Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік
№ 2(41) 2017
Заснований у січні 1999 року.
Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.
ISSN 1607-3274 (друкований), ISSN 2313-688X (електронний).
Запоріжжя
ЗНТУ
2017

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год
№ 2(41) 2017
Основан в январе 1999 года.
Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.
ISSN 1607-3274 (печатный), ISSN 2313-688X (электронный).
Запорожье
ЗНТУ
2017

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year
№2(41) 2017
Founded in January 1999.
Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.
ISSN 1607-3274 (print), ISSN 2313-688X (on-line).
Zaporizhzhya
ZNTU
2017

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал входить до наукометричної бази Thomson Reuters Web of Sciense.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії:

Андроулідакіс Й., д-р філософії, Греція
Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна
Бодянський Є. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління
Васильєв С. М., д-р фіз.-мат. наук, академік РАН, Росія
Гімпілевич Ю. Б., д-р техн. наук, Україна
Горбань О. М., д-р фіз.-мат. наук, Великобританія
Дробахін О. О., д-р фіз.-мат. наук, Україна
Зайцева О. М., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина
Камеяма М., д-р техн. наук, Японія
Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Україна
Корніч Г. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна, редактор розділу з радіофізики
Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна
Лебедєв Д. В., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з управління
Левашенко В. Г., канд. фіз.-мат. наук, Словаччина
Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль
Марковська-Качмар У., д-р наук, Польща
Олещук В. О., канд. фіз.-мат. наук, Норвегія, редактор розділу з радіоелектроніки
Онуфрієнко В. М., д-р фіз.-мат. наук, Україна
Папшицький М., д-р філософії, Польща
Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна
Рубель О. І., канд. техн. наук, Канада
Хаханов В. І., д-р техн. наук, Україна, редактор розділу з інформатики
Шарпанських О. А., д-р філософії, Нідерланди, редактор розділу з інформатики

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 10 від 09.06.2017.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

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

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

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорізький національний технічний університет, 2017

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

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

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

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал входит в наукометрическую базу Thomson Reuters Web of Sciense.

Журнал реферируется 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, ВИНИТИ, Джэрэло), полный перечень которых представлен на сайте: http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0.

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор – Субботин С. А., д-р. техн. наук, Украина

Зам. главного редактора – Пиза Д. М., д-р техн. наук, Украина

Члены редколлегии:

Андроулидакис И., д-р философии, Греция
Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина
Бодянский Е. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению
Васильев С. Н., д-р физ.-мат. наук, академик РАН, Россия
Гимпилевич Ю. Б., д-р техн. наук, Украина
Горбань А. Н., д-р. физ.-мат. наук, Великобритания
Дробахин О. О., д-р физ.-мат. наук, Украина
Зайцева Е. Н., канд. физ.-мат. наук, Словакия
Камеяма М., д-р техн. наук, Япония
Карпуков Л. М., д-р техн. наук, Украина
Корнич Г. В., д-р физ.-мат. наук, Украина, редактор раздела по радиофизике
Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина
Лебедев Д. В., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по управлению
Левашенко В. Г., канд. физ.-мат. наук, Словакия
Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль
Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша
Олещук В. А., канд. физ.-мат. наук, Норвегия, редактор радиоэлектроники
Онуфриенко В. М., д-р физ.-мат. наук, Украина
Папшицький М., д-р философии, Польша
Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина
Рубель О. И., канд. техн. наук, Канада
Хаханов В. И., д-р техн. наук, Украина, редактор раздела по информатике
Шарпанских А. А., доктор философии, Нидерланды – редактор раздела по информатике

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 10 от 09.06.2017.

Журнал сверстан редакционно-издательским отделом ЗНТУ.

Веб-сайт журнала: http://ric.zntu.edu.ua.

Адрес редакции: Редакция журнала «РИУ», Запорожский национальный технический университет, ул. Жуковского, 64, г. Запорожье, 69063, Украина.

