenous data by means of the factor analysis method is shown in the article. For investigation there were used real reflection coefficients of maize, bristlegress and ambrosia. Prior to usage of the factor analysis it was performed the procedure to verify an initial set of data for conformity with distribution by the normal distribution law. The factor analysis was conducted separately for three plants: maize, bristlegress and ambrosia. Sizes of a new space were set for each plant, and also there was given quality estimation of correlation between elements of a new and initial space of the data. Transfer to new features was executed provided that a level of informativeness was maintained at a level of 80% minimum in comparison with the initial set of data. For each plant species the procedure of verification of the feature number choice correctness was performed by calculating of generalities. The obtained results can be used to construct plant objects classifier.

Keywords: factor analysis, feature space, spectral coefficients of brightness, feature, classifier.

REFERENCES

1. Zagoruyko N. G. Metody raspoznavaniya i ih primeneniye. Moscow, Sov. Radio, 1972, 270 p.
2. Duda R., Hart P. Raspoznavanie obrazov i analiz stsen. Moscow, Mir, 1976, 326 p.
3. Harman G. Sovremenniy faktorniy analiz. Moscow, Statistica. 1972, 488 p.
4. Byuyul A., Cefel P. SPSS: Iskustvo obrabotki informaci. Analiz statisticheskikh dannuh i vosstanovlenie skrutuh zakonornostey. SPb, ООО «DiaSoftYUP», 2002, 603 p.
5. Kim Dzh.-O., Muller Ch. U. Faktorniy analiz: statisticheskir metodu i prakticheskie, *Faktorniy, diskriminantniy i klasterniy analiz: sbornik rabot*; per. s angl.; Pod. red. I. S. Enyukova. Moscow, Finansu i sttistika, 1989, 215 p.
6. Aivazyan S. A., Buhstaber V. M., Yenyukov I. S., Meshalkin L. D. Prikladnaya statistika. Klassifikatsiya i snizheniye razmernosti. Spravochnoe izdaniye. Moscow, Finansy I statistika, 1989, 607 p.
7. Kuper K. Individualnie razlichiya. Moscow, Aspekt Press, 2000, 527 p.
8. Borovikov V. STATISTICA: iskusstvo analiza dannuh na komputere. Dlya professionalov, SPb: Piter, 2001, 656 p.
9. Mitina O. V., Mihaylovskaya I. B. Faktorniy analiz dlya psihologov. Moscow. Uchebno-metodicheskiy kolektor. Psihologiya, 2001, 169 p.
10. Krasnopoyasovskiy A. S. Faktorniy klasifikatsiynui analiz za metodom funnktsionalno-statustichnuh vuprobuvan, *Radioelektronni ta komputerni systemu*, 2004, No.4, pp. 46–50.

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровської металургійної академії України, Дніпропетровськ, Україна

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики та обчислювальної техніки Дніпропетровської металургійної академії України, Дніпропетровськ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКІСНИХ РЕЖИМІВ ОБРОБКИ МЕТАЛУ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОПРОДУКТИВНИХ БАГАТОПРОЦЕСОРНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Розглянуті особливості розробки і використання багато процесорної обчислювальної системи з її математичним і програмним забезпеченням для моделювання режимів термічної обробки металевих заготовок. Мета роботи полягає в розробці моделі для термічної обробки довгомірного сталевого виробу, яка може бути використана для рекристалізації та сфероїдизаційного відпалювання каліброваної сталі. Запропоновано застосування сучасних багато процесорних обчислювальних комп'ютерних технологій для збільшення швидкодії та продуктивності обчислень, що дає змогу ефективно керувати технологічними процесами. За допомогою спеціального програмного забезпечення багато процесорна система здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу, а при необхідності може контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі температур відпалювання. Багато процесорна обчислювальна система із спеціальним програмним забезпеченням містить математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності. Такі рівняння розв'язуються із застосуванням методів розщеплення. Завдяки цьому підходу розв'язок двохвимірної рівняння зводиться до послідовності інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. Застосування числово-аналітичного методу забезпечує використання економічних і стійких алгоритмів розв'язування задач даного типу. Проведено експерименти з дослідження властивостей сталевих заготовок. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропонований підхід до моделювання швидкісних режимів обробки металу для розробки нових технологічних процесів.

Ключові слова: математична модель, багато процесорна обчислювальна система, інформаційний двоспрямований інтерфейс, контроль температурного режиму металу.

НОМЕНКЛАТУРА

БПОС – багато процесорна обчислювальна система;
БК – блок керування;
ВМ ПМ – виконавчий механізм протяжного механізму;
ВМ БІВТ – виконавчий механізм блока ізотермічної витримки температури;
ВМ БП – виконавчий механізм блока підстуджування;
ВМ БН – виконавчий механізм блока нагрівання;
ОЗТ – обернена задача теплопровідності;
ХОШ – холодне об'ємне штампування;
ТО – термічна обробка;
 A_{c_1} – температура фазового перетворення металу;
 T_n – температура нагрівання поверхні зразка;
 T_k – контрольована температура зразка;
 $T(r, t)$ – температура зразка на його площі поперечного перерізу;
 W – питома потужність;
 τ – критерій Фур'є;
 ϑ – дійсне значення шуканого кореня.

ВСТУП

На сьогодні у світі спостерігається стрімке зростання кількості БПОС та їх сумарної продуктивності. Це викликано тим, що такі системи стали загальнодоступними і дешевими апаратними платформами для високопродуктивних обчислень. При цьому різко зріс інтерес до проблематики обчислювальних мереж і широко поширюється розуміння того, що впровадження таких мереж матиме величезний вплив на розвиток людського суспільства, порівняний із впливом на нього появи на початку сто-

ліття єдиних електричних мереж. У зв'язку з цим, розглядаючи проблеми освоєння багато процесорних систем, слід брати до уваги і те, що вони є першою сходинкою у створенні таких обчислювальних мереж.

Крім того, сьогодні практика висуває перед ученими-прикладниками різного роду проблеми, повне вирішення яких в більшості випадків можливе лише за рахунок застосування багато процесорних обчислювальних комплексів. Так, наприклад, у металургійному виробництві відбувається багато найрізноманітніших і взаємопов'язаних процесів. У першу чергу, це технології виплавки й розливання залізобуглецевих сплавів, нагрівання, прокатки й термічної обробки металопродукції та ін. Виробнича практика свідчить, що ні інтенсифікація процесів металургійного виробництва, ні конструктивне вдосконалення різноманітного металургійного устаткування неможливі без вивчення й аналізу явищ тепло- та масообміну. В той же час, розв'язування зазначених задач за допомогою відомих стандартних підходів являє собою складну проблему, подолання якої можливе тільки за рахунок застосування сучасних багато процесорних обчислювальних комп'ютерних технологій. При цьому одна з основних особливостей застосування таких технологій полягає у збільшенні швидкодії та продуктивності обчислень. Висока продуктивність обчислень дозволяє розв'язувати багатовимірні задачі, а також задачі, які вимагають великої кількості процесорного часу. Швидкодія дає змогу або ефективно керувати технологічними процесами, або взагалі створити передумови для розробки нових перспективних технологічних процесів.

У зв'язку з цим розробка й використання багатопроекторних обчислювальних комплексів з їх математичним та програмним забезпеченням є актуальною проблемою, що дозволяє значно скоротити кількість експериментальних досліджень і час, потрібний на їх проведення, а це дозволяє одержати необхідну інформацію для створення та впровадження різних технологічних нововведень.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

В даній роботі розглядається проблема впровадження нових технологічних процесів термічної обробки металу. Для цього необхідно створити модель ТО металу, яку використовують при виготовленні високоміцних кріпильних виробів методом ХОШ без завершальної термічної обробки. Така модель має на меті поліпшити технологічні властивості металопрокату за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу. До того ж технологічний процес термічної обробки сталі повинен набувати таких переваг, як висока продуктивність, знижене енергоспоживання, поліпшення експлуатаційних характеристик. Цього можна досягти завдяки застосуванню багатопроекторної обчислювальної системи, виконаної у вигляді окремого модуля. За допомогою спеціального програмного забезпечення багатопроекторна система здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу, а при необхідності може контролювати тепловий режим обробки сталі в інтервалі температур відпалювання.

Використання багатопроекторної обчислювальної системи з її програмним забезпеченням дозволить на основі математичної моделі процесу нагрівання зразка вже у виробничих умовах контролювати нагрівання дроту до моменту його переходу в аустенітний стан та настання температури фазової перекристалізації на всій площині перерізу довгомірного сталевго виробу, а потім здійснювати контроль необхідного режиму ізотермічної витримки в інтервалі температур відпалювання теж на всій площині перерізу зразка.

Застосування установки, що забезпечує реалізацію режиму сфероїдизівного відпалювання, зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, а це створює необхідні механічні властивості металу, потрібні для подальшого виконання холодної деформації. Разом з тим багатопроекторна обчислювальна система із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база повинна включати математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності, тобто

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + W, \quad (1)$$

при цьому критерій Фур'є $\tau = \frac{at}{R^2}$, якщо $\tau > 0$; W – питома потужність джерела тепла, Вт/м².

Крайові умови цієї задачі мають такий вигляд:

$$\begin{aligned} T(0, r, z) &= f(r, \tau); \\ T(\tau, 1, z) &= \text{var}; \\ \frac{\partial T(\tau, 0, z)}{\partial r} &= 0; \\ T(\tau, 0, z) &\neq 0. \end{aligned}$$

Рівняння (1) необхідно розв'язувати із застосуванням методів розщеплення, суть яких полягає в редукції складного оператора (1) до простих. Завдяки цьому підходу необхідно звести розв'язок даного рівняння до послідовності інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. Застосування числово-аналітичного методу повинно забезпечити використання економічних і стійких алгоритмів розв'язування задач даного типу.

Отже, основна мета даної роботи полягає в розробці моделі ТО довгомірного сталевго виробу, яка може бути використана для рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі на основі використання багатопроекторних обчислювальних комплексів. В основу моделі було вирішено покласти спосіб ТО заготовки з низько- й середньовуглецевих сталей, призначених для холодної висадки [1].

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Традиційна технологія сфероїдизівного відпалювання сталі передбачає використання садчикових печей (ковпакових або шахтового типу). Недоліки традиційних способів підготовки заготовок до холодної висадки з подробицями викладені в відомій роботі Долженкова І. Є. [2, 3] і глибоко проаналізовані в роботі [4].

Альтернативою способу ТО з нагріванням виробів у печі служить електротермічний спосіб, який характеризується високою швидкістю нагрівання унаслідок впливу явищ електромагнітної індукції (індукційне нагрівання) або електроопору (електроконтактне нагрівання) [5]. Запровадження індукційного нагрівання у технологічній лінії для ТО дроту вже відоме у виробничій практиці [6, 7]. Для реалізації такої технології розроблено установку для виготовлення високоміцних кріпильних виробів без завершального термозміцнення. Але в даному випадку, під час проведення ТО заготовки не здійснюється контроль температурних режимів нагрівання, витримки й охолодження у зв'язку з відсутністю засобів виміру і контролю температури металу.

Іншим підходом до реалізації електротермічного способу обробки каліброваної сталі є установка [8], в якій передбачена термокамера і терморегульовальний екран. Але процес ТО характеризується значною тривалістю режиму відпалювання, тому що ізотермічна витримка й створення необхідного режиму охолодження проводиться у термокамері і потребує довгий час. За даними авторів тривалість відпалювання дорівнює від 30 до 90 хвилин, що не дозволяє синхронізувати замкнутий цикл виготовлення трипільних виробів.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Щоб вирішити окреслені вище проблеми, було розроблено установку для термічної обробки довгомірного сталевго виробу [4] з застосуванням БПОС [9]. Використання БПОС з її програмним забезпеченням дозволяє на основі математичної моделі процесу нагрівання зразка вже у виробничих умовах контролювати нагрівання дроту до переходу в аустенітну область до температури фазової перекристалізації на всій площині перерізу довгомірного сталевго виробу, а потім, розв'язавши ОЗТ, здійснювати контроль необхідного режиму ізотермічної витримки в інтервалі температур відпалювання на всій площині перерізу зразка.

На рис. 1 зображено проектну схему установки для ТО довгомірного сталевого виробу, де 1 – розмотувальний пристрій; 2 – правильно-тяговий пристрій, обладнаний виконавчим механізмом 3; 4 – індуктор нагрівального пристрою; 5 – генератор з виконавчим механізмом; 6 – пірометр; 7 – камера ізотермічної витримки з виконавчим механізмом 8; 9 – пірометр; 10 – камера регламентованого підстуджування дроту з виконавчим механізмом 11 для регулювання подачі водоповітряної суміші; 12 – пірометр; 13 – камера ізотермічної витримки з виконавчим механізмом 14; 15 – пірометр; 16 – пристрій для інтенсивної сфероїдизації з виконавчим механізмом 17; 18 – пірометр; 19 – пристрій подачі дроту на подальший технологічний цикл; 20 – інформаційний двоспрямований інтерфейс збору даних з пристроїв 3, 7, 9, 12, 15, 18, приєднаний до блока керування 21 і до виконавчих механізмів (3, 5, 8, 11, 14, 17) відповідних пристроїв; 22 – інформаційний двоспрямований інтерфейс зв'язку блока керування БПОС 23.

Установка для ТО довгомірного сталевого виробу працює в описаній нижче послідовності. З розмотувального пристрою 1 через правильно-тяговий пристрій 2 дріт подається в індуктор нагрівального пристрою 4, де нагрівається до переходу в аустенітну стадію, набуваючи температури фазової перекристалізації.

Температура нагрівання контролюється пірометром 7. Підтримання температурного режиму здійснюється за допомогою блока керування 21 і БПОС 23. Сигнал з пірометра 6 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок керування 21, а потім через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де згідно з результатом розв'язку математичної моделі прямої задачі теплопровідності, відбувається регулювання потужності генератора 5.

Потім розігрітий дріт потрапляє в камеру ізотермічної витримки 7, температура в якій регулюється виконавчим механізмом 8. При цьому сигнал з пірометра 9 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок керування 21, а далі через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 у БПОС 23, де відповідно до результатів розв'язку математичної моделі ізотермічної витримки, здійснюється регулювання температурного режиму за допомогою виконавчого механізму 8.

Далі дріт переходить у камеру регламентованого підстуджування 10. Залежно від режиму ТО, марки сталі й діаметра дроту задається необхідна швидкість підстуджування в інтервалі температур від 750 до 700 °С.

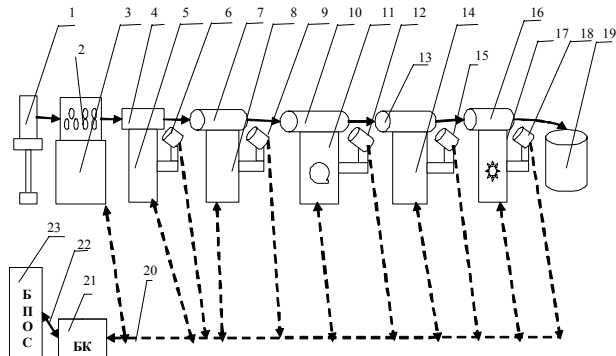


Рисунок 1 – Схема установки термічної обробки сталевого виробу

У цьому температурному інтервалі аустеніт безперервно втрачає вуглець і, досягнувши необхідної концентрації останнього, зазнає поліморфних перетворень, перетворившись на ферит, таким чином відбувається розпад аустеніту за аномальним механізмом. Температура підстуджування контролюється блоком керування 21 і БПОС 23, де з урахуванням температури, зафіксованої пірометром 12, і відповідно до результату розв'язку математичної моделі ОЗТ, виконавчий механізм 11 подає водоповітряну суміш, збільшуючи або зменшуючи її кількість, залежно від заданого температурного режиму підстуджування.

Потім дріт потрапляє в камеру ізотермічної витримки 13, температура в якій регулюється виконавчим механізмом 14. Під час ізотермічної витримки завершується утворення квазіевтектоїду (перліту), що включає зони з підвищеною концентрацією вуглецю і з готовими цементитними частинками. Сигнал із пірометра 15 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок автоматичного керування 21, а далі через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де на підставі результатів розв'язку математичної моделі ізотермічної витримки через блок керування 21 здійснюється регулювання температурного режиму в камері 13.

Після цього дріт подається в пристрій інтенсивної сфероїдизації 17, де здійснюється зміна температурного режиму із швидкістю від 15 до 20 °С/хв з досягненням підкритичної температури A_{c1} (у цій температурній зоні відбувається інтенсивна сфероїдизація цементитних частинок). Сигнал із пірометра 18 через інформаційний двоспрямований інтерфейс 20 надходить у блок автоматичного керування 21, а потім через інформаційний двоспрямований інтерфейс 22 – у БПОС 23, де з урахуванням результатів розв'язку математичної моделі прямої задачі теплопровідності відбувається регулювання температурного режиму в пристрої інтенсивної сфероїдизації 16. Далі через пристрій подачі 19 дріт переходить до наступного технологічного циклу його обробки.

На рис. 2 подано блок-схему контурів системи керування установкою термічної обробки довгомірного сталевого виробу. Така система керування має у своєму розпорядженні блоки, які дозволяють отримати інформацію про поточні параметри керованих процесів. Особливість її полягає в тому, що на кожному з п'яти етапів технологічної обробки зразка розв'язується двовимірною задачею теплопровідності. При цьому програмні засоби БПОС дозволяють контролювати температурні режими, як на всій площині перерізу зразка, так і по його довжині. Контроль таких температурних режимів здійснюється в центрі площини перерізу зразка.