Тел.: +38-061-769-82-96 – редакционно-издательский отдел
Факс: (061) 764-46-62
E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорожский национальный технический университет, 2017

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is included into Thomson Reuters Web of Sciense.

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece
V. M. Bezruk, Doctor of Science in Engineering, Ukraine
Ye. V. Bodyanskiy , Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor
O. O. Drobakhin, Doctor of Science in Physics and Mathematics
Yu. B. Gimpilevich, Doctor of Science in Engineering, Ukraine
A. N. Gorban, Doctor of Science in Physics and Mathematics, United Kingdom
V. I. Hahanov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Computer Science section editor
M. Kameyama, Doctor of Science, Japan
L. M. Karpukov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine
G. V. Kornich, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine, Radio Physics section editor
A. S. Kulik, Doctor of Science in Engineering, Ukraine
D. V. Lebedev, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor
V. G. Levashenko, Ph.D, Slovakia
A. Lisnianski, Ph.D, Israel
U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland
V. A. Oleshchuk, Ph.D in Physics and Mathematics, Norway, Radio Electronics section editor
V. M. Onufrienko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine
M. Paprzycki, Ph.D, Poland
V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine
O. I. Rubel, Ph.D, Canada
A. A. Sharpanskykh, Ph.D, Netherlands, Computer Science section editor
S. N. Vassilyev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Academican of Russian Academy of Sciences, Russia
E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 10 dated 09.06.2017.

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

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

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

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhya National Technical University, 2017

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....7

Поповский В. В., Коляденко А. В.
МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ.....7

Ципоренко В. В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТЕННИХ РЕШІТОК РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ДЛЯ КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ.....16

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....25

Бердник М. Г.
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РІШЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ УЗАГАЛЬНЕНОЇ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛООБМІНУ ПОРОЖНЬОГО КУСКОВО-ОДНОРІДНОГО ЦИЛІНДРА, ЯКИЙ ОБЕРТАЄТЬСЯ.....25

Жарикова М. В.
МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА.....33

Маляр М. М., Поліщук В. В., Шаркаді М. М.
МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ФІНАНСУВАННЯ ПРОЕКТІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ.....44

Погосов А. Ю., Деревянко О. В.
МОДЕЛИ ПРИКЛАДНОЙ ИНФОРМАТИКИ УЧЕТА КИНЕТИКИ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ УГРОЗ В СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АЭС.....53

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....61

Москаленко В. В., Коробов А. Г.
ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА МІСЦЕВОСТІ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРАКТОРА ОЗНАК.....61

Субботин С. А.
МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ВЫБОРОК ДАННЫХ И МОДЕЛЕЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ.....70

Oliinyk A.O., Skrupsky S. Yu., Shkarupylo V. V., Blagodariov O. Yu.
PARALLEL MULTIAGENT METHOD OF BIG DATA REDUCTION FOR PATTERN RECOGNITION.....82

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....93

Боровик О. В., Рачок Р. В., Дармороз М. М.
ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ.....93

Kolpakova T., Oliinyk A., Lovkin V.
INTEGRATED METHOD OF EXTRACTION, FORMALIZATION AND AGGREGATION OF COMPETITIVE AGENTS EXPERT EVALUATIONS IN A GROUP.....100

Lakhno V. A.
DEVELOPMENT OF A SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING THE CYBER SECURITY 109

Молодецька-Гринчук К. В.
МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ІНФОРМАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ У СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСАХ ЗА ЗМІСТОВНИМИ ОЗНАКАМИ.....117

Сердюк М. Є., Беркут В. Г.
КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ВИДАЛЕННЯ ТІНЕЙ У ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ.....127

Трифонова К. О.
МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ШУМОМ ПЕРЛІНА.....134

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....142

Гусев В. Б.
АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ И РЕФЛЕКСИВНЫХ ПРОЦЕДУР ВЫВОДА.....142

Дивак М. П., Порплиця Н. П., Маслияк Ю. Б., Пукас А. В., Мельник А. М.
МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ З ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИМ КЕРУВАННЯМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ.....150

Лобов В. Й., Лобова К. В.
МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ВІЗКІВ КОНВЕЄРНИХ МАШИН.....160

Хобін В. А., Левінский М. В.
ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ І РЕЗУЛЬТАТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ.....172

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....7

Popovski V. V., Kolyadenko A. V.
METHOD FOR DETECTION OF SIGNALS PRIMARY USERS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS.....7

Tsyporenko V. V.
RESEARCH OF EFFICIENCY OF ANTENNA ARRAYS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS FOR CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC OF DIRECTION FINDING.....16

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....25

Berdnyk M. G.
MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF SOLVING SPATIAL GENERALIZED BOUNDARY VALUE PROBLEM HEAT ROTATING HOLLOW PIECEWISE HOMOGENEOUS CYLINDER.....25

Zharikova M.
THE MODEL OF TERITORIAL SYSTEM IN NATURAL DISASTER CONDITIONS.....33

Malyar N. N., Polishchuk V. V., Sharkadi M. N.
MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY PROJECT FINANCING RISK ASSESSMENT.....44

Pogosov A. Yu., Derevianko O. V.
APPLIED INFORMATICS MODEL OF KINETICS ACCOUNTING OF CYBERNETIC THREATS IN NPP PHYSICAL PROTECTION SYSTEM.....53

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....61

Moskalenko V. V., Korobov A. G.
INFORMATION-EXTREME ALGORITHM OF THE SYSTEM FOR RECOGNITION OF OBJECTS ON THE TERRAIN WITH OPTIMIZATION PARAMETER FEATURE EXTRACTOR.....61

Subbotin S. A.
THE FRACTAL DIMENSION BASED QUALITY METRICS OF DATA SAMPLES AND DEPENDENCE MODELS.....70

Oliinyk A. O., Skrupsky S. Yu., Shkarupylo V. V., Blagodariov O. Yu.
PARALLEL MULTIAGENT METHOD OF BIG DATA REDUCTION FOR PATTERN RECOGNITION.....82

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....93

Borovik O. V., Rachok R. V., Darmoroz M. M.
EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE OPTICAL-ELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM.....93

Kolpakova T., Oliinyk A., Lovkin V.
INTEGRATED METHOD OF EXTRACTION, FORMALIZATION AND AGGREGATION OF COMPETITIVE AGENTS EXPERT EVALUATIONS IN A GROUP.....100

Lakhno V. A.
DEVELOPMENT OF A SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING THE CYBER SECURITY.....109

Molodetska-Hrynchuk K.
OUTREACHES CONTENT TRACING TECHNIQUE FOR SOCIAL NETWORKING SERVICES.....117

Serdiuk M. E., Berkut V. G.
THE COMPUTER SYSTEM OF SHADOW LOCATING AND REMOVAL IN DIGITAL IMAGES.....127

Tryfonova K. O.
METHOD OF DETECTION INTEGRITY VIOLATIONS OF DIGITAL IMAGE BY PERLIN NOISE.....134

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....142

Gusev Vladislav Borisovich
DECISION ANALYSIS ON THE BASIS OF EXPERT DATA AND REFLEXIVE PROCEDURES OF THE CONCLUSION..142

Dyvak M. P., Porplytsya N. P., Maslyiak Y. B., Pukas A. V., Melnyk A. M.
METHOD OF IDENTIFICATION OF MODELS OF OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS WITH A SPATIALLY DISTRIBUTED CONTROL BASED ON INTERVAL DATA ANALYSIS.....150

Lobov V. Y., Lobova K. V.
MODELING SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED REGULATION OF CONVEYOR MACHINES ROASTING TRUCKS....160