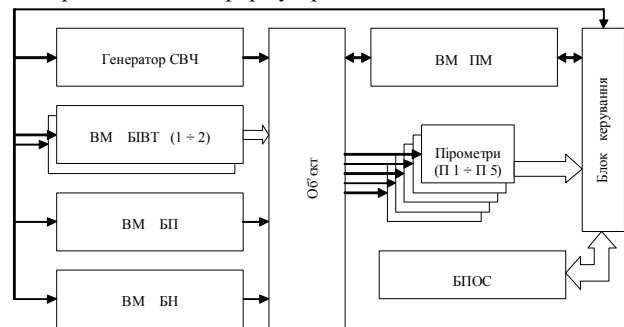


Рисунок 2 – Блок-схема контурів системи керування установкою термічної обробки довгомірного сталевого виробу

БПОС із спеціальним програмним забезпеченням як єдина база містить математичні моделі у вигляді рівняння теплопровідності (1). При цьому за координатою z граничні умови, залежно від особливостей розв'язуваної задачі, можуть бути першого, другого або третього роду. Розв'язують задачу (1) із застосуванням методів розщеплення, суть яких полягає в редукції складного оператора (1) до простих. Цей підхід дозволяє проінтегрувати дане рівняння як послідовність інтегрування одновимірних рівнянь простішої структури. З огляду на суттєву складність математичної моделі (1), великого значення набуває розробка економічних алгоритмів для розрахунку ефектів керування функціями запропонованої установки. Процес створення зазначених алгоритмів висвітлюється в роботах [10, 11].

Зауважимо, що тут саме задача керування (як і задача синтезу) в її точній постановці відноситься до класу обернених, оскільки вона передбачає визначення керуючих функціональних параметрів на основі заздалегідь заданого, необхідного результату (обернена задача керування).

Алгоритмом розв'язування обернених задач слугує метод «вилки» з попереднім визначенням деякого початкового відрізка. Розв'язок задачі реалізується в два етапи.

На першому етапі реалізується відокремлення мінімуму нев'язки, на другому – визначається мінімум шуканої функції керування з відокремленого інтервалу. Зазначена процедура реалізується стандартно. Інакше кажучи, якщо ϑ являє собою деяке дійсне значення шуканого кореня, тобто, коли $a \leq \vartheta \leq b$, а $f(\vartheta) = 0$, то можна обчислити число w таким, що задовольняє умові: $a \leq \vartheta \leq b$ та $|\vartheta - w| < \varepsilon$, тобто меншим від будь-якого наперед заданого малого числа ε . Подібна схема включена до складу математичного апарату керування БПОС. На всіх циклах ТО металу використовується математична модель (1), тому результати моделювання будуть стосуватись циклу первинного нагрівання металу.

Проблема моделювання полягає в тому, що для забезпечення необхідної точності й стійкості обчислень доводиться брати розрахункову сітку з чималою кількістю вузлів і виконувати безліч ітерацій. Унаслідок цього число арифметичних операцій, що необхідні для розрахунку температурних полів, перебуває в межах $10^7 \div 10^8$ вузлів, а коли крок за часовою ознакою становить 10^{-2} с, то загальна кількість вузлів для обчислень може досягти 10^{20} і більше. Однопроцесорні обчислювальні системи не можуть впоратись з таким навантаженням під час моделювання в реальному масштабі часу, тому найбільш виправданим буде застосування багатопроцесорних систем, що й було здійснено з метою удосконалення технології ТО довгомірного сталевих виробу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для випробування функцій запропонованої установки було проведено кілька експериментів, коли дрід діаметром 20 мм із сталі 20Г2Р піддавався ТО. Розглянемо один з характерних дослідів.

За початкову було взято феритно-перлітну структуру заготовки. Процес ТО матеріалу здійснювався шляхом нагрівання заготовки в межах міжкритичної зони температур. Для заданого матеріалу встановлено такі значення критичних точок: $A_{c1} = 725$ °C; $A_{c3} = 795$ °C.

Нагрівання відбувалось до такого значення: $A_{c1} + (10-30$ °C). Протягом наступного етапу обробки матеріалу було реалізовано процес ізотермічної витримки протягом 45 с. Далі тривало охолодження виробу зі швидкістю 20–30 °C/с до температури 620 °C з подальшою ізотермічною витримкою протягом 45 с. Нарешті, на останньому етапі обробки матеріалу зразок нагрівали зі швидкістю 15–25 °C/с до підкритичних температур. Графічну інтерпретацію режиму ТО металу відображено на рис. 3.

Механічні характеристики визначалися за результатами замірів твердості зразків. Випробування на розтягнення проведено на машині FU10000ez. Дослідження мікроструктури металу проводилося на світловому металографічному мікроскопі Neophot-2 з використанням структурного аналізатора «Eriquant», додатково обладнаного пристроєм «Anasonic» для цифрової реєстрації зображення.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

За результатами експериментів одержані криві розподілу температури зразка на площині його перерізу (рис. 4), де T_H – температура нагрівання поверхні зразка,

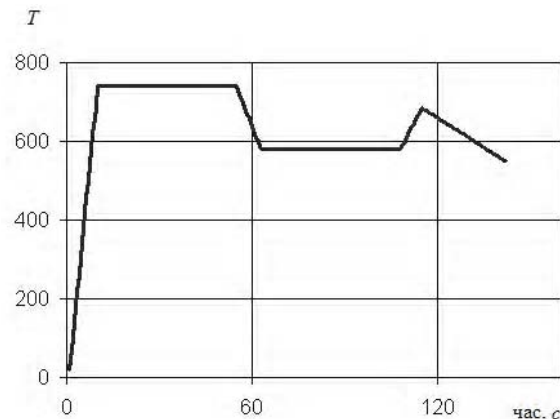


Рисунок 3 – Графік режиму термічної обробки сталі 20Г2Р

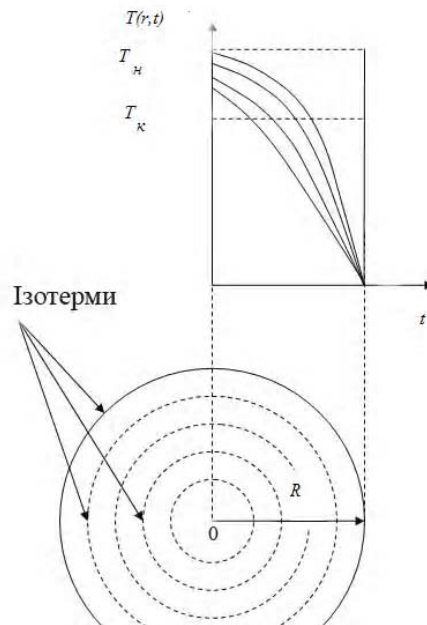


Рисунок 4 – Криві розподілу температури зразка на площині його перерізу

T_k – контрольована засобами БПОС температура фазового перетворення металу (A_{c1}) на площині перерізу зразка. Моделювання таких температурних полів здійснюється з урахуванням зміни теплофізичних властивостей матеріалу під час його нагрівання.

Криві розподілу температури зразка по довжині в процесі його нагрівання зображено на рис. 5, де цифрою 1 позначено температуру поверхні (T_H), а цифрою 2 – температуру в центрі площини перерізу. Тут зона I відображає процес нагрівання зразка до заданої температури на його поверхні, а зона II демонструє вихід на заданий температурний режим у центрі площини перерізу зразка.

На рис. 6а,б зображено мікроструктуру зразків до і після сфероїдизації, при цьому твердість зразків після ТО набула значень 150–169 НВ.

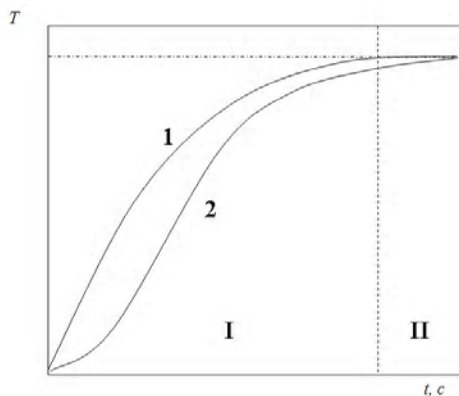
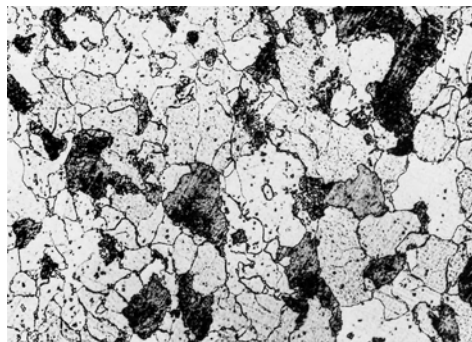
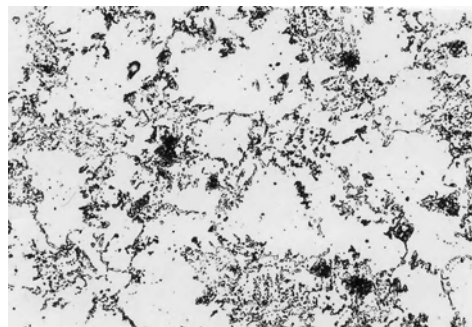


Рисунок 5 – Графіки розподілу температури зразка по його довжині в процесі нагрівання



а



б

Рисунок 6 – Мікроструктура сталі 20Г2Р:
а – початкова феритно-перлітна структура, $\times 500$; б – структура після відпалювання – перліт зернистий (бал 5), $\times 500$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Виконана сфероїдизація карбідної фази металу в умовах відповідних режимів ТО заготовок забезпечує надання матеріалу структури зернистого перліту. Причому швидкісна сфероїдизація зумовлює більш рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці (рис. 6б). Зразки із сталі майже однакової твердості після ТО набули дрібнодисперсної структури, що забезпечує більш високий рівень пластичності металу. Унаслідок швидкого нагрівання зразка й неповної аустенітизації сталі відбуваються певні зміни в морфології карбідної фази від пластинчастої до дрібнодисперсної глобулярної.

Технічний результат, що досягається при запровадженні запропонованої системи, полягає в тому, що забезпечується висока дисперсність й однорідність структури зразка на всій площині його перерізу, при цьому технологічний процес ТО сталі характеризується високою продуктивністю, малим енергоспоживанням, поліпшеними експлуатаційними характеристиками. Застосування установки для реалізації режиму сфероїдизівного відпалювання зумовлює рівномірний розподіл глобул цементиту у феритній матриці, а значить забезпечує необхідні механічні властивості металу для його подальшої холодної деформації.

Відзначимо, що розв'язування задач, визначених в даній роботі, зазвичай, відбувається на основі застосування апарату різницевих рівнянь, який передбачає обов'язкову заміну похідних різницеvими співвідношеннями.

Виконані в даній роботі дослідження показують, що методи розв'язування задач даного класу мають бути не тільки різноманітними, але й поєднувати оцінювання кількісних показників із можливостями якісного аналізу. На сьогодні намітилися певні тенденції в розробці числово-аналітичних методів із складною логічною структурою, але вони мають порівняно з кусково-різницеvими методами вищий порядок точності й можливість побудови алгоритмів, адаптованих за порядками апроксимації. З обчислювальної точки зору такий підхід відрізняється певною громіздкістю, але він дає своєрідний еталон для порівняння з іншими практичними методами. Але, зважаючи на переваги проведення обчислювального експерименту засобами багатопроекторної системи, можна стверджувати, що обставина, яка стримувала розвиток числово-аналітичного підходу, на сьогодні втрачає свою актуальність. У зв'язку з цим, для розв'язування моделі (1), у даній роботі набула подальшого розвитку ідея розробки схем підвищеного порядку точності на основі числово-аналітичного підходу до розв'язування багатьох досліджуваних задач.

ВИСНОВКИ

Удосконалення наявних й створення нових технологічних процесів ТО металу вимагають значних витрат, пов'язаних із проведенням великої кількості натурних експериментів на лабораторному, дослідно-промисловому устаткуванні, а також у виробничних умовах. Скорочення кількості експериментальних досліджень та часу на їх проведення з одержанням необхідної інформації для побудови й упровадження технологічних розробок можна здійснити шляхом застосування багатопроекторних об-

числювальних комплексів. У статті розв'язана актуальна задача контролю температурних режимів процесу рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі шляхом застосування багатопроекторної системи, що дозволяє узгоджувати часові інтервали технологічного процесу відпалювання.

Наукова новизна проведених досліджень полягає в тому, що уперше на основі багатопроекторної обчислювальної системи створено модель швидкісної ТО довгомірного сталевого виробу в реальному часі з метою рекристалізації та сфероїдизівного відпалювання каліброваної сталі й виготовлення високоміцних кріпильних виробів методом ХОШ без завершальної ТО. Запропонований підхід дає можливість контролювати технологічні параметри в режимах ТО металу, зокрема температуру в центрі перерізу металевого виробу, що забезпечує надання матеріалу необхідних властивостей, причому на всій площині перерізу і по довжині зразка. Цього вдалося досягти за рахунок застосування багатопроекторної обчислювальної системи, що має вигляд окремого модуля, а за допомогою спеціального програмного забезпечення вона здатна задавати й контролювати необхідні температурні режими на всій площині перерізу зразка при нагріванні й витримці металу. Порівняно з традиційними підходами, було реалізовано можливість поліпшити технологічні властивості металопрокату за рахунок забезпечення високої дисперсності й однорідності структури зразка на всій площині його перерізу.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що вдалося удосконалити технологічний процес ТО металу за рахунок використання відповідних математичних моделей та комплексу програм. Застосування математичних моделей, які обробляються на багатопроекторній обчислювальній системі дозволяє контролювати температурне поле металу в процесі його нагрівання, витримки та охолодження і забезпечує, тим самим, швидку адаптацію виробництва металопродукції до вимог споживача.

Втілення розробленого підходу для ТО металу на основі запровадження багатопроекторної обчислювальної системи створює проблему узгодження можливостей процесорів і мережного інтерфейсу багатопроекторної системи. Отже, перспективними подальшими дослідженнями є шляхи вирішення зазначеної проблеми на прикладі застосування багатопроекторних систем, що складаються із різних типів процесорів. За таких умов необхідно вивести аналітичні співвідношення для встановлення оптимального числа вузлів багатопроекторної системи з урахуванням обчислювальних можливостей певних процесорів.

ПОДЯКИ

Роботу виконано відповідно з тематичними планами наукових досліджень Національної металургійної академії України. Дослідження проведені в рамках бюджетних і госпдоговірних робіт:

Швачич Г. Г.¹, Соболенко А. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики та вичислительной техники Днепропетровской металлургической академии Украины, Днепропетровск, Украина

²Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прикладной математики и вычислительной техники Днепропетровской металлургической академии Украины, Днепропетровск, Украина

– «Розробка теоретичних основ фізико-технічних процесів обробки маловуглицевих економно легованих сталей з бейнітною структурою», номер державної реєстрації № ДР 0106U002210;

– «Математичне моделювання режимів термічної обробки при швидкісному циклічному нагріві і охолодженні довгомірного виробу», номер державної реєстрації № ДР 0107U002839.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пат. України № 36892, МПК С 21D 1/26 С21D 1/78. Спосіб термічної обробки прокату з низько- і середньовуглицевих сталей для холодного висадження / В. П. Ковпак, А. М. Лещенко, М. О. Соболенко, Г. В. Кокашинська ; власник : Національна металургійна академія України. – № 200807153; заявл. 23.05.2008; опубл. 10.11.2008, Бюл. № 21.
2. Долженков И. Е. Термическая и деформационно-термическая обработка металлопроката / И. Е. Долженков // Теория и практика металлургии. – 2002. – № 3. – С. 30–36.
3. Долженков И. Е. Влияние пластической деформации и других предобработок на сфероидизацию карбидов в сталях / И. Е. Долженков // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 1. – С. 66–68.
4. Пат. 61944 Україна, МПК С21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Установа для термічної обробки довгомірного сталевого виробу / В. П. Іващенко, Є. О. Башков, Г. Г. Швачич, М. О. Ткач, М. О. Соболенко ; власники : Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 201014225; заявл. 29.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 15.
5. Электротермическая обработка и теплое волочение стали / [Г. А. Хасин, А. И. Дианов, Т. Н. Попова, Л. П. Кукарцева]. – М. : Металлургия, 1984. – 152 с.
6. Бобылев М. В. Подготовка структуры при электротермообработке сталей, применяемых для высадки высокопрочных крепежных изделий / М. В. Бобылев, В. Е. Гринберг, Д. М. Закиров, Ю. А. Лавриненко // Сталь. – 1996. – № 11. – С. 54–60.
7. Бобылев М. В. Оптимизация режимов отжига с индукционным нагревом сталей 20Г2Р и 38ХГНМ / М. В. Бобылев, Д. М. Закиров, Ю. А. Лавриненко // Сталь. – 1999. – № 4. – С. 67–70.
8. Патент РФ 2137847, кл. С 21 D 1/32, С 21 D 9/60, С 21 D 11/00. Установа для термообработки калиброванной стали / Д. М. Закиров, М. В. Бобылев, Ю. А. Лавриненко, Л. П. Лебедев, В. И. Сьюльдин ; Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Автонормаль». – № 98117255/02; заявл. 16.09.1998; опубл. 20.09.1999.
9. Пат. 57663 Україна, МПК G06F 15/16 (2011.01). Модуль високоєфективної багатопроекторної системи підвищеної готовності / В. П. Іващенко, Є. О. Башков, Г. Г. Швачич, М. О. Ткач ; власники : Національна металургійна академія України, Донецький національний технічний університет. – № u 2010 09341; заявл. 26.07.2010; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 5.
10. Швачич Г. Г. Об алгебраическом подходе в концепции распределенного моделирования многомерных систем / Г. Г. Швачич // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 6(61). – С. 73–78.
11. Швачич Г. Г. Математическое моделирование одного класса задач металлургической теплофизики на основе многопроекторных параллельных вычислительных систем / Г. Г. Швачич // Математичне моделювання. – 2008. – № 1 (18). – С. 60–65.