Khobin V. A., Levinskyi M. V.
PRINCIPLES, ALGORITHMS AND RESULTS OF EFFECTIVENESS INCREASE OF THE SELF-TUNING AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH THE CONTROL OBJECT OF TECHNOLOGICAL TYPE.....172

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЕЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 654.16:621.391.82

Поповский В. В.[1], Коляденко А. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой инфокоммуникационной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина
[2]Аспирант кафедры инфокоммуникационной инженерии, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ СИГНАЛОВ ПЕРВИЧНЫХ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ В КОГНИТИВНЫХ РАДИОСЕТЯХ

Актуальность. С появлением сетей мобильной связи сигнально-помеховая обстановка стала резко усложняться. Все возрастающее количество радиоэлектронных средств различного назначения приводят к образованию множественного характера электромагнитных взаимодействий между ними. Одновременно с этим еще важнее становится дефицит частотного ресурса, обостряется проблема электромагнитной совместимости. Найти пути решения данной проблемы можно, используя когнитивное распределение частотного ресурса с повторным использованием частот. Таким образом, оптимизация распределения частотного ресурса в когнитивных радиосетях и разработка алгоритма распределения частотного ресурса с повторным использованием частот является актуальной научной задачей.

Цель. Целью исследования является обеспечение электромагнитной совместимости при когнитивном распределении ресурсов в сети мобильной связи.

Методы исследований базируются на основных положениях радиофизики, теории электросвязи, системного анализа, математической статистики, теории вероятностей, теории оптимизации, математического и имитационного моделирования.

Результаты. Ситуацию и самую электромагнитную обстановку в сетях мобильной связи сильно осложняет тот факт, что в эту обстановку вносятся различные часто случайные факторы, носящие трудно прогнозируемый характер. В этих условиях рассчитать заранее электромагнитную обстановку и решить задачу электромагнитной совместимости с достаточной точностью не всегда удается, а часто просто невозможно из-за априорной неопределенности. Задачу электромагнитной совместимости для сетей мобильной связи необходимо решать на стадии ее функционирования в реальном масштабе времени. Предложен алгоритм решения задачи оптимизации распределения частотного ресурса для сетей мобильной связи. В основе алгоритма лежит метод локальной оптимизации – один из приближенных методов дискретного программирования. В данном случае условием локальной оптимальности является то, что рабочая частота, которая присваивается очередной абонентской станции должна быть близкой к присвоенной на предыдущем шаге частоте, но при этом должны быть выполнены требования электромагнитной совместимости.

Выводы. Впервые разработан метод обеспечения электромагнитной совместимости при распределении частотного ресурса в сети мобильной связи, который состоит из алгоритма с повторным использованием частот. Использование данного метода позволяет сократить полосу частот в 2–3 раза.

Ключевые слова: Когнитивная сеть, первичный пользователь, вторичный пользователь, процедура обнаружения сигнала, критерий Вальда.

НОМЕНКЛАТУРА

КР – когнитивное радио;

ЛТ – ложная тревога;

ОП – отношение правдоподобия;

ОСШ – отношение сигнал/шум;

ПЦ – пропуск цели;

h – пороговый уровень, определяемый заданной вероятностью ложной тревоги;

H_0 – гипотеза: первичный пользователь отсутствует;

H_1 – гипотеза: первичный пользователь работает со спектром;

k – шаг измерения;

m – математическое ожидание шума;

m_s – математическое ожидание аддитивной смеси сигнала и шума;

$p(0)$ – априорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$;

© Поповский В. В., Коляденко А. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-1

$p(s)$ – априорная вероятность передачи сигнала $s(t)$;

$p(x)$ – априорная плотность вероятности сигнала $x(t)$;

$p(x\,|\,0)$ – априорная условная плотность вероятности входного сигнала при отсутствии сигнала от первичного пользователя;

$p(x\,|\,s)$ – априорная условная плотность вероятности входного сигнала при наличии сигнала от первичного пользователя;

$p(0|x)$ – апостериорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$;

$p(s|x)$ – апостериорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$;

$p_{\text{ош}}$ – вероятность ошибки;

$s(t)$ – сигнал первичного пользователя;

$x(t)$ – сигнал, принимаемый пользователем КР;

Z_* – нижний порог;

Z^* – верхний порог;

z_i – текущее значение решающей статистики на i-м шаге;

Z_i – накопленные значения ОП на i-м шаге;

α – вероятность ложной тревоги;

β – вероятность пропуска цели;

$\nu(t)$ – аддитивный белый гауссов шум;

σ^2 – дисперсия шума.

ВВЕДЕНИЕ

Уровень востребованности и дефицитность радиочастотного ресурса определяют актуальность проработки различных подходов и технологических решений, направленных на повышение эффективности его использования [1, 2]. В этой связи заслуживают внимания работы, связанные с развитием технологий когнитивного радио (КР), основанные на использовании временно свободных участков спектра.

Главная задача когнитивного радио состоит в том, что вторичный пользователь должен обнаружить первичного пользователя и быстро освободить полосу частот [2–4]. Спектр классифицирован на три типа: черные пространства, серые пространства и пробелы. Черные пространства заняты сигналами от первичных пользователей высокой мощности и вторичные пользователи должны избегать этих полос частот. Серые пространства частично занимают помехи с невысокой мощностью, но они могут использоваться вторично. Свободные пробелы содержат помехи, которые состоят из естественных и искусственных форм шума: теплового шума, перекрестных помех и импульсного шума. Пробелы могут использоваться вторичными пользователями [5].

Реализуемость КР на практике основывается на принципах самообучения, на получении информации об электромагнитной и географической обстановке на основе оперативного априорного и апостериорного анализа (мониторинга) загруженности радиочастотного спектра, определения свободных участков спектра с целью их использования когнитивными системами на вторичной основе [6].

Целью данной работы являлась разработка метода обнаружения сигналов первичных пользователей для использования свободных полос частот в когнитивных радиосетях на вторичной основе.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сканирование спектра используется для обнаружения присутствия или отсутствия сигналов первичных (лицензируемых) пользователей в радиосреде, что определяет возможность доступа к среде вторичных (не лицензируемых) пользователей [7].

Уравнение наблюдения за спектром представляет собой значение измеренного обнаруживаемого сигнала $s(t)$ на фоне шума $\nu(t)$:

$$x(t) = s(t) + \nu(t).$$

Сигнал $x(t)$ является сигналом, принимаемым пользователем КР, $s(t)$ – передаваемый сигнал от первичного пользователя, $\nu(t)$ – аддитивный белый гауссов шум.

Стратегия функционирования системы вторичного пользователя состоит в том, что при появлении сигнала $s(t)$ возникает необходимость осуществить управление на смену полосы частот. Данная задача обнаружения сигнала сводится к проверке статистических гипотез:

$H_0 : x(t) = \nu(t)$ – первичный пользователь отсутствует,

$H_1 : x(t) = s(t) + \nu(t)$ – первичный пользователь работает со спектром.

Условная плотность вероятности входного сигнала при отсутствии сигнала от первичного пользователя (гипотеза H_0) определяется выражением:

$$p(x\,|\,0) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где m – математическое ожидание шума, σ^2 – дисперсия.

Условная плотность вероятности входного сигнала при наличии сигнала от первичного пользователя (гипотеза H_1) определяется выражением:

$$p(x\,|\,s) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m_s)^2}{2\sigma^2}\right),$$

где m_s – математическое ожидание аддитивной смеси сигнала и шума.

Иными словами: по наблюдению за случайным сигналом $x(t)$ необходимо принять детерминированное решение на разрешение или запрещение использования полосы частот вторичным пользователем.