Стаття надійшла до редакції 25.11.2014.

Після доробки 19.12.2014.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СКОРОСТНЫХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫХ МНОГОПРОЦЕССОРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работе рассмотрены особенности разработки и использования многопроцессорной вычислительной системы с ее математическим и программным обеспечением для моделирования режимов термической обработки стальных заготовок. Цель работы: разработка модели режима термической обработки длинномерного стального изделия, которая может быть использована для рекристаллизации и сфероидизирующего отжига калиброванной стали. Предложено использование современных многопроцессорных вычислительных компьютерных технологий для увеличения скорости и продуктивности вычислений, что обеспечивает эффективное управление технологическим процессом. При помощи специального программного обеспечения многопроцессорная система способна задавать и контролировать необходимые температурные режимы на всей плоскости поперечного сечения образца при нагреве и выдержке металла, а при необходимости может контролировать тепловой режим обработки стали в интервале температур отжига. Многопроцессорная вычислительная система со специальным программным обеспечением включает математические модели в виде уравнения теплопроводности. Такие уравнения решаются с применением методов расщепления. Благодаря этому подходу решение двумерного уравнения сводится к последовательности интегрирования одномерных уравнений более простой структуры. Применение численно-аналитического метода обеспечивает использование экономических и устойчивых алгоритмов решения задач данного типа. Проведены эксперименты с исследованием свойств стальной заготовки. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать предлагаемый подход к созданию моделей скоростных режимов обработки металла для разработки новых технологических процессов.

Ключевые слова: математическая модель, многопроцессорная вычислительная система, информационный двунаправленный интерфейс, контроль температурного режима металла.

Shvachych G. G.¹, Sobolenko O. V.²

¹Dr. Sc., Professor, Chief of the Department of Applied Mathematics and Computer Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

²PhD, Associate Professor of the Department of Applied Mathematics and Computer Science of the National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine

SIMULATION OF SPEED SCHEDULES FOR METAL ON THE BASIS OF USING THE HIGH-PERFORMANCE MULTIPROCESSOR COMPUTER SYSTEMS

The paper deals the features of the development and use of the multiprocessor computing system with mathematical and software of the latter for simulation of heat treatment of the steel billets. Objective of the work: developing the model of heat treatment of a long steel product, which can be used for recrystallization and spheroidizing annealing of calibrated steel. The use of the up-to-date multiprocessor computing technologies had been proposed for increasing speed and productivity of computations, what maintains the effective control of the technological process. Through the special software the multiprocessor system is able to set and control necessary temperature conditions on all plane of cross-sectional of standard at heating and self-control of metal, and if necessary maybe began to control the thermal mode of treatment in the interval of temperatures of annealing. The multiprocessor computer system with the special software includes mathematical models as equation of heat conductivity. Such equations decide with the use of methods of breaking up. Due to this approach the decision of two-dimensional equation is taken to the sequence of integration of one-dimensional equations of more simple structure. Application of numeral-analytical method provides the use of economic and steady algorithms of decision of problems of this type.

Experiments had been carried out with studying the properties of a steel billet. Results of the experiments allow recommending the proposed approach to creating models of high-speed schedules of metal treatment for development of new technological processes.

Keywords: mathematical model, multiprocessor computing system, information bidirectional interface, control of the temperature schedule of metal.

REFERENCES

1. Kovpak V. P., Leshtshenko A. M., Sobolenko M. O., Kokashinska G. V. Pat. Ukrainy № 36892, MPK C 21D 1/26 C21D 1/78. Sposib termichnoi obrobky prokatu z nyzko- i seredniovgletsevykh stalej dlya kholodnogo vysadzhenya ; vlasnyk : Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, №200807153; zayavl. 23.05.2008; opubl.10.11.2008, Bul. №21.
2. Dolzhenkov I. Ye. Termicheskaya i deformatsionno-termicheskaya obrabotka metalloprokata, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2002, No. 3, pp. 30–36.
3. Dolzhenkov I. Ye. Vliyanie plasticheskoy deformatsii i drugih predobrabotok na sferoidizatsiyu karbidov v stalajch, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2007, No. 1, pp. 66–68.
4. Ivashchenko V. P., Bashkov Ye. O., Shvachich G. G., Tkach M. O., Sobolenko M. O. Pat. 61944 Ukraina, MPK C21D 1/26 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01). Ustanovka dlya termichnoi obrobki dovgomirnogo stalevogo vyrobu ; vlasnyky, Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, Donetskyj natsionalnyj tekhnichnyj universytet, № u 201014225; zayavl. 29.11.2010; opubl. 10.08.2011, Bul. №15.
5. Khasin G. A., Dianov A. I., Popova T. N., Kukartseva L. P. Elektrotermicheskaya obrabotka i typloje volochenije stali. Moscow, Metallurgiya, 1984, 152 p.
6. Bobylev M. V., Grinberg V. Ye., Zakirov D. M., Lavrinenko Yu. A. Podgotovka stryktury pri elektrotermoobrabotke stalej, primenyayemykh dlya vysadki vysokoprochnykh krepkoznykh izdelij, *Stal*, 1996, No. 11, pp. 54–60.
7. Bobylev M. V., Zakirov D. M., Lavrinenko Yu. A. Optimizatsiya rejimiv otjiga s induktsionim nagrevom staltej, primenyaemich dlya visadki visokoprochnich krepjnykh itsdeliy, *Stal*, 1999, No. 4, pp. 67–70.
8. Zakirov D. M., Bobylev M. V., Lavrinenko Yu. A., Lebedev L. P., Syuldin V. I. Patent RF 2137847, kl. C 21 D 1/32, C 21 D 9/60, C 21 D 11/00. Ustanovka dlya termoobrabotki kalibrovannoj stali; Patentobladatel: Otkrytoje aktsionernoje obshtshestvo «Avtonormal», №98117255/02; zayavl. 16.09.1998; opubl. 20.09.1999.
9. Ivashchenko V. P., Bashkov Ye. O., Shvachych G. G., Tkach M. O. Pat.57663 Ukraina, MPK G06F 15/16 (2011.01). Modul vysokoeffektivnoi bagatoprotsesnnoi systemy pidvyshtshenoj gotovnosti ; vlasnyky: Natsionalna metalurgijna akademiya Ukrainy, Donetskyj natsionalnyj tekhnichnyj universytet. № u 2010 09341; zayavl. 26.07.2010; opubl. 10.03.2011, Bul. №5.
10. Shachich G. G. Ob algebraicheskom podkhode v kontseptsii raspredelyonnogo modelirovaniya mnogomernykh sistem, *Teoriya i praktika metallurgii*, 2007, No.6(61), pp. 73–78.
11. Shvachich G. G. Matematicheskoye modelirovaniye odnogo klassa zadach metallurgicheskoy teplofiziki na osnovyе mnogoprotsesnnykh parallelnykh vychislitelnykh sistem, *Matematychnе modelyuvannya*, 2008, No. 1(18), pp. 60–65.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 004.93

Олійник А. О.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет,
Запоріжжя, Україна

СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЗДОРОВ'Я ХВОРОГО НА ОСНОВІ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Вирішено завдання розробки математичного забезпечення для автоматизації процесу індивідуального прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою. Об'єктом дослідження є процес синтезу моделей для медичного діагностування. Предмет дослідження становлять методи синтезу нейро-нечітких моделей для медичного діагностування. Мета роботи: підвищити ефективність процесу синтезу нейро-нечітких мереж для побудови діагностичних моделей на основі навчальних вибірок. Запропоновано стохастичний метод синтезу нейро-нечітких моделей на основі паралельних обчислень, що ґрунтується на стохастичному підході при пошуку значень параметрів, що настраюються, і полягає в розподілі найбільш ресурсномістких етапів по вузлах паралельної обчислювальної системи. Запропонований метод дозволяє скоротити час настроювання параметрів (значень вагових коефіцієнтів і параметрів функцій належності нейроелементів) синтезованих нейромоделей. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований метод. Проведено експерименти з дослідження властивостей запропонованого методу. Результати експериментів дозволяють рекомендувати запропонований метод для використання на практиці.

Ключові слова: множина рішень, нейронна мережа, ознака, паралельне програмування, прогнозування, синтез моделі.

НОМЕНКЛАТУРА

$D(\chi_k^{(i)}, C_j)$ – відстань між рішенням $\chi_k^{(i)}$ і центром j -го кластера C_j ;

$Entr(\Delta p_{mn})$ – ентропія інтервалу Δp_{mn} ;

$g_{lk}^{(0)}$ – значення l -го елемента (параметра) в k -му рішенні;

$G_{k,norm}^{(i,j)}$ – нормоване значення цільової функції $G_k^{(i,j)}$ для множини $R^{(i,j)}$;

$Q|_{p_m \in \Delta p_{mn}}$ – кількість спостережень вибірки S , значення m -х ознак p_m яких потрапили в інтервал Δp_{mn} ;

M – кількість атрибутів;

N_g – кількість параметрів в рішенні $\chi_k^{(i)}$;

N_{pr} – кількість процесів, одночасно виконуваних в паралельній комп'ютерній системі;

$N_{Q,p_m \in \Delta p_{mn}}$ – кількість інтервалів розбиття (класів) вихідного параметра T фрагменту вибірки $S_{p_m \in \Delta p_{mn}}$, в якому значення m -х ознак p_m потрапили в інтервал Δp_{mn} ;

N_χ – кількість елементів множини $R^{(0)}$ (число випадково згенерованих рішень при ініціалізації);

p_{qm} – значення m -го атрибуту q -го об'єкта;

$P = (p_{qm})_{QM}$ – множина значень характеристик екземплярів вибірки;

Q – кількість об'єктів;

$Q|_{T=q; S_{p_m \in \Delta p_{mn}}}$ – кількість спостережень у множині $S_{p_m \in \Delta p_{mn}}$, в яких значення вихідного параметру T дорівнює q ($T = q$);

$R^{(i,j)}$ – j -та підмножина i -ї множини $R^{(i)}$;

t_q – значення відгуку q -го об'єкта;

T – множина значень відгуку;

$\chi_k^{(0)} = \{g_{1k}^{(0)}, g_{2k}^{(0)}, \dots, g_{N_g k}^{(0)}\}$ – k -те рішення у множині $R^{(0)}$.

ВСТУП

Артеріальна гіпертензія є широко поширеним захворюванням, яке може загрожувати життю та здоров'ю пацієнта [1]. На характер перебігу артеріальної гіпертензії

впливають різні фактори (погодні і кліматичні умови, супутні захворювання, а також стан здоров'я в попередні моменти часу) [2].

Для запобігання істотних стрибків тиску пацієнта, які можуть викликати погіршення стану пацієнта, а можливо і привести до летального наслідку, необхідно своєчасно прогнозувати розвиток гіпертензії в короткостроковому періоді часу (на найближчі половину доби або добу). Це дозволить своєчасно реалізувати профілактичні заходи, пов'язані з прийомом необхідних препаратів для запобігання очікуваних негативних наслідків.

Для прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою потрібно мати модель, яка буде унікальною для кожного конкретного пацієнта. Побудова такої моделі потребує обробки великого масиву спостережень, розподілених у часі.

Перспективним засобом побудови моделей для індивідуального прогнозування є методи обчислювального інтелекту (нейро-нечіткі технології та методи стохастичною оптимізації) [3–7]. Штучні нейро-нечіткі мережі характеризуються здатністю до навчання за прецедентами, високими узагальнюючими властивостями, що обумовлює їх здатність отримувати знання з даних. Стохастичні методи, на відміну від широко використовуваних градієнтних методів оптимізації, не вимагають обчислень значень похідних цільової функції, дозволяють виходити з локальних екстремумів і синтезувати моделі на основі заданих вибірок даних.

Для врахування динаміки стану пацієнта необхідно з плином часу синтезувати нові моделі (періодично перебудовувати вже існуючі моделі) на основі постійно зростаючих масивів спостережень. Це в свою чергу вимагає використання великих обчислювальних ресурсів. Для подолання цих обмежень пропонується розпаралелити процес синтезу діагностичної моделі.

Метою даної роботи є розробка паралельного методу синтезу прогнозуючих моделей на основі нейро-нечітких мереж і стохастичного пошуку.

1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Нехай є вибірка даних $S = \langle P, T \rangle$. Тоді задача синтезу нейро-нечіткої моделі NFN полягає в ідентифікації її параметрів таким чином, щоб забезпечувалося прийнятне значення заданого критерію якості G . Як цільовий критерій G при навчанні нейро-нечітких моделей можуть бути використані, наприклад, похибка розпізнання або середньоквадратична помилка.

Вихідна вибірка даних про стан здоров'я хворого гіпертонічною хворобою була отримана в м. Запоріжжя (Україна). Вибірка $S = \langle P, T \rangle$ містила спостереження за період з 2004 р. по 2014 р., де кожен екземпляр являв собою набір даних, що характеризують стан пацієнта в певну частину дня.

В якості об'єктивних клініко-лабораторних показників використовувалися: p_1 – спостережуваний артеріальний тиск (систолический та діастолічний, мм. рт. ст.); p_2 – пульс (ударів на хвилину); відомості про прийом ліків (p_3 – Амло (0 – немає, 1 – є), p_4 – Егілок (0 – немає, 1 – є); p_5 – Берліпріл (0 – немає, 1 – є)). В якості суб'єктивних показників використовувались характеристики самопо-

чуття (p_6 – наявність екстрасистолю (0 – немає, 1 – є), p_7 – наявність болю в голові (0 – немає, 1 – є), p_8 – наявність болю в потилиці (0 – немає, 1 – є), p_9 – наявність пульсації (0 – немає, 1 – є), p_{10} – наявність болю в лівому боці (0 – немає, 1 – є), p_{11} – наявність болю в області серця (0 – немає, 1 – є), p_{12} – нестача повітря (0 – немає, 1 – є), p_{13} – наявність болю в животі (0 – немає, 1 – є), p_{14} – загальна слабкість (0 – немає, 1 – є)). В якості метеорологічних характеристик [8] використовувалися (p_{15} – температура повітря (°C), p_{16} – атмосферний тиск (мм. рт. ст.), p_{17} – тип хмарності (0 – немає, 1 – мала, 2 – хмарно, 3 – похмуро), p_{18} – наявність грози (0 – немає, 1 – є), p_{19} – напрямок вітру (0 – штиль, 1 – північний, 2 – північно-східний, 3 – східний, 4 – південно-східний, 5 – південний, 6 – південно-західний, 7 – західний, 8 – північно-західний), p_{20} – швидкість вітру (м/с), p_{21} – дані сонячної активності (Mg II індекс [9]). В якості тимчасових характеристик використовувалися: дата (рік, місяць, день), код дня тижня (p_{22}), час (година) спостереження (p_{23}), код частини дня (0 – ранок, 1 – вечір) (p_{24}).

Фрагмент вихідних даних в графічному виді представлений на рис. 1.

Отримані спостереження методом «вікон» були використані для формування вибірки для вирішення задачі якісного прогнозування стану пацієнта на найближчу другу половину доби за даними попередніх спостережень: в якості вхідних ознак використовувалися дані за попередню (ранок та вечір) і поточну добу (ранок), а в якості виходу – стан пацієнта ввечері в поточну добу (0 – нормальний, 1 – погіршення стану, що супроводжується підвищенням артеріального тиску).

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У найпростішому випадку нейро-нечітка модель може розглядатися як передоброблювач, де механізм навчання штучної нейронної мережі визначає функції належності або нечіткі правила системи нечіткого виведення за навчальними даними. Як тільки параметри системи нечіткого виведення визначено, нейронна мережа припиняє використовуватися. База правил нечіткої системи звичайно визначається на основі карт, що самоорганізуються, або методів нечіткої кластеризації. Функції належності звичайно апроксимуються нейронною мережею за навчальними даними. Найбільш відомими прикладами паралельних нейро-нечітких систем є: нечітка асоціативна пам'ять Коско (В. Kosko), виділення нечітких правил на основі карт Педрича (W. Pedrycz), що самоорганізуються, та системи Номури (Н. Nomura), здатні до навчання параметрів нечітких множин [3–5].

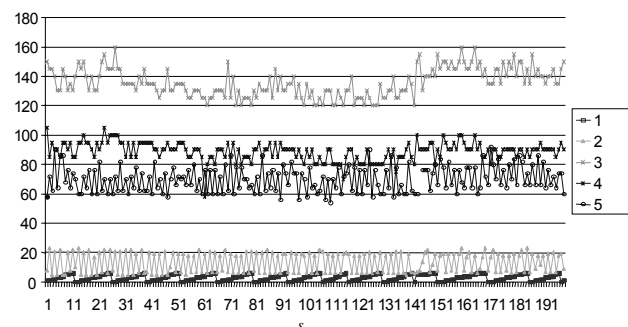


Рисунок 1 – Візуалізація фрагменту вибірки даних: 1 – день тижня, 2 – час, 3 – систолічний тиск, 4 – діастолічний тиск, 5 – пульс

В інтегрованій моделі нейро-нечітких мереж для визначення параметрів системи нечіткого виведення використовуються методи навчання нейронних мереж. Інтегровані нейро-нечіткі системи розподіляють структури даних і подання знань. Система нечіткого виведення може використовувати людські експертні знання, зберігаючи їхні істотні компоненти в базі правил і базі даних, та виконувати нечітке виведення для одержання вихідного значення. Формування правил і відповідних функцій належності сильно залежить від апріорного знання щодо розглянутої системи. Однак універсальний спосіб перетворення дослідних знань людських експертів у базу знань системи нечіткого виведення є невідомим. Є також потреба в адаптованості або деяких методах навчання для одержання виходів з необхідним рівнем точності. З іншого боку, механізм навчання нейронних мереж не покладається на людську експертизу. Через однорідну структуру нейронних мереж, з них складно витягти структуроване знання. Ваги нейронної мережі являють собою коефіцієнти гіперплощини, що розподіляє вхідний простір на області з різними значеннями виходу. Якщо ми можемо візуалізувати цю структуру гіперплощини за навчальними даними, тоді наступні процедури навчання в нейронній мережі можуть бути виключені.

Найбільш загальний спосіб застосування методу навчання до нечіткої системи полягає в тому, щоб подати її у вигляді архітектури, подібної нейронній мережі. Однак звичайні (градієнтні) методи навчання нейронних мереж не можуть безпосередньо застосовуватися до такої системи, оскільки функції, використовувані в процесі виведення звичайно є недиференційовані. Ця проблема може бути вирішена шляхом використання диференційованих функцій у системі виведення або використання стохастичних методів навчання нейромереж [5–7].

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Оскільки навчальна вибірка характеризується високими значеннями кількості ознак і екземплярів, процес побудови моделі вимагає значних обчислювальних і часових ресурсів. Це обумовлює доцільність розпаралелювання обчислювальних операцій при синтезі розпізнавальної моделі.

Для синтезу моделі прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою розроблений паралельний стохастичний метод. Запропонований метод заснований на стохастичному підході [6, 7, 10, 11], передбачає розпаралелювання основних обчислювальних операцій і використовує апріорну інформацію про значущість ознак. Це дозволяє використовувати можливості багатоядерних процесорів при синтезі нейро-нечітких моделей прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою, а також скоротити час на побудову таких моделей.

У розробленому методі на етапі ініціалізація початкової множини рішень відбувається формування множини $R^{(0)} = \{\chi_1^{(0)}, \chi_2^{(0)}, \dots, \chi_{N_\chi}^{(0)}\}$ структур виду $\chi_k^{(0)} = \{g_{1k}^{(0)}, g_{2k}^{(0)}, \dots, g_{N_g k}^{(0)}\}$, що визначають основні параметри (значення вагових коефіцієнтів нейронів і параметрів функцій активації) синтезованих нейро-нечітких моделей.

Для наближення початкових точок пошуку $\chi_k^{(0)} = \{g_{1k}^{(0)}, g_{2k}^{(0)}, \dots, g_{N_g k}^{(0)}\}$ ($k = 1, 2, \dots, N_\chi$) до оптималь-

них множини $R^{(0)}$, на відміну до відомих методів стохастичного пошуку [7, 10, 11], будемо формувати з урахуванням апріорної інформації про навчальну вибірку $S = \langle P, T \rangle$. Для цього діапазон значень $\Delta p_m = [p_{m \min}; p_{m \max}]$ кожної m -ї ознаки p_m ($m = 1, 2, \dots, M$) розбивається на задану кількість інтервалів N_{int} . Таким чином формуються інтервали $\Delta p_{mn} = [p_{mn \min}; p_{mn \max}]$ ($n = 1, 2, \dots, N_{\text{int}}$), на підставі границь яких визначаються параметри нечітких термів.

При обчисленні значень параметрів функцій належності нейро-нечіткої моделі будемо враховувати значущість n -го терму Δp_{mn} m -ї ознаки p_m для розпізнавання екземплярів вибірки $S = \langle P, T \rangle$. Значущість V_{mn} n -го терму m -ї ознаки визначимо як добуток величин

$\frac{Q|_{p_m \in \Delta p_{mn}}}{Q}$ та $(1 - \text{Entr}(\Delta p_{mn}))$, що характеризують, відповідно щільність розташування екземплярів множини S в інтервалі Δp_{mn} ознаки p_m і ступінь впливу терму Δp_{mn} на значення вихідного параметру T (1):

$$V_{mn} = \frac{Q|_{p_m \in \Delta p_{mn}}}{Q} (1 - \text{Entr}(\Delta p_{mn})). \quad (1)$$

Ентропія $\text{Entr}(\Delta p_{mn})$ інтервалу Δp_{mn} характеризує міру невизначеності вихідного параметра T за умови, що $p_m \in \Delta p_{mn}$, та визначається за формулою (2):

$$\text{Entr}(\Delta p_{mn}) = - \sum_{q=1}^{N_{Q, p_m \in \Delta p_{mn}}} \rho_q \log \rho_q. \quad (2)$$

Ймовірність ρ_q того, що вихідний параметр T прийме значення q в множині $S_{p_m \in \Delta p_{mn}}$ (за умови, що $p_m \in \Delta p_{mn}$) можна визначити за формулою (3):

$$\rho_q = \frac{Q|_{T=q; S_{p_m \in \Delta p_{mn}}}}{Q|_{p_m \in \Delta p_{mn}}}. \quad (3)$$

Найбільш ресурсомістким, як правило, є етап оцінювання поточної множини рішень $R^{(i)}$, на якому витрачається велика кількість комп'ютерних та часових ресурсів при обчисленні значень цільової функції G для кожного k -го ($k = 1, 2, \dots, N_\chi$) рішення $\chi_k^{(i)}$: $G_k^{(i)} = G(\chi_k^{(i)})$. Оскільки даний етап має високу обчислювальну складність, виконується повільно і не вимагає обміну даними між рішеннями $\chi_k^{(i)}$, його раціонально виконувати паралельно. Оцінювання рішень $\chi_k^{(0,j)}$ з множини $R^{(0)}$ виконується шляхом перетворення $\chi_k^{(0,j)} \rightarrow NFN_k^{(0,j)}$, в результаті якого зі структури $\chi_k^{(0,j)}$ формується нейро-нечітка ме-

режа $NFN_k^{(0,j)}$. В якості критерію оцінювання $G_k^{(0,j)}$, що характеризує рішення $\chi_k^{(0,j)}$, використовується помилка розпізнавання (якщо вихід T в множині S є дискретним) або середньоквадратична помилка (якщо вихід T приймає дійсні значення). Це вимагає обчислення значень вихідного параметра $T_q(NFN_k^{(0,j)})$ за синтезованою моделлю $NFN_k^{(0,j)}$ для кожного q -го спостереження множини $S = \langle P, T \rangle$. Отримана таким чином оцінка $G(NFN_k^{(0,j)})$ буде характеризувати пристосованість $G_k^{(0,j)}$ рішення $\chi_k^{(0,j)}$ в множині $R^{(0)}$: $G_k^{(0,j)} = G(\chi_k^{(0,j)}) = G(NFN_k^{(0,j)})$, що надалі дозволить відбирати найбільш пристосовані рішення для формування нових множин $R^{(i+1)}$.

Важливим етапом є створення нової множини рішень $R^{(i+1)}$. З метою більш детального дослідження областей локальних оптимумів доцільним є розбиття поточної множини рішень $R^{(i)}$ на підмножині $R^{(i,j)}$ з подальшим пошуком оптимуму в кожній з них (4):

$$R^{(i)} \rightarrow \{R^{(i,1)}, R^{(i,2)}, \dots, R^{(i,N_{pr})}\}. \quad (4)$$

Розбиття (4) пропонується виконувати з урахуванням апріорної інформації про розташування рішень $\chi_k^{(i)}$ в просторі елементів g_l ($l = 1, 2, \dots, N_g$). Такий підхід, на відміну від застосування острівної моделі еволюційного пошуку [7, 12], що припускає випадкове формування підпопуляцій $R^{(i,j)}$, дозволяє враховувати інформацію про просторове розташування рішень $\chi_k^{(i)}$ в множині $R^{(i)}$ і більш детально дослідити області можливих оптимумів. Кількість рішень $|R^{(i,j)}|$ в кожній підмножині $R^{(i,j)}$ визначається як відношення загальної кількості рішень N_χ в множині $R^{(i)}$ до кількості процесів N_{pr} (5):

$$|R^{(i,j)}| = N_\chi / N_{pr}. \quad (5)$$

Таким чином, задача розбиття (4) зводиться до необхідності формування N_{pr} підмножин $R^{(i,j)}$ (кожна з яких складається з $|R^{(i,j)}|$ рішень) в заданому просторі елементів g_l ($l = 1, 2, \dots, N_g$) (6):

$$R^{(i,j)} = \left\{ \chi_1^{(i,j)}, \chi_2^{(i,j)}, \dots, \chi_{|R^{(i,j)}|}^{(i,j)} \right\}, \quad j = 1, 2, \dots, N_{pr}. \quad (6)$$

Розбиття $R^{(i)} \rightarrow \{R^{(i,1)}, R^{(i,2)}, \dots, R^{(i,N_{pr})}\}$ пропонується виконувати за допомогою модифікації методу нечітких c -середніх (FCM, Fuzzy c -means) [13–15], оскільки він передбачає можливість віднесення одного екземпляру

(рішення $\chi_k^{(i)}$) до різних кластерів з різним ступенем належності, а також може бути використаний для побудови нейро-нечітких систем при визначенні нечітких множин [13, 16]. На відміну від базового методу нечітких c -середніх [15], в якому поточне розбиття на початковій ітерації отримують шляхом випадкової генерації елементів u_{kj} , що визначають належність k -го екземпляра до j -го кластера, в розробленому методі пропонується враховувати інформацію про розташування параметрів g_{lk} , що настроюються. Для визначення початкових значень величин u_{kj} обчислимо ранги $Rg(g_{lk}^{(i)})$ рішень $\chi_k^{(i)}$ за l -ю ознакою, що відповідають номерам інтервалів розбиття діапазону значень параметра g_{lk} .

Для визначення початкових значень u_{kj} , що відповідають належності k -го екземпляра до j -го кластера, будемо використовувати формулу (7):

$$u_{kj} = \frac{N(Rg(g_{lk}^{(i)}) = j)}{N_{pr}}, \quad (7)$$

де $N(Rg(g_{lk}^{(i)}) = j)$ – кількість рангів $Rg(g_{lk}^{(i)})$, які дорівнюють j . Формула (7) забезпечую виконання умови $\sum_{k=1}^{N_\chi} u_{kj} = 1$.

Далі для кожного j -го кластера визначається його центр $C_j = \{C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{N_g j}\}$, де C_{lj} – l -та координата центра j -го кластера, що обчислюється за формулою (8):

$$C_{lj} = \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_\chi} (u_{kj})^{mp}} \sum_{k=1}^{N_\chi} (u_{kj})^{mp} g_{lk}, \quad (8)$$

де mp – параметр методу, як правило, $mp = 2$.

Потім обчислюється значення функції $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$ (9), що характеризує якість нечіткого розбиття:

$$J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)}) = \sum_{k=1}^{N_\chi} \sum_{j=1}^{N_{pr}} (u_{kj})^{mp} D^2(\chi_k^{(i)}, C_j). \quad (9)$$

Як правило, відстань $D(\chi_k^{(i)}, C_j)$ між рішенням $\chi_k^{(i)}$ і центром j -го кластера C_j обчислюється на основі Евклідової метрики. Після цього формується нове нечітке розбиття шляхом перерахунку значень u_{kj} , використовуючи формулу (10):

$$u_{kj} = \left(\frac{\sum_{t=1}^{N_{pr}} \left(\frac{D(\chi_k^{(i)}, C_j)}{D(\chi_k^{(i)}, C_t)} \right)^{\frac{2}{mp-1}}}{\sum_{t=1}^{N_{pr}} \left(\frac{D(\chi_k^{(i)}, C_t)}{D(\chi_k^{(i)}, C_t)} \right)^{\frac{2}{mp-1}}} \right)^{-1}. \quad (10)$$

При цьому, якщо $D(\chi_k^{(i)}, C_j) = 0$, то $\chi_k^{(i)}$ є центром j -го кластера, тому встановлюються такі значення параметрів u_{kj} : $u_{kj} = 1$, для всіх інших кластерів: $u_{kj} = 0, k' \neq k$. Потім, для отримання нечіткого розбиття u_{kj} ($k = 1, 2, \dots, N_\chi$, $j = 1, 2, \dots, N_{pr}$) використовуючи формули (8)–(9) розраховуються нові центри нечітких кластерів $C_j = \{C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{N_{\chi j}}\}$ і значення критерію $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$. Процес продовжується, доки кількість ітерацій не перевищить максимально допустимого або доки зміна значення критерію $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$ носить суттєвий характер (11):

$$|J_{old}(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)}) - J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})| \leq \varepsilon_J, \quad (11)$$

де $J_{old}(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$ та $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$ – значення критерію якості розбиття J на попередній та поточній ітераціях, відповідно; ε_J – мінімально прийнятна зміна значення критерію J .

Після отримання прийнятних значень величин u_{kj} , що характеризують належність k -го екземпляра $\chi_k^{(i)}$ до j -го кластера виконується формування підмножин $R^{(i,j)}$ ($j = 1, 2, \dots, N_{pr}$). При цьому пропонується враховувати як значення належності u_{kj} до кожного з кластерів $R^{(i,j)}$, так і значення цільової функції $G_k^{(i)} = G(\chi_k^{(i)})$. Це дозволить підвищити ймовірність відбору при формуванні підмножин $R^{(i,j)}$ таких рішень $\chi_k^{(i)}$, які геометрично відповідають j -му кластеру (просторово розташовані близько до його центру) і володіють при цьому прийнятною пристосованістю $G_k^{(i)}$. Рішення $\chi_k^{(i)}$ будемо відносити в підмножини $R^{(i,j)}$ ($R^{(i,j)} = R^{(i,j)} \cup \chi_k^{(i)}$) при виконанні умови (12):

$$G_k^{(i)} + u_{kj} \leq \text{rand}[0; 2]. \quad (12)$$

Перегляд множини $R^{(i)}$ продовжується та повторюється доки не будуть послідовно сформовані всі підмножини $R^{(i,j)}$, кожна з яких складається з N_χ / N_{pr} рішень.

Після розбиття в головному процесі множини $R^{(i)}$ на підмножини $\{R^{(i,1)}, R^{(i,2)}, \dots, R^{(i,N_{pr})}\}$ виконується їх передача на інші процеси для паралельного стохастичного пошуку екстремумів.

Для формування нового набору $R^{(i,j)}$ на j -му процесі будемо відбирати рішення $\chi_k^{(i,j)} \in R^{(i,j)}$, виходячи зі значень їх цільової функції $G_k^{(i,j)} = G(\chi_k^{(i,j)})$. Рішення $\chi_k^{(i,j)} \in R^{(i,j)}$ пропонується вводити в набір рішень $R_{selected}^{(i,j)}$, допущених для формування нового покоління $R^{(i,j)}$ при виконанні умови (13):

$$G_{k,norm}^{(i,j)} \leq \text{rand}[0; 1]. \quad (13)$$

Таким чином, чим меншою є помилка $G_k^{(i,j)}$ синтезованої мережі $NFN_k^{(i,j)} = NFN(\chi_k^{(i,j)})$, тим вищою є ймовірність рішення $\chi_k^{(i,j)} \in R^{(i,j)}$ бути відібраним для формування нової множини $R^{(i,j)}$.

Нову множину рішень $R^{(i,j)}$ аналогічно еволюційному підходу до пошуку оптимальних рішень [11] пропонується формувати з найбільш пристосованих наборів $\chi_k^{(i,j)}$ (елітних), а також наборів, отриманих в результаті застосування еволюційних операторів схрещування та мутації. Для створення нової множини рішень пропонується використовувати оператори, розроблені в [17].

Випадковий пошук з адаптацією в кожній j -й підмножині $R^{(i,j)}$ пропонується виконувати на j -му процесі паралельної комп'ютерної системи ($j = 1, 2, \dots, N_{pr}$) протягом N_{it} ітерацій. Після виконання N_{it} ітерацій випадкового пошуку в кожній підмножині $R^{(i,j)}$ виконується їх об'єднання $R^{(i)} = R^{(i,1)} \cup R^{(i,2)} \cup \dots \cup R^{(i,N_{pr})}$ в єдину популяцію з подальшим проведенням імовірнісної оптимізації над об'єднаною множиною. Це дозволяє виявити нові області, що містять локальні (можливо, і глобальний) оптимум. З метою скорочення часу імовірнісної оптимізації при роботі з об'єднаною множиною рішень пропонується обчислення значень цільової функції $G_k^{(i)}$ рішень $\chi_k^{(i)}$ виконувати на процесах в паралельній системі (розпаралелити).

Виходячи з зазначеного вище, представимо граф процесу параметричного синтезу нейро-нечітких моделей в ярусно-паралельній формі (рис. 2). Починаючи з ярусу перевірки критеріїв завершення процес виконується ітеративно.