Из-за случайного характера сигнала $s(t)$ и шума $\nu(t)$ возможны ошибки. Такие ошибки бывают двух родов. Ошибка первого рода – это принятие гипотезы H_1, в то

время как следовало бы принять H_0 (ложная тревога – ЛТ). Ошибка второго рода – принятие гипотезы H_0, в то время как следовало бы принять H_1 (пропуск цели – ПЦ).

В теории оптимального обнаружения сигналов применяются следующие критерии: критерий идеального наблюдателя; критерий минимального среднего риска; критерий Неймана-Пирсона; критерий Вальда. Выбор критерия зависит от использования его в конкретной системе. Так в системах электросвязи чаще используется критерий идеального наблюдателя, в радиолокации – критерий Неймана-Пирсона. Кроме того, первые три критерия основываются на фиксированном объеме наблюдаемой выборки. Недостатком критерия Вальда является неопределенность с числом наблюдений.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Критерий идеального наблюдателя обеспечивается решающей схемой, построенной по правилу максимума апостериорной вероятности – решение, что сигнал $s(t)$ присутствует, принимается в том случае, если выполняется неравенство [1, 4, 7]:

$$p(s|x) > p(0|x), \tag{1}$$

где $p(s|x)$ – апостериорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$, $p(0|x)$ – апостериорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$ при условии принятия сигнала $x(t)$.

Апостериорная вероятность сигнала $s(t)$ определяется согласно формуле Байеса [8]:

$$p(s|x) = \frac{p(s)\,p(x|s)}{p(x)}, \tag{2}$$

где $p(x\,|\,s)$ – априорная условная плотность вероятности – функция правдоподобия гипотезы, что сигнал присутствует, $p(x)$ – априорная плотность вероятности сигнала $x(t)$, $p(s)$ – априорная вероятность передачи сигнала $s(t)$.

Можно записать правило решения по критерию идеального наблюдателя в следующей форме:

$$p(s)p(x\,|\,s) > p(0)p(x\,|\,0), \tag{3}$$

где $p(0)$ – априорная вероятность отсутствия сигнала $s(t)$, $p(x\,|\,0)$ – априорная условная плотность вероятности – функция правдоподобия гипотезы, что сигнал отсутствует.

Правило (3) можно записать иначе [9]. Решение о том, что сигнал $s(t)$ присутствует должно приниматься, если выполняется неравенство:

$$\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > \frac{p(0)}{p(s)}. \tag{4}$$

Отношение в левой части этого неравенства называется отношением правдоподобия (ОП) двух гипотез: о том, что передается сигнал $s(t)$, и о том, что он отсутствует.

В случае, когда вероятности наличия сигнала $s(t)$ и его отсутствия равны, т. е.

$$p(s) = p(0), \tag{5}$$

правило (4) упрощается:

$$\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > 1. \tag{6}$$

Различные ошибки приводят к различным последствиям. Для системы КР опаснее не обнаружить сигнал, нежели объявить «ложную тревогу», когда в действительности первичный пользователь пассивен. Учет последствий ошибок различного рода приводит к обобщению критерия идеального наблюдателя, известного под названием критерия минимального среднего риска. В общем же случае в байесовском приемнике чаще будут возникать ошибки, связанные с малыми потерями, и реже – с большими потерями.

Ситуация, в которой практически невозможно определить априорную вероятность наличия или отсутствия сигнала первичного пользователя, а последствия ошибок разного рода неодинаковы, типична для КР [5, 6]. Как правило, априорная вероятность наличия сигнала $s(t)$ заранее не известна. Последствия двух родов ошибок – ложной тревоги и пропуска цели – неравноценны [7]. В этой ситуации чаще всего пользуются критерием Неймана-Пирсона. Суть его заключается в том, что решающая схема считается оптимальной, если при заданной вероятности ложной тревоги $\alpha = P(H_1\,|\,H_0)$ обеспечивается минимальная вероятность пропуска цели $\beta = P(H_0\,|\,H_1)$ [7], что достигается при выполнении неравенства:

$$\frac{p(x\,|\,s)}{p(x\,|\,0)} > h,$$

где h – пороговый уровень, определяемый заданной вероятностью ложной тревоги.