На рис. 2 операція $RS(R)$ представляє собою випадковий пошук в множині рішень R . Остання операція на графі – $RS(R^{(i)})$ виконується паралельно. Одна ітерація процесу випадкового пошуку $RS(R^{(i)})$ в ярусно-паралельній формі представлена на рис. 3.

Пунктирні лінії на рис. 2 і 3 відокремлюють яруси графа один від одного. Операції на одному ярусі графа виконуються паралельно. Дуги графа демонструють залежності між операціями. Так, не можна приступити до виконання будь-якої операції доки не завершаться інші операції, дуги з яких орієнтовані в вершини розглянутих операцій.

Перехід між ярусами, при якому від однієї вершини графа дуги орієнтовані в кілька вершин наступного ярусу, пов'язаний з розсилкою (Scatter) рішень по процесах. Перехід іншого типу, при якому дуги орієнтовані від декількох вершин одного ярусу до однієї вершині наступного ярусу, виконується за допомогою збору (Gather) рішень в головному процесі. Як можна побачити з рис. 2 і 3, найбільш ресурсомісткі операції, а саме ініціалізація початкової множини рішень, оцінювання поточної множини рішень, випадковий пошук в підмножині рішень, виконуються одночасно на процесах паралельної системи.

Запропонований метод синтезу нейро-нечітких мереж на основі паралельних обчислень ґрунтується на стохастичному підході при пошуку значень параметрів, що настраюються, і полягає в розподілі найбільш ресурсомістких етапів по вузлах паралельної обчислювальної системи, що дозволяє скоротити час налаштування параметрів (значень вагових коефіцієнтів і параметрів функцій належності нейроелементів) синтезованих нейромоделей.

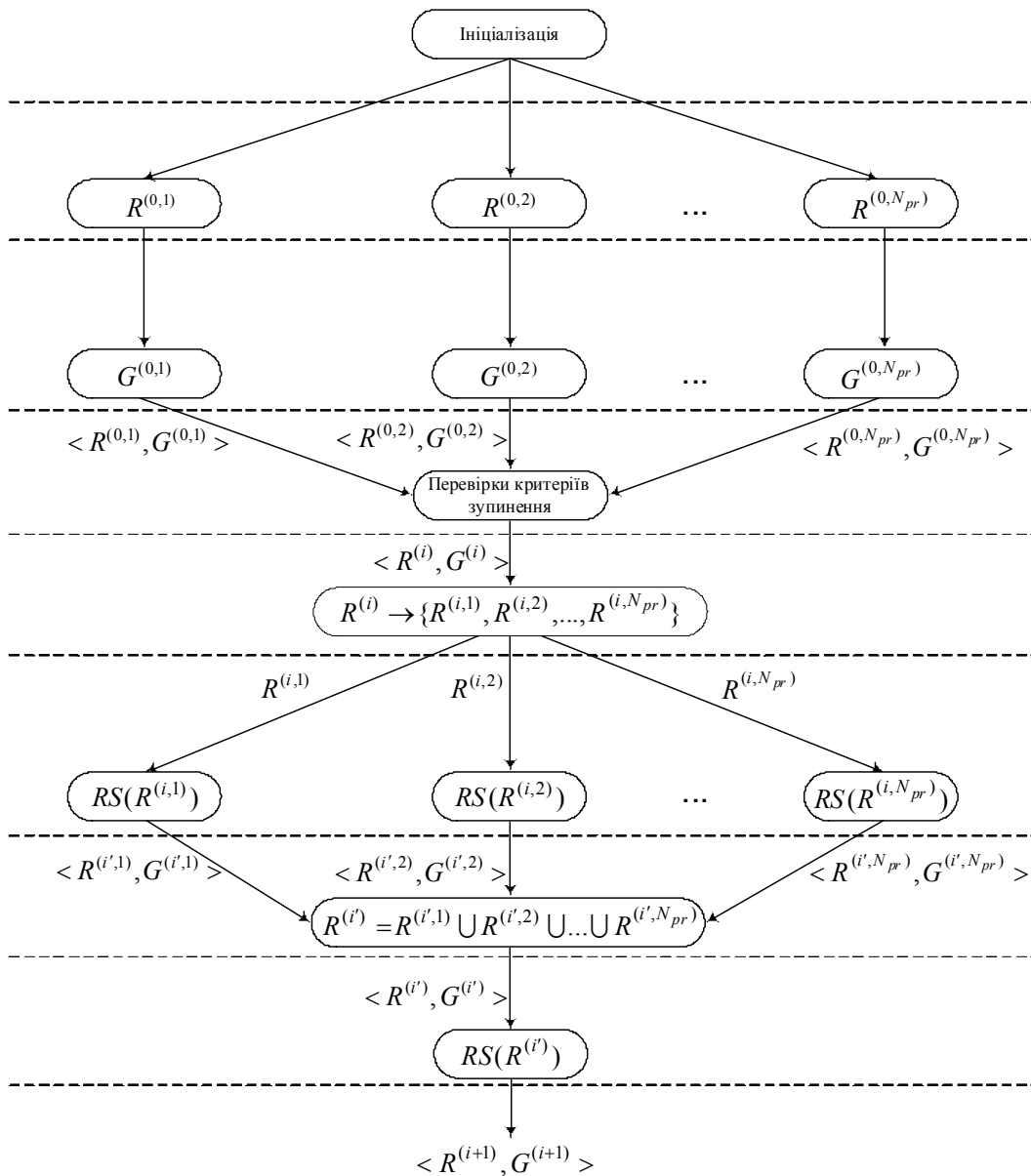


Рисунок 2 – Граф процесу параметричного синтезу нейро-нечітких мереж в ярусно-паралельній формі

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для виконання експериментального дослідження запропонованого методу синтезу нейро-нечітких мереж і вирішення задачі індивідуального прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою був використаний кластер Інституту проблем моделювання в енергетику імені Г. Е. Пухова НАН України м. Київ. Було задіяно 16 вузлів наступної конфігурації: процесор – Intel Xeon 5405, оперативна пам'ять – 4×2 ГБ DDR-2 на кожен вузол, комунікаційне середовище InfiniBand 20Гб/с. На вузлах кластера встановлене middleware Torque і OMPI.

Для проведення експериментів розроблено програмне забезпечення мовою C++ із застосуванням бібліотеки MPI [18–20]. Для оцінювання витраченого на виконання методу часу використана бібліотечна функція MPI_Wtime(). Експерименти були виконані по 3 рази на одному, двох, чотирьох, восьми і шістнадцяти ядрах задіяних процесорів.

Як аналог запропонованому методу була узятя острівна модель еволюційного пошуку (Island Genetic Algorithm, IGA) [11, 12].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експериментів наведено на рис. 4–10 та у табл. 1–2. На рис. 4 приведені усереднені часові витрати на виконання запропонованого методу і методу IGA на кластері.

Для встановлення причини нелінійного росту прискорення було виміряно комунікаційні витрати, а саме: пересилання між ядрами процесорів і синхронізацію потоків. Отримані результати наведено в таблиці 1 і на рис. 6.

Графік ефективності кластерної системи, у якій виконувалася реалізація запропонованого методу і методу IGA, представлений на рис. 7.

Запропонований метод по своїй суті добре реалізується на SIMD-системах: кожне ядро виконує ті самі інструкції для кожної реалізації хромосом, тому були проведені експерименти на графічному процесорі (GPU) NVIDIA GTX 285+, що програмувався за технологією CUDA [21]. При цьому задавалася кількість задіяних по-

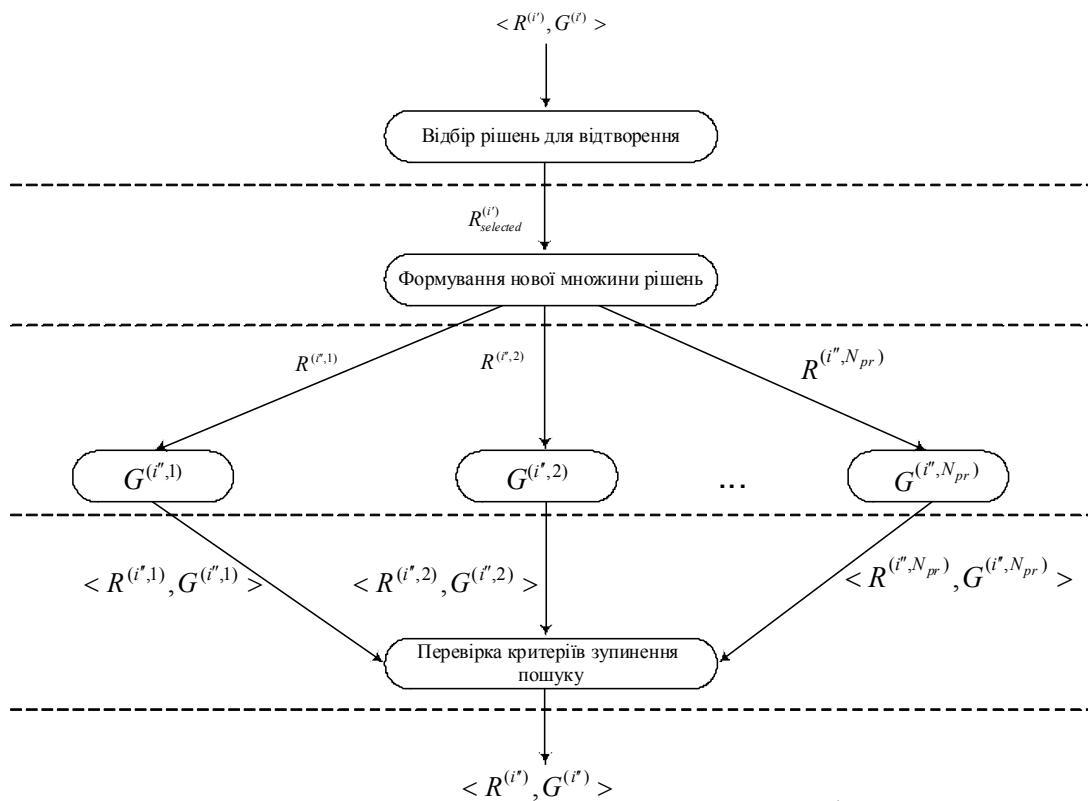


Рисунок 3 – Граф однієї ітерації випадкового пошуку $RS(R^{(i')})$

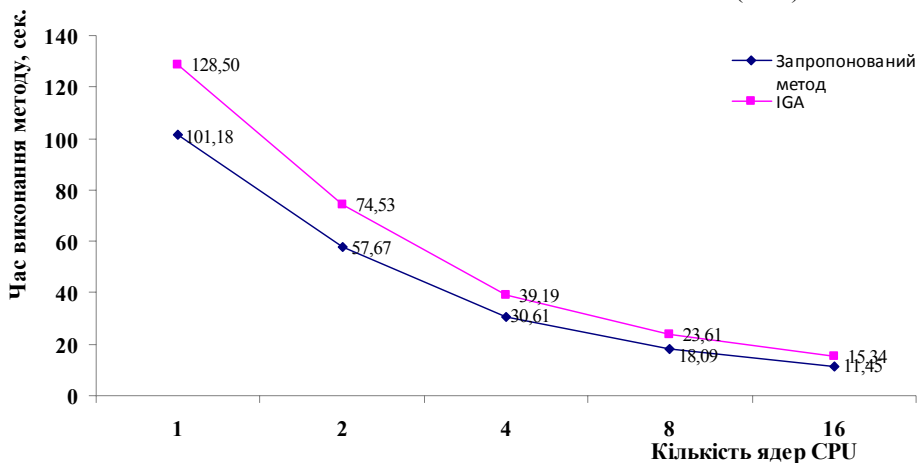


Рисунок 4 – Усереднений час виконання запропонованого методу і методу IGA на кластері

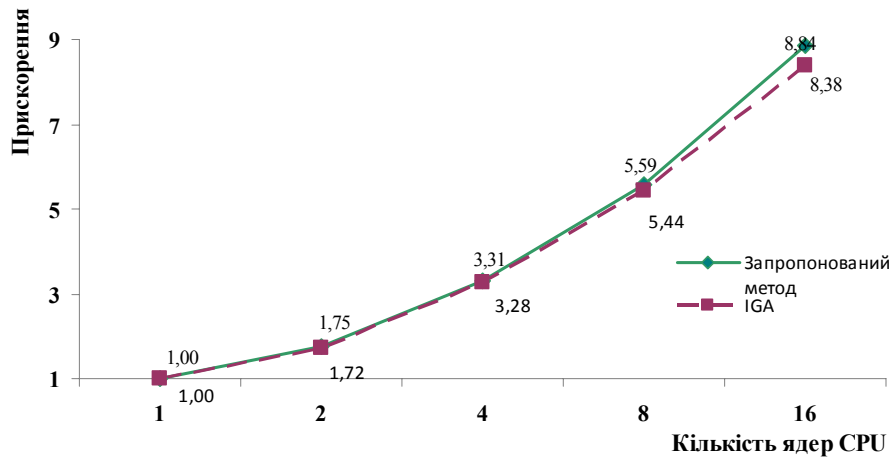


Рисунок 5 – Графік прискорення обчислювального процесу на кластері

Таблиця 1 – Комунікаційні витрати обчислювального процесу, що реалізує запропонований метод

Кількість задіяних ядер процесорів	Час пересилань та синхронізацій, с		Частка пересилань та синхронізацій	
	Запропонований метод	IGA	Запропонований метод	IGA
1	0	0	0	0
2	8,07	11,92	0,14	0,16
4	6,43	8,62	0,21	0,22
8	7,78	11,10	0,43	0,47
16	9,27	13,96	0,81	0,91

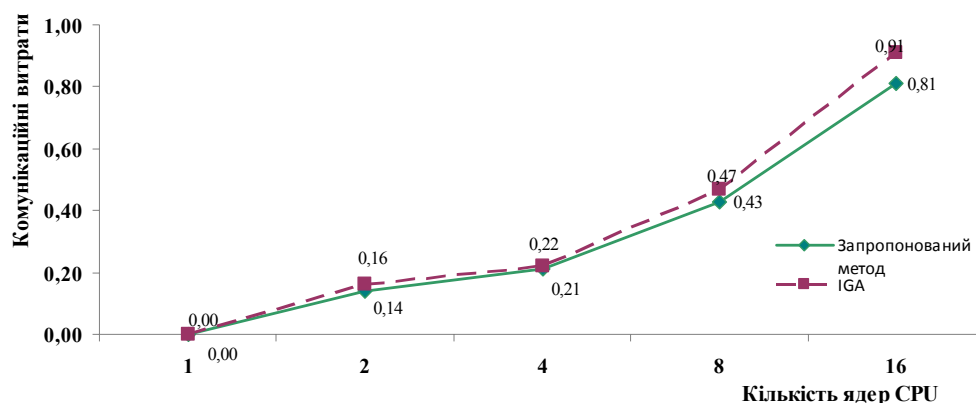


Рисунок 6 – Графік залежності комунікаційних витрат від числа задіяних ядер процесорів

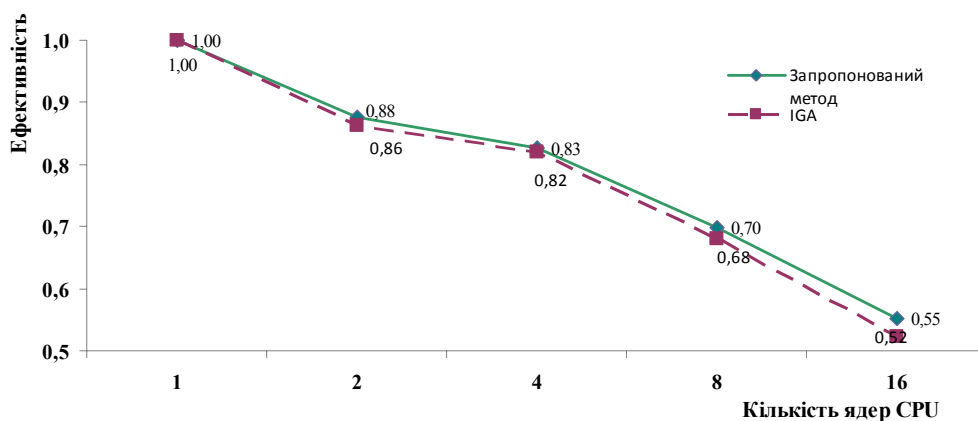


Рисунок 7 – Ефективність кластерної системи, що реалізує запропонований метод і метод IGA

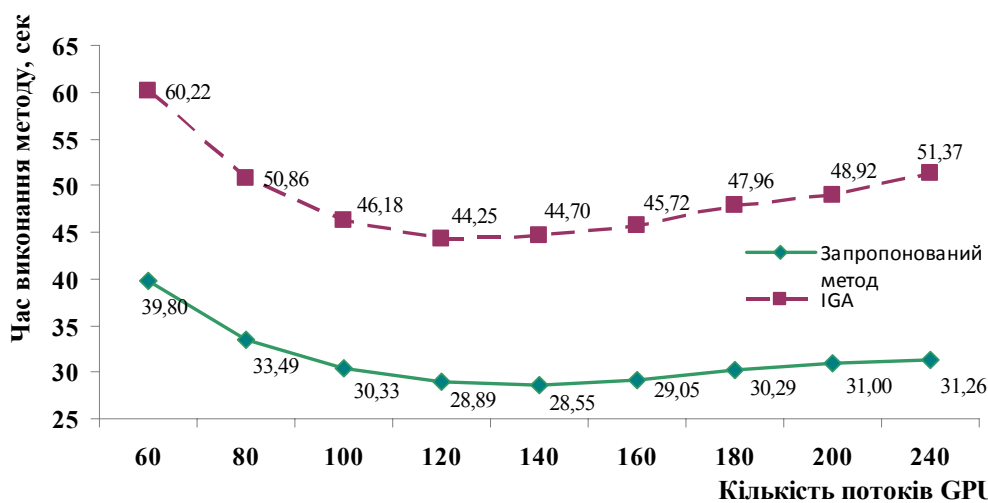


Рисунок 8 – Усереднений час виконання запропонованого методу і методу IGA на графічному процесорі

токів GPU і вимірювався час виконання методу за допомогою убудованих у пакет CUDA функцій. Експерименти для запропонованого методу і методу IGA були повторені по 2 рази на 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 і 240 потоках. Усереднений час виконання методів відображено на рис. 8.

Графіки прискорення і комунікаційних витрат, що ілюструють роботу досліджуваних методів при використанні графічного процесора (GPU), наведено на рис. 9 і 10, відповідно.

У таблиці 2 наведено комунікаційні витрати обчислювального процесу, що реалізує запропонований метод на графічному процесорі.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з рис. 4 і 5, запропонований метод у порівнянні з методом IGA дозволяє швидше виконати випадковий пошук, оскільки застосування модифікованих операторів створення нових рішень зменшує загальну кількість виконуваних на процесах операцій [17]. Прискорення обчислювального процесу, що реалізує запропонований метод і метод IGA, росте нелінійно зі збільшенням числа задіяних ядер процесорів.

Важливо відзначити, що обидва методи (запропонований метод і метод IGA) дозволили забезпечити побудову нейро-нечітких моделей із прийнятною точністю (при проведенні експериментів необхідно було синтезувати моделі, помилка прогнозування яких не перевищує 0,01). Помилка прогнозування на тестових даних склала 0,017 і 0,021 для запропонованого методу і методу IGA,

відповідно, що також є припустимим для розв'язуваної задачі індивідуального прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою.

Частка комунікаційних витрат (рис. 6, табл. 1) в обчислювальному процесі, що реалізує запропонований метод і метод IGA, істотно росте зі збільшенням кількості ядер задіяних процесорів. При цьому на більше, ніж восьми ядрах, частка комунікаційних витрат значно перевищує частку цільових обчислень. Тому при реалізації запропонованого методу на кластері доцільно застосовувати чотири-шість ядер процесорів, щоб збалансувати відношення витрат до ефективності системи. Застосування методу IGA на кластері так само є виправданим, проте, при вирішенні поставленої задачі IGA затратив більше часу на пересилання в порівнянні з запропонованим методом.

З рис. 7 видно, що обидва методи продемонстрували прийнятну ефективність у кластерній системі. Для запропонованого методу (рис. 8) збільшення числа потоків понад 140 приводить до уповільнення обчислювального процесу. Це можна пояснити ростом комунікаційних витрат, а також простоем незадіяних потоків. Для методу IGA збільшення кількості потоків уже понад 120 сповільнює обчислювальний процес.

Дані, відображені у табл. 2 та на рис. 10, демонструють істотне зниження комунікаційних витрат при виконанні запропонованого методу і методу IGA на GPU у порівнянні з кластером, комунікаційні витрати якого подані в таблиці 1.

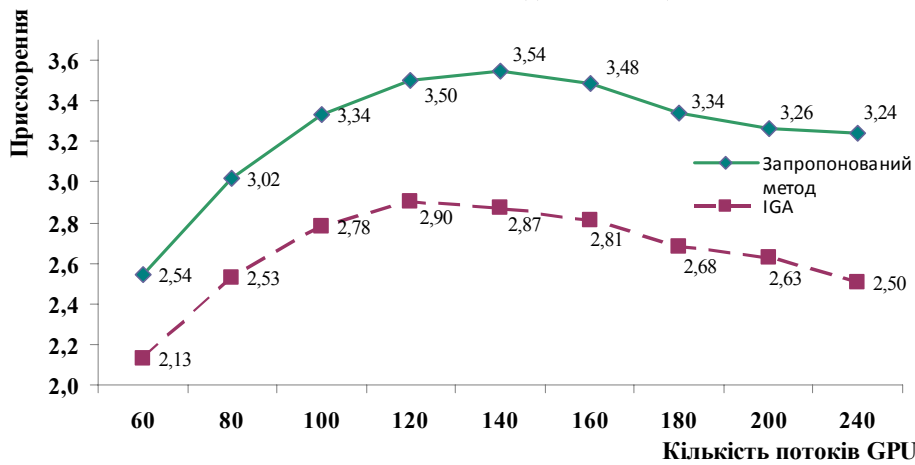


Рисунок 9 – Графік прискорення реалізації запропонованого методу і методу IGA на графічному процесорі

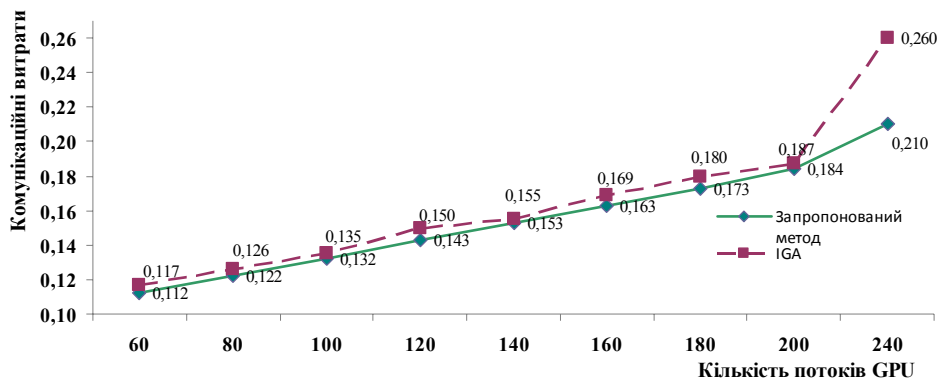


Рисунок 10 – Графік комунікаційних витрат на реалізацію запропонованого методу і методу IGA на GPU

Таблиця 2 – Комунікаційні витрати обчислювального процесу, що реалізує запропонований метод на GPU

Кількість задіяних потоків GPU	Час пересилань та синхронізацій, с		Частка пересилань та синхронізацій, с	
	Запропонований метод	IGA	Запропонований метод	IGA
60	4,46	7,05	0,112	0,117
80	4,09	6,41	0,122	0,126
100	4,00	6,23	0,132	0,135
120	4,13	6,64	0,143	0,150
140	4,37	6,93	0,153	0,155
160	4,74	7,73	0,163	0,169
180	5,24	8,63	0,173	0,180
200	5,70	9,15	0,184	0,187
240	6,56	13,36	0,210	0,260

Таким чином, застосування паралельних систем для реалізації запропонованого методу є доцільним, оскільки істотно знижується затрачуваний на виконання методу час (у 8,84 рази для 16-ти ядер кластеру та у 3,54 рази для 140 потоків GPU). При цьому SIMD-система на основі GPU є істотно дешевшою за кластер і може бути використана для одержання прийняттого прискорення реалізації запропонованого методу. У порівнянні з методом IGA запропонований метод продемонстрував кращу масштабованість як на кластері, так і на GPU. Крім того, запропонований метод дозволяє швидше одержати рішення й ефективніше задіє обчислювальні ресурси, забезпечуючи при цьому побудову моделей з прийнятною точністю прогнозування.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу автоматизації індивідуального прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано метод синтезу нейро-нечітких моделей на основі паралельних обчислень, який ґрунтується на стохастичному підході при пошуку значень параметрів, що настраюються, і полягає в розподілі найбільш ресурсномістких етапів по вузлах паралельної обчислювальної системи. Це дозволяє скоротити час настроювання параметрів (значень вагових коефіцієнтів і параметрів функцій належності нейроелементів) синтезованих нейромоделей.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований паралельний метод і дозволяє виконувати побудову нейро-нечітких мереж на основі заданих наборів спостережень для синтезу моделей індивідуального прогнозування стану здоров'я хворого гіпертонічною хворобою. Результати проведених експериментів свідчать про прийнятні значення показників ефективності запропонованого паралельного методу синтезу нейро-нечітких мереж.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні запропонованого підходу до синтезу нейро-нечітких мереж з навчальних вибірок даних для вирішення практичних задач неруйнівного контролю якості.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Запорізького національного технічного університету «Інтелектуальні інформаційні технології автоматизації проектування, моделювання, керування та діагностування виробничих процесів і систем» (номер державної реєстрації 0112U005350) за підтримки міжнародного проекту «Centers of Excellence for young REsearchers» (CERES) програми «Tempus» Європейської Комісії (реєстраційний номер 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES).

Навчальну вибірку надано професором Запорізького національного технічного університету проф. С. О. Субботіним.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Beevers D. G. ABC of hypertension / D. G. Beevers, G. Y. Lip, E. O'Brien. – London : BMJ Books, 2007. – 88 p.
2. Camm A. J. The ESC Textbook of Cardiovascular Medicine / A. J. Camm, T. F. Luscher, P. Serruys. – Hoboken : Wiley-Blackwell, 2006. – 1136 p. DOI: 10.1093/med/9780199566990.001.0001.
3. Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications / K. Suzuki. – New York : InTech, 2013. – 264 p. DOI: 10.5772/3409.
4. Hanrahan G. Artificial Neural Networks in Biological and Environmental Analysis / G. Hanrahan. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2011. – 214 p. DOI: 10.1201/b10515.
5. 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.
6. Baragona R. Evolutionary Statistical Procedures: An Evolutionary Computation Approach to Statistical Procedures Designs and Applications / R. Baragona, F. Battaglia, I. Poli. – Berlin : Springer, 2011. – 296 p.
7. Spall J. C. Introduction to Stochastic Search and Optimization / J. C. Spall. – Hoboken : Wiley, 2003. – 618 p. DOI: 10.1002/0471722138.
8. Дневник погоды [Электронный ресурс]. – Москва : ООО «НПЦ «Мэп Мейкер», 2014. – Режим доступа: <http://www.gismeteo.ru/diary/5093>.
9. Weber M. Observations of Solar Activity (Mg II Index) by GOME, SCIAMACHY, and GOME-2 [Electronic resource]. – Bremen: University of Bremen, 2014. – Access mode: <http://www.iup.uni-bremen.de/gome/gomemgii.html>
10. Smith S. Genetic and Evolutionary Computation: Medical Applications / S. Smith, S. Cagnoni. – Chichester : John Wiley & Sons, 2011. – 250 p. DOI: 10.1002/9780470973134.
11. Yu X. Introduction to Evolutionary Algorithms (Decision Engineering) / X. Yu, M. Gen. – London: Springer, 2010. – 418 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5.
12. Cantu-Paz E. Efficient and Accurate Parallel Genetic Algorithms / E. Cantu-Paz. – Massachusetts : Kluwer Academic Publishers, 2001. – 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-4369-5.
13. Encyclopedia of artificial intelligence / Eds.: J. R. Dopico, J. D. de la Calle, A. P. Sierra. – New York : Information Science Reference, 2009. – Vol. 1–3. – 1677 p.
14. Encyclopedia of machine learning / [eds. C. Sammut, G. I. Webb]. – New York : Springer, 2011. – 1031 p.
15. Mumford C. L. Computational Intelligence / C. L. Mumford, L. C. Jain. – Berlin : Springer-Verlag, 2009. – 732 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01799-5.
16. Bishop C.M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York: Springer, 2006. – 738 p.
17. 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.

18. Gebali F. Algorithms and Parallel Computing / F. Gebali. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2011. – 364 p. DOI: 10.1002/9780470932025.
19. Roosta S.H. Parallel Processing and Parallel Algorithms: Theory and Computation / S. H. Roosta. – New York : Springer-Verlag, 2000. – 566 p.
20. Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP / M. J. Quinn. – New York: McGraw-Hill, 2004. – 529 p.
21. NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5 / Santa Clara: NVIDIA Corporation, 2014. – 117 p.

Стаття надійшла до редакції 20.03.2015.

Олейник А. А.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ БОЛЬНОГО НА ОСНОВЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Решена задача разработки математического обеспечения для автоматизации процесса индивидуального прогнозирования состояния здоровья больного гипертонической болезнью. Объектом исследования является процесс синтеза моделей для медицинского диагностирования. Предмет исследования составляют методы синтеза нейро-нечетких моделей для медицинского диагностирования. Цель работы: повысить эффективность процесса синтеза нейро-нечетких сетей для построения диагностических моделей на основе обучающих выборок. Предложен стохастический метод синтеза нейро-нечетких моделей на основе параллельных вычислений, основанный на стохастическом подходе при поиске значений настраиваемых параметров, и заключающийся в распределении наиболее ресурсоемких этапов по узлам параллельной вычислительной системы. Предложенный метод позволяет сократить время настройки параметров (значений весовых коэффициентов и параметров функций принадлежности нейроэлементов) синтезированных нейромоделей. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод. Проведены эксперименты по исследованию свойств предложенного метода. Результаты экспериментов позволяют рекомендовать предложенный метод для использования на практике.

Ключевые слова: множество решений, нейронная сеть, признак, параллельное программирование, прогнозирование, синтез модели.

Oliinyk A.

PhD., Associate Professor, Associate Professor of Department of Software Tools, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

SYNTHESIS OF NEURO-FUZZY MODEL FOR PATIENT HEALTH PREDICTING BASED ON PARALLEL COMPUTING

The problem of mathematical support development is solved to automate the process of individual health prediction of hypertensive patient. The object of study is the process of model synthesis for medical diagnosis. The subject of study are methods of neuro-fuzzy model synthesis for medical diagnosis. The purpose of the work is to improve the efficiency of the process of neuro-fuzzy network synthesis for constructing diagnostic models based on training samples. The stochastic method for the synthesis of neuro-fuzzy models based on parallel computing is proposed. It uses the stochastic approach for finding the values of adjustable parameters, and consists in the distribution of the most demanding stages on the nodes in parallel computing system. The proposed method can reduce the time of parameters calculation (the weighting coefficients and parameters of membership functions of neurons) of synthesized neuromodels. The software implementing proposed method is developed. The experiments to study the properties of the proposed method are conducted. The experimental results allow to recommend the proposed method for use in practice.

Keywords: solution set, neural network, feature, parallel programming, prediction, model synthesis.

REFERENCES

- Beevers D. G., Lip G. Y., O'Brien E. ABC of hypertension. London, BMJ Books, 2007, 88 p.
- Camm A. J., Luscher T. F., Serruys P. The ESC Textbook of Cardiovascular Medicine. AHoboken, Wiley-Blackwell, 2006, 1136 p. DOI: 10.1093/med/9780199566990.001.0001.
- Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications. New York, InTech, 2013, 264 p. DOI: 10.5772/3409.
- Hanrahan G. Artificial Neural Networks in Biological and Environmental Analysis. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2011, 214 p. DOI: 10.1201/b10515.
- Subbotin S. O. Podannja j obrobka znan' u sistemah shtuchnogo intelektu ta pidtrimki prijnattja rishen' : navch. posibnik. Zaporizhzhja, ZNTU, 2008, 341 p.
- Baragona R., Battaglia F., Poli I. Evolutionary Statistical Procedures: An Evolutionary Computation Approach to Statistical Procedures Designs and Applications. Berlin, Springer, 2011, 296 p.
- Spall J. C. Introduction to Stochastic Search and Optimization. Hoboken, Wiley, 2003, 618 p. DOI: 10.1002/0471722138.
- Dnevnik pogody [Elektronnyj resurs]. Moscow, OOO «NPC «Мер Меjker», 2014, Rezhim dostupa: <http://www.gismeteo.ru/diary/5093>.
- Weber M. Observations of Solar Activity (Mg II Index) by GOME, SCIAMACHY, and GOME-2 [Electronic resource]. Bremen, University of Bremen, 2014, Access mode: <http://www.iup.uni-bremen.de/gome/gomengii.html>
- Smith S., Cagnoni S. Genetic and Evolutionary Computation: Medical Applications. Chichester, John Wiley & Sons, 2011, 250 p. DOI: 10.1002/9780470973134.
- Yu X., Gen M. Introduction to Evolutionary Algorithms (Decision Engineering). London, Springer, 2010, 418 p. DOI: 10.1007/978-1-84996-129-5.
- Cantu-Paz E. Efficient and Accurate Parallel Genetic Algorithms. Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 2001, 162 p. DOI: 10.1007/978-1-4615-4369-5.
- Eds.: J. R. Dopico, J. D. de la Calle, A. P. Sierra. Encyclopedia of artificial intelligence. New York, Information Science Reference, 2009, Vol. 1–3, 1677 p.
- Eds. C. Sammut, G. I. Webb Encyclopedia of machine learning. New York, Springer, 2011, 1031 p.
- Mumford C. L., Jain L. C. Computational Intelligence. Berlin, Springer-Verlag, 2009, 732 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01799-5.
- Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. New York, Springer, 2006, 738 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.
- Gebali F. Algorithms and Parallel Computing. New Jersey, John Wiley & Sons, 2011, 364 p. DOI: 10.1002/9780470932025.
- Roosta S. H. Parallel Processing and Parallel Algorithms: Theory and Computation. New York, Springer-Verlag, 2000, 566 p.
- Quinn M. J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. New York, McGraw-Hill, 2004, 529 p.
- NVIDIA CUDA Compute Unified Device Architecture 5.5 / Santa Clara. NVIDIA Corporation, 2014, 117 p.

¹Асистент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, м. Суми, Україна

³Студент факультету Електроніки та інформаційних технологій, Сумський державний університет, м. Суми, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОСПОЖИВАННЯ БУДІВЕЛЬ СОЦІАЛЬНО-БЮДЖЕТНОЇ СФЕРИ З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Запропоновано метод удосконалення процесів підтримки прийняття рішень при управлінні режимами теплозабезпечення закладів соціально-бюджетної сфери шляхом розроблення моделі прогнозу споживання теплової енергії будівлею. Об'єктом дослідження є процес вибору найбільш оптимальної архітектури нейронної мережі для вирішення задачі прогнозування теплоспоживання будівлі соціально-бюджетної сфери. Предмет дослідження становлять моделі прогнозування теплоспоживання будівель соціально-бюджетної сфери з використанням штучних нейронних мереж. Метою даного дослідження є підвищення достовірності прогнозування потреб будівель соціально-бюджетної сфери у теплозабезпеченні. Розроблено моделі короткострокового прогнозування теплозабезпечення об'єктів соціально-бюджетної сфери з використанням штучних нейронних мереж, що враховують вплив погодних умов, коливання потреби в тепловій енергії в залежності від графіку роботи закладу, а також минулі значення потреб у теплозабезпеченні. Моделі побудовано на основі архітектур нелінійної мережі типу вхід-вихід, нелінійної авторегресійної мережі, нелінійної авторегресійної нейронної мережі із зовнішніми входами. Запропоновані моделі реалізовано у програмному середовищі Matlab, для навчання використано алгоритм Левенберга-Марквардта. Проведено експерименти з дослідження точності розроблених моделей, які показали, що найбільшої точності прогнозу можна досягти при використанні моделі типу NARX. Використання запропонованої моделі в рамках інформаційної системи «HeatCAM» для прогнозування теплоспоживання будівель протягом опалювального сезону дозволяє підвищити ефективність підтримки процесу прийняття рішень при управлінні режимами теплозабезпечення, що призводить до зниження споживання теплової енергії.

Ключові слова: теплоспоживання, регулювання, моделювання, інформаційна система, прогнозування, нейронні мережі, енергозбереження.

НОМЕНКЛАТУРА

$F(\cdot)$ – оператор нейромережевого відображення;
 L – кількість нейронів прихованого шару;
 MAE – середня абсолютна помилка прогнозу;
 $MAPE$ – середня абсолютна помилка прогнозу у відсотках;
 MSE – середньоквадратична помилка прогнозу;
 N – потужність множини даних для перевірки достовірності прогнозу.
 n – значення періоду затримки прогнозу;
 NAR – модель нелінійної авторегресійної нейронної мережі;
 $NARX$ – модель нелінійної авторегресійної нейронної мережі з екзогенними входами;
 NIO – модель нейронної мережі типу вхід-вихід;
 Q – критерій якості прогнозування;
 $RMSE$ – квадратний корінь із середньоквадратичної помилки прогнозу;
 t – дискретний момент часу;
 \hat{w} – множина значень вагових коефіцієнтів нейронної мережі;
 X – множина даних моніторингу теплоспоживання;
 $x(t)$ – вектор вхідних змінних;
 x_1 – компонента вектору $x(t)$ температура навколишнього середовища, С;
 x_2 – компонента вектору $x(t)$ швидкість вітру, м/с;
 x_3 – компонента вектору $x(t)$ атмосферний тиск, мм. рт. ст.;
 x_4 – компонента вектору $x(t)$ вологість повітря, %;
 x_5 – компонента вектору $x(t)$ тип дня тижня;
 $x(t-n)$ – значення вхідного сигналу нейронної мережі у попередні періоди часу;

Y – множина вихідних даних системи прогнозування;
 $y(t)$ – фактичне значення теплоспоживання будівлі, Гкал;
 $\hat{y}(t)$ – прогнозоване значення теплоспоживання будівлі, Гкал;
 $y(t-n)$ – значення вихідного сигналу нейронної мережі у попередні періоди часу;
 Z – множина даних теплоспоживання будівлі;
 Z_{tr} – множина даних для навчання нейронної мережі;
 Z_t – тестова множина даних;
 Z_v – множина даних для перевірки достовірності прогнозу.

ВСТУП

Застосування інформаційних технологій у теплоенергетиці дозволяє вирішити широке коло задач проектування, експлуатації та оперативно-диспетчерського управління функціонуванням систем теплозабезпечення. Основні дослідження у цьому напрямку пов'язані з побудовою моделей для розрахунків параметрів поточного поділу, оцінкою поточного стану та оптимізацією схем теплових мереж, розробкою алгоритмів аналізу та оптимізації ustalених режимів теплозабезпечення, прогнозування режимів теплоспоживання, а також потреб у паливних ресурсах та тепловій енергії.

Прогнозування, як складова системних досліджень енергетики, є ключовим елементом управління її розвитком [1], що має на меті підвищення енергоефективності та дозволяє досягти економії енергетичних ресурсів.

Реалізація задач регулювання теплоспоживання будівель з метою забезпечення комфортних умов для проживання та роботи в опалювальних приміщеннях та усу-

нення понаднормового споживання теплової енергії при коливанні температури навколишнього середовища та потреб у теплозабезпеченні в залежності від графіку роботи закладу вимагає застосування прогнозних моделей з високим ступенем достовірності.

Метою даного дослідження є підвищення достовірності прогнозування потреб будівель соціально-бюджетної сфери у теплозабезпеченні. При цьому необхідно провести аналіз існуючих методів прогнозування, що застосовуються у теплоенергетиці, розробити моделі прогнозування потреб будівлі у тепловій енергії з використанням штучних нейронних мереж, реалізувати створені моделі та провести аналіз результатів моделювання.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

У загальному вигляді задача нейромережевого прогнозування потреби будівлі соціально-бюджетної сфери у теплової енергії зводиться до побудови математичної моделі на основі сукупності даних щодо кліматичних умов, графіку роботи та теплоспоживання будівлі, що поділяються на множину вхідних даних X та вихідних даних Y при заданих обмеженнях. Процедура побудови математичної моделі системи теплоспоживання Z на основі даних моніторингу є задачею знаходження такої моделі нейронної мережі, яка б виконувала нелінійну апроксимацію відображення, при якому забезпечується прийнятне значення заданого критерію якості Q :

$$\hat{y}(t) = F(X(t)). \quad (1)$$

Компоненти вхідного вектора X у формулі (1) для кожного об'єкта теплоспоживання:

$$X(t) = (x(t), t). \quad (2)$$

Результуюча змінна $\hat{y}(t)$ – витрати теплової енергії на обігрів за час t кожного об'єкта теплоспоживання, Гкал.

Для оцінки достовірності моделі прогнозування та вибору найбільш оптимальної для прогнозування теплоспоживання архітектури нейронної мережі при обчисленні критерію якості Q можуть бути використані помилки прогнозу:

– середня абсолютна помилка прогнозу MAE , що обчислюється за формулою:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |y(t) - \hat{y}(t)|; \quad (3)$$

– середню абсолютну помилку прогнозу у відсотках $MAPE$, що розраховується за формулою:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left| \frac{y(t) - \hat{y}(t)}{y(t)} \right| \cdot 100\%; \quad (4)$$

– квадратний корінь із середньквадратичної помилки прогнозу $RMSE$, що розраховується за формулами:

$$MSE = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (y(t) - \hat{y}(t))^2, \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE}. \quad (6)$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

При дослідженні енергетичних систем широко застосовуються формалізовані методи, що базуються на використанні моделей та алгоритмів обробки й аналізу даних. В останні роки з'явилась значна кількість методів для вирішення проблеми прогнозування у теплоенергетиці [2]. При прогнозування потреб будівлі у тепловій енергії використовуються методи аналізу часових рядів [3] (дозволяють на основі моделі, що описує поведінку часового ряду, визначити його майбутні значення), авторегресійні моделі та методи [4–6] (базуються на побудові функції лінійної залежності параметрів часового ряду від їх попередніх значень), а також методи з використанням штучних нейронних мереж [7–9] (проводиться навчання нейронної мережі з використанням навчальної вибірки даних, яка потім застосовується при визначенні майбутніх значень вихідних параметрів).

Порівняльну характеристику методів, що використовуються при короткостроковому прогнозуванні теплоспоживання будівель, їх переваги та недоліки наведено в табл. 1.

Найпоширенішим методом прогнозування на даний час є використання штучних нейронних мереж. При цьому враховуються різні фактори впливу на потребу в тепло забезпеченні. Для короткострокового прогнозування потреб будівлі у теплозабезпеченні в роботі [8] використано багат шарову нейронну мережу з двома шарами, входами якої є добові дані теплоспоживання, а також середньодобова температура повітря навколишнього середовища. Для навчання даної нейронної мережі застосовується алгоритм Левенберга-Маркварда. В роботі [7] запропоновано враховувати при прогнозуванні потреб у теплозабезпеченні метеорологічні умови навколишнього середовища (температуру, атмосферного тиску та швидкості вітру).

Недоліками розглянутих вище моделей є те, що вони не враховують соціальний фактор. Специфіка роботи закладів соціально-бюджетної сфери полягає у тому, що потреби у теплозабезпеченні залежать не лише від кліматичних умов навколишнього середовища, а й від режи-

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика методів прогнозування у теплоенергетиці

Метод	Переваги	Недоліки
Аналізу часових рядів	– простота; – прозорість моделювання;	– не враховує можливої взаємодії змінних;
Авторегресійні методи	– простота, прозорість моделювання; – одноманітність аналізу і проектування;	– трудомісткість і ресурсомісткість ідентифікації моделей; – неможливість моделювання нелінійних залежностей; – низька адаптивність;
Нейромережеві методи	– нелінійність моделей; – масштабованість; – висока адаптивність; – одноманітність аналізу і проектування;	– складність вибору архітектури; – жорсткі вимоги до навчальної вибірки; – складність вибору алгоритму навчання; – ресурсомісткість процесу навчання

му роботи закладу (робочий день, вихідний, канікули взимку). Таким чином у даній роботі запропоновано розглядати у якості вхідних параметрів прогнозування як дані кліматичних умов, так і режим роботи закладу. Також порівняння декількох архітектур нейронних мереж дозволить визначити найбільш прийнятний тип моделі нейронної мережі.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У даній роботі для вирішення задачі прогнозування потреби будівлі у тепловій енергії пропонується застосовувати методи з використанням штучних нейронних мереж. Однією з головних переваг штучних нейронних мереж порівняно з іншими методами прогнозування є можливість моделювання нелінійних залежностей. Точність прогнозування при використанні даного методу залежить від вибору топології, алгоритму навчання, що використовується для визначення вагових коефіцієнтів, а також входів нейронної мережі.

Процес побудови нейромережі для прогнозування теплоспоживання будівлі умовно можна розподілити на етап вибору типу моделі нейромережі, що визначає її структуру, та етап пошуку оптимальних параметрів нейромережі.

На основі проведеного аналізу попередніх досліджень для нейромережевого прогнозування обрано архітектуру нейронної мережі типів [10]:

1) нелінійна нейромережа прямого розповсюдження типу «вхід-вихід», що враховує для прогнозування лише вхідні змінні:

$$\hat{y}(t) = F(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n)); \quad (7)$$

2) нелінійна авторегресійна мережа, що приймає в якості вхідних даних прогнозовані дані виходів:

$$\hat{y}(t) = F(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n)); \quad (8)$$

3) нелінійна авторегресійна нейромережа з екзогенними входами, яка поєднує як вхідні змінні, так і дані попередніх прогнозів:

$$\hat{y}(t) = F(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n)). \quad (9)$$

На етапі налаштування параметрів моделі нейронної мережі здійснюється підбір вагових коефіцієнтів нейронної мережі \hat{w} в результаті реалізації процедури навчання, яка полягає у відображенні множини даних моніторингу на множині вагів нейромережевої моделі $Z \rightarrow \hat{w}$ з метою отримання оптимального, за певним критерієм, прогнозного значення вихідного сигналу $\hat{y}(t)$.

Для навчання нейронної мережі множини даних про теплоспоживання Z слід розбити на три підмножини, що не перетинаються – множини даних для навчання Z_{tr} , тестову множини Z_t та множини для перевірки Z_v . Множини даних для навчання та перевірки формуються на основі даних моніторингу теплоспоживання будівлі закладу соціально-бюджетної сфери за декілька попередніх опалювальних сезонів. Тестування нейронної мережі, що пройшла навчання за обраним алгоритмом, відбувається на обмеженій кількості даних моніторингу, що відображають зміни теплоспоживання будівлі в залежності від кліматичних умов навколишнього середовища та графіку роботи закладу.

Для ідентифікації параметрів моделі нейронної мережі необхідно шляхом побудови нейронної мережі за даними навчальної вибірки та проведення обчислювального експерименту знайти оптимальні значення кількості нейронів прихованого шару L та множини значень вагових коефіцієнтів нейромережі \hat{w} , за яких похибка обчислення є найменшою. Для оцінки точності прогнозування слід обчислити помилки прогнозу та порівняти їх із допустимими значеннями.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Запропоновані моделі прогнозування теплоспоживання будівлі соціально-бюджетної сфери реалізовано у програмному середовищі Matlab Neural Network Toolbox. У якості об'єкта для тестування розроблених моделей прогнозування обрано систему теплоспоживання будівель Сумського державного університету. Архів даних для навчання нейронної мережі сформовано за допомогою підсистеми моніторингу інформаційно-аналітичної системи «HeatCAM» [11]. Вхідними даними для прогнозування є значення кількості теплової енергії, зібрані з лічильників, встановлених у корпусах університету, а також дані кліматичних умов навколишнього середовища та графіку роботи закладу.

У програмному середовищі Matlab Neural Network Toolbox побудовано архітектури моделей нейронних мереж типів NIO , NAR та $NARX$. Множину даних про теплоспоживання Z для навчання нейронної мережі було розбито у пропорції: $Z_{tr} - 70\%$, $Z_t - 20\%$, $Z_v - 10\%$.

Шляхом проведення розрахункових експериментів встановлено кількість нейронів прихованого шару L (Number of hidden neuron) – 10, параметр затримки, що визначає число попередніх даних які будуть використовуватись у прогнозуванні n (Number of delays) – 7.

Для навчання даної нейронної мережі обрано метод нелінійної оптимізації Левенберга-Марквардта, який характеризується більш високою швидкістю збіжності у порівнянні з іншими градієнтними методами [10].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати точності прогнозу побудованих моделей для тестової вибірки даних наведено в табл. 2.

На рис. 1–3 зображено графіки фактичного значення теплоспоживання будівлі одного з корпусів Сумського державного університету та прогнозованого значення, одержаного при використанні моделей нейронної мережі типів NIO , NAR та $NARX$ за три тижні січня 2013.

Результати обчислювальних експериментів з оцінки достовірності запропонованих моделей наведено в табл. 3.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Як показують результати розрахунку точності моделей прогнозування для тестової вибірки даних, наведені в табл. 2, найбільшу точність має прогноз теплоспоживання з використанням моделі нелінійної нейронної авторегресії.

Таблиця 2 – Порівняння точності моделей прогнозування типу NAR , NIO та $NARX$

Тип прогнозувальної моделі	Точність прогнозу, %
NAR	79,6
NIO	81,8
$NARX$	88,2

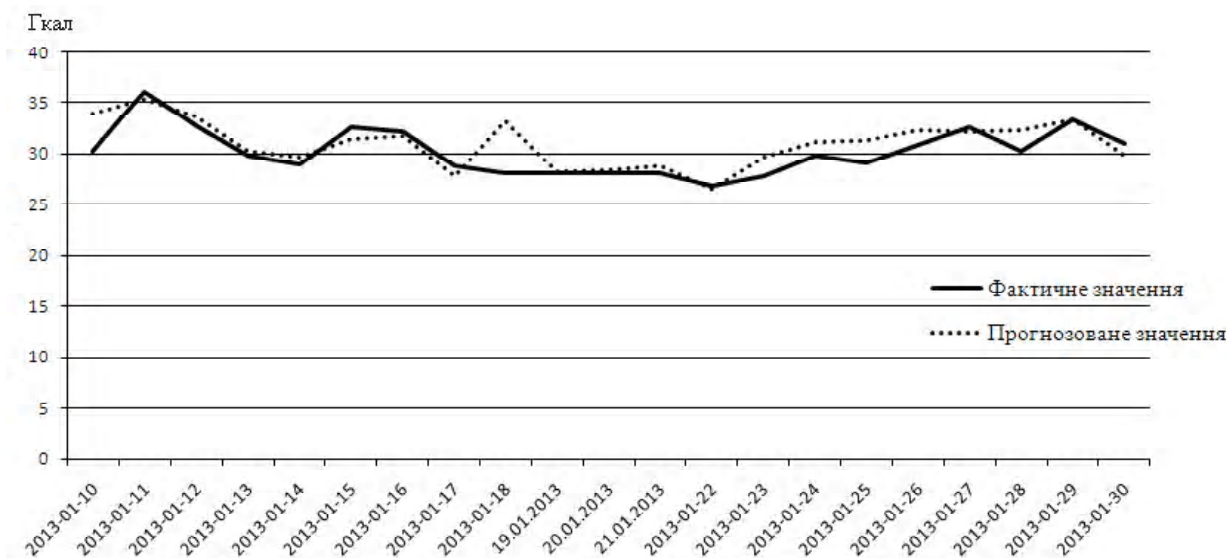


Рисунок 1 – Порівняння фактичних значень теплоспоживання будівлі та прогнозованих значень з використанням моделі нейронної мережі типу *NIO*

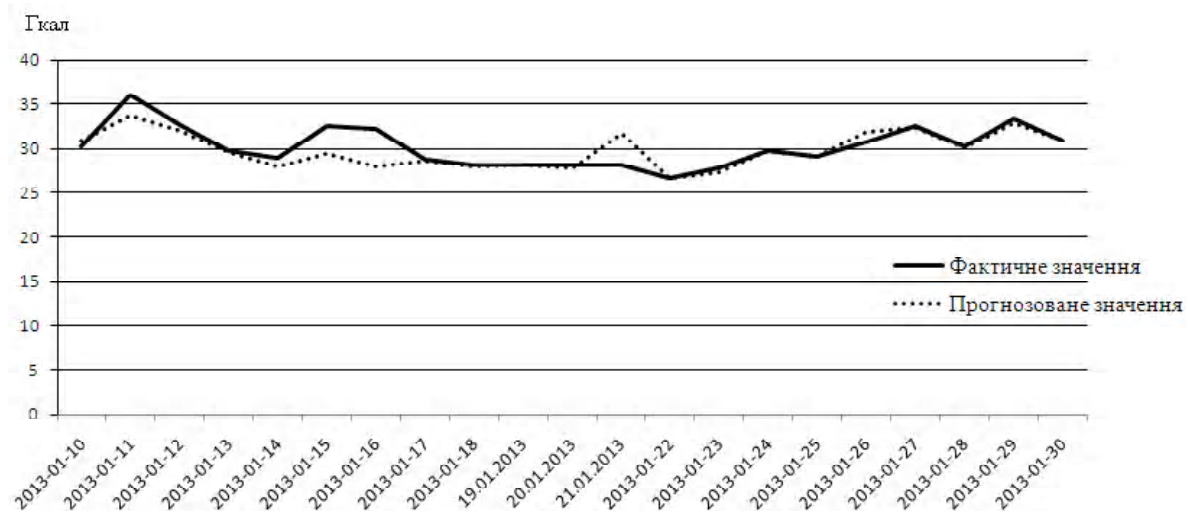


Рисунок 2 – Порівняння фактичних значень теплоспоживання будівлі та прогнозованих значень з використанням моделі нейронної мережі типу *NAR*

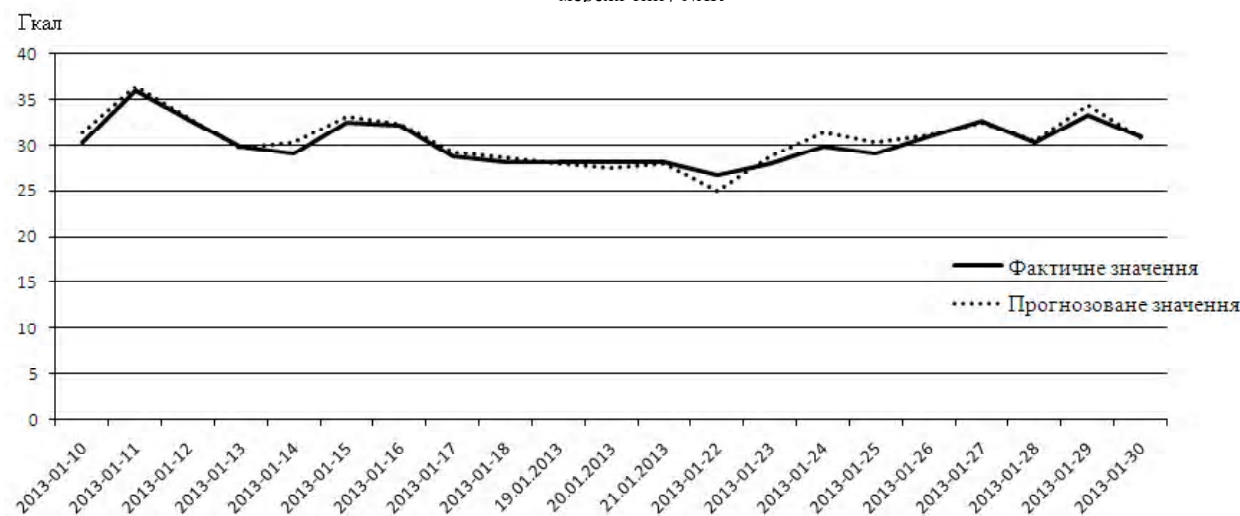


Рисунок 3 – Порівняння фактичних значень теплоспоживання будівлі та прогнозованих значень з використанням моделі нейронної мережі типу *NARX*

Таблиця 3 – Оцінка точності прогнозування теплоспоживання

Помилка	Тип моделі нейромережі	Грудень 2012 р.	Січень 2013 р.	Лютий 2013 р.
RMSE	NIO	6,15	1,74	0,89
	NAR	3,88	1,51	1,75
	NARX	2,19	0,88	0,66
MAE	NIO	4,69	1,25	0,37
	NAR	1,78	0,88	1,4
	NARX	1,06	0,68	0,47
MAPE, %	NIO	14,95	4,28	1,48
	NAR	5,16	2,89	5,67
	NARX	3,17	2,34	1,87

сійної мережі типу *NARX*, що враховує при прогнозуванні як результати попередніх прогнозованих значень, так і значення входів нейронної мережі. При проведенні обчислювальних експериментів з оцінки достовірності запропонованих моделей прогнозування теплоспоживання за формулами (3)–(6) обчислено помилки *RMSE*, *MAE* та *MAPE* (табл. 3). Для зими опалювального сезону 2012–2013 одержано значення середньої абсолютної помилки у відсотках *MAPE*, обчислене за формулою (4) для нейронної мережі типу *NARX* <5%, що свідчить про високу точність результатів прогнозування. Для нейронної мережі типу *NAR* помилка *MAPE* перевищує 5% для грудня 2012 р. та січня 2013 р. Значення помилки *MAPE* для грудня 2012 р. становить 14,95%, що свідчить про низьку точність даної моделі прогнозу. Як видно з графіків рис. 1–3 теплоспоживання в опалювальному сезоні 2012–2013 взимку коливається в межах від 20 до 40 Гкал на добу. Значення помилки *MAE*, обчислені за формулою (3), найменші для нейронної мережі типу *NARX* (не більше ніж 1,06 Гкал). Значення помилки *RMSE*, обчислені за формулою (6), також є найнижчим для нейронної мережі типу *NARX*. Таким чином результати проведених обчислювальних експериментів свідчать про те, що застосування нейронної мережі типу *NARX* при прогнозуванні теплоспоживання будівлі соціально-бюджетної сфери дозволяє досягти більшої точності прогнозу порівняно з нейронними мережами типів *NIO* та *NAR*.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну задачу прогнозування споживання теплової енергії закладами соціально-бюджетної сфери.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано модель прогнозування теплоспоживання будівлі закладу соціально-бюджетної сфери з використанням технології штучних нейронних мереж, яка враховує попередні значення теплоспоживання, параметри кліматичних умов навколишнього середовища та графік роботи закладу.

Проведено аналіз методів, що застосовуються при короткостроковому прогнозуванні теплоспоживання об'єктів соціально-бюджетної сфери, виявлено їх переваги та недоліки. Розроблено моделі прогнозування теплоспоживання будівель соціально-бюджетної сфери на основі нейронних мереж типу *NIO*, *NAR* та *NARX*, що враховують залежність рівня теплоспоживання від погодних умов, а також графіку роботи закладу. Моделі протестовано для прогнозування теплоспоживання одного з корпусів Сумського державного університету, проведено ідентифікацію параметрів запропонованих моделей. Для навчання нейронних мереж використано

алгоритм Левенберга-Марквардта. Проведено експерименти з оцінки достовірності прогнозу теплоспоживання з використанням запропонованих моделей, які показали, що найбільшої точності прогнозу можна досягти при використанні моделі типу *NARX*. Врахування в розробленій моделі як факторів впливу кліматичних умов, так і коливання потреб у теплозабезпеченні в залежності від графіку роботи закладу дозволило підвищити точність прогнозування.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що на основі запропонованої моделі типу *NARX* розроблено підсистему прогнозування інформаційно-аналітичної системи моніторингу та прогнозування теплозабезпечення будівель «HeatCAM». Подальші дослідження пов'язано з використанням результатів прогнозування для підтримки прийняття рішень щодо управління режимами теплозабезпечення будівель закладу соціально-бюджетної сфери.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи Сумського державного університету за темою: «Науково-методологічні основи розробки інформаційних технологій для розподілених систем», номер державної реєстрації 0111U006119, а також комплексної цільової програми розвитку Сумського державного університету «Енергоефективний СумДУ».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ-ИСЭМ / отв. ред. Н. И. Воропай. – Новосибирск : Наука, 2010. – 686 с.
2. Вороновский Г. К. Проблемы и перспективы использования искусственных нейронных сетей в энергетике. Ч. 2. Управление / Г. К. Вороновский, К. В. Махотило, С. А. Сергеев // Пробл. заг. энергетики. – 2007. – № 16. – С. 54–67.
3. Chramcov B. Heat Demand Forecasting for Concrete District Heating System / B. Chramcov, Ja. Baláte, M. Princ // International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences. – 2010. – Vol. 4, No. 4. – P. 231–239.
4. Bacher P. Short-term heat load forecasting for single family houses / P. Bacher, H. Madsen // Energy and Buildings. – 2013. – Vol. 65. – P.101–112.
5. Kontu K. Forecasting district heating consumption based on customer measurements [Electronic resource] / K. Kontu // International association EUROHEAT & POWER. – Access mode: http://www.euroheat.org/Files/Filer/Presentations/20130527_EHP_Congress/130527_1600_1730_PI_6_Kaisa_Kontu.pdf.
6. Grosswindhager S. Online Short-Term Forecast of System heat Load in District Heating Networks / S. Grosswindhager, A. Voigt, M. Kozek // ISF 2011 : the 31st International Symposium on Forecasting, Prague, Czech Republic, 26–29 June 2011 : conference proceedings. – Lancaster : International Institute of Forecasters, 2011. – P. 1–8.
7. Dostál P. Prediction of the heat supply daily diagram via artificial neural network / P. Dostál, B. Chramcov, Ja. Baláte // East West Fuzzy Colloquium : proceedings. Zittau, Germany, 2002. – P. 178–183.
8. Buhari M. Short-Term Load Forecasting Using Artificial Neural Network / M. Buhari, S. S. Adamu // IMECS 2012 : International MultiConference of Engineers and Computer Scientist, Hong Kong, 14–16 Mar 2012 : proceedings. – Hong Kong, 2012.
9. Grzenda M. Consumer-oriented heat consumption prediction / M. Grzenda // Control and Cybernetics. – 2012. – Vol. 41, No. 1. – P. 213–240.
10. Haykin S. Neural Networks – A Comprehensive Foundation / S. Haykin. – NJ : Prentice Hal, 2005. – 823 p.

11. Parfenenko Yu. Information System for Monitoring and Forecast of Building Heat Consumption / Yu. Parfenenko, V. Shendryk,

V. Nenja, S. Vashchenko // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Vol. 465 – P. 1–11.

Стаття надійшла до редакції 28.10.2014.

Після доробки 21.11.2014.

Парфененко Ю. В.¹, Шендрюк В. В.², Галиченко А. С.³

¹Ассистент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, г. Суми, Україна

²Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, г. Суми, Україна

³Студент факультета Електроніки та інформаційних технологій, Сумський державний університет, г. Суми, Україна

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕПЛОПОТРЕБЛЕНИЯ ЗДАНИЙ СОЦИАЛЬНО-БЮДЖЕТНОЙ СФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Предложен метод усовершенствования процессов поддержки принятия решений при управлении режимами теплопотребления учреждений социально-бюджетной сферы путем разработки модели прогноза потребления тепловой энергии зданием. Объектом исследования является процесс выбора наиболее оптимальной архитектуры нейронной сети для решения задачи прогнозирования теплопотребления здания социально-бюджетной сферы. Предмет исследования составляют модели прогнозирования теплопотребления зданий социально-бюджетной сферы с использованием искусственных нейронных сетей. Целью данного исследования является повышение достоверности прогнозирования потребностей зданий социально-бюджетной сферы в теплообеспечении. Разработаны модели краткосрочного прогнозирования теплопотребления объектов социально-бюджетной сферы с использованием искусственных нейронных сетей, учитывающих влияние погодных условий, колебания потребности в тепловой энергии в зависимости от графика работы учреждения, а также предыдущие значения потребностей в теплообеспечении. Модели построены на основе архитектур нелинейной сети типа вход-выход, нелинейной авторегрессионной сети, нелинейной авторегрессионной нейронной сети с внешними входами. Предложенные модели реализованы в программной среде Matlab, для обучения использован алгоритм Левенберга-Марквардта. Проведены эксперименты по исследованию точности разработанных моделей, которые показали, что наибольшей точности прогноза можно достичь при использовании модели типа NARX. Использование предложенной модели в рамках информационной системы «HeatCAM» для прогнозирования теплопотребления зданий в течение отопительного сезона позволяет повысить эффективность поддержки процесса принятия решений при управлении режимами теплообеспечения, что приводит к снижению потребления тепловой энергии.

Ключевые слова: теплопотребление, регулирование, моделирование, информационная система, прогнозирование, нейронные сети, энергосбережение.

Parfenenko Yu. V.¹, Shendryk V. V.², Galichenko O. S.³

¹Assistant of Computer Science Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine

²PhD, Associate Professor of Computer Science Department, Sumy State University, Sumy, Ukraine

³Student of Electronics and Information Technologies Faculty, Sumy State University, Sumy, Ukraine

PREDICTION THE HEAT CONSUMPTION OF SOCIAL AND PUBLIC SECTOR BUILDINGS USING NEURAL NETWORKS

The method of improvement the process of decision support to improve management of heat supplies' modes through the development of prediction heat consumption model of the social and public sector building is proposed. The object of the study is the process of choosing the most optimal architecture of the neural network to solve goals of forecasting of heat consumption of the building of social and public sector. The subject of the study is models prediction heat consumption of buildings of social and public sector using artificial neural networks. The purpose of this study is to improve the forecasting reliability of heat energy demand of social and public sector buildings. Models of short-term prediction of heat energy demand of social and public sector buildings using artificial neural networks that take into account the influence of weather conditions, fluctuations in demand for thermal energy depending on the type of day of the week and the previous values of heat energy demand are proposed. Models are based on such architectures of neural network's as a nonlinear network input-output, a nonlinear autoregressive network, a nonlinear autoregressive neural network with external inputs. The proposed models were implemented in the programming environment Matlab, to train their the Levenberg-Marquard algorithm was used. Experiments on the study of the accuracy of the developed models, which showed that the greatest accuracy of prediction can be achieved by using a model type NARX, were carried. Using the proposed model within the information system «HeatCAM» for the prediction of building's heat consumption during the heating season can increase the effectiveness of decision support in the management of heating modes, which reduces heat consumption.

Keywords: heat consumption, management, modeling, information systems, prediction, neural networks, energy saving.

REFERENCES

1. Voropaj N. I. Sistemnye issledovaniya v jenergetike: Retrospektiva nauchnyh napravlenij SEI-ISEM. Novosibirsk, Nauka, 2010, 686 p.
2. Voronovskij G. K., Mahotilo K. V., Sergeev S. A.. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya iskusstvennyh nejronnyh setej v jenergetike. Ch. 2. Upravlenie, Problemy obshhej jenergetiki, 2007, No. 16, pp. 54–67.
3. Chramcov B. Baláte Ja., Princ M. Heat Demand Forecasting for Concrete District Heating System, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2010, Vol. 4, No. 4, pp. 231–239.
4. Bacher P., Madsen H. Short-term heat load forecasting for single family houses, *Energy and Buildings*, 2013, Vol. 65, pp.101–112.
5. Kontu K. Forecasting district heating consumption based on customer measurements [Electronic resource], *International association EUROHEAT & POWER*. Access mode: http://www.euroheat.org/Files/Filer/Presentations/20130527_EHP_Congress/130527_1600_1730_PI_6_KaisaKontu.pdf.
6. Grosswindhager S., Voigt A., Kozek M., Online Short-Term Forecast of System heat Load in District Heating Networks, *ISF 2011 : the 31st International Symposium on Forecasting, Prague, Czech Republic, 26–29 June 2011 : proceedings*. Lancaster, International Institute of Forecasters, 2011, pp. 1–8.
7. Dostál P., Chramcov B., Baláte Ja. Prediction of the heat supply daily diagram via artificial neural network, *East West Fuzzy Colloquium : proceedings*. Zittau, Germany, 2002, pp. 178–183.
8. Buhari M., Adamu S. S. Short-Term Load Forecasting Using Artificial Neural Network, *IMECS 2012 : International MultiConference of Engineers and Computer Scientist, Hong Kong, 14–16 Mar 2012 : proceedings*. Hong Kong, 2012.
9. Grzenda M. Consumer-oriented heat consumption prediction, *Control and Cybernetics*, 2012, Vol.41, No. 1, pp. 213–240.
10. Haykin S. Neural Networks – A Comprehensive Foundation. NJ, Prentice Hal, 2005, 823 p.
11. Parfenenko Yu., Shendryk V., Nenja V., Vashchenko S. Information System for Monitoring and Forecast of Building Heat Consumption, *Communications in Computer and Information Science*, 2014, Vol. 465, pp. 1–11.