Приведенные выше подходы основаны на предположении, что объем наблюдаемой выборки фиксирован. Однако, если стоимость или время, затрачиваемое на получение одной оценки значительны, то может оказаться выгодным оставить вопрос о числе измерений открытым и считать число измерений достаточным, лишь тогда, когда наблюдатель убедится в правильности одной из гипотез. Соответствующая процедура, позволяющая определить необходимое число наблюдений, была разработана Вальдом и называется последовательным наблюдателем [8, 9]. Поэтому в данной работе в качестве критерия выбран критерий Вальда.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При последовательном наблюдателе принимается одно из трех решений:

1) принять решение, что первичный пользователь пассивен;

2) принять решение, что первичный пользователь активен;

3) произвести следующее измерение.

На любой стадии испытания, принимаемые решения будут зависеть от результатов уже выполненных измерений. Методика проведения последовательного наблюдения состоит в следующем. На основании каких-либо соображений выбираются приемлемые значения ошибок 1-го α и второго рода β. По результатам первых k наблюдений формируется ОП $\frac{p(x|s)}{p(x|0)}$. Полученное значение сравнивается с двумя порогами Z_* и Z^*. Если $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} \geq Z^*$ принимается гипотеза, что первичный пользователь активен (гипотеза H_1), если $\frac{p(x\,|\,s)}{p(x|0)} \leq Z_*$ принимается гипотеза, что первичный пользователь пассивен (гипотеза H_0), если $Z_* < \frac{p(x|s)}{p(x|0)} < Z^*$, то производится следующее $k+1$-е измерение, определяется новое ОП и повторяется процедура сравнения с порогами. Процесс продолжается, пока не будет принята одна из гипотез [10].

Пороги Z_* и Z^* должны выбираться так, чтобы вероятность того, что $\frac{p(x|s)}{p(x|0)} > Z^*$, когда справедлива гипотеза H_0 была равна α, а вероятность того, что при гипотезе H_1 величина $\frac{p(x\,|\,s)}{p(x\,|\,0)} < Z_*$ была равна β. Классический последовательный подход решения данной задачи предполагает вычисление логарифма ОП $\ln\frac{p(x|s)}{p(x|0)}$ на каждом шаге, с последующим сравнением его с двумя порогами [8]:

$$Z_* = \ln\frac{\beta}{1-\alpha} \text{ и } Z^* = \ln\frac{1-\beta}{\alpha}.$$

Основное преимущество двухпорогового последовательного решения по сравнению с однопороговым заключается в том, что среднее число измерений (время наблюдения) существенно уменьшается [8, 9].

Недостатком последовательного наблюдателя является неопределенность с числом наблюдений. В случаях, когда среднее число наблюдений становится недопустимо большим необходимо искусственно прерывать процедуру испытаний и принимать результирующее решение, осуществляя выбор между двумя альтернативами. Данную процедуру называют усечением [8].

В работе [11] рассмотрен способ решения задачи радиолокационного обнаружения случайного одиночного сигнала известной формы на основе модифицированного последовательного алгоритма Вальда, позволяющего получить автоматически усекаемую процедуру обнаружения. Для КР форма сигнала первичного пользователя априори неизвестна. Проанализировав данный алгоритм, авторы статьи пришли к выводу, что для обнаружения параметры сигнала как таковые не требуются (не требуется знания о виде модуляции). Для принятия решения в когнитивной радиосети предложен данный модифицированый последовательный подход к обнаружению. С этой целью рассчитываются пороги обнаружения на каждом шаге процедуры, исходя из обеспечения постоянства ошибок обнаружения: $\alpha = \text{const}$, $\beta = \text{const}$. При использовании модифицированного последовательного критерия рассматриваемая задача обнаружения предполагает следующие действия.

Шаг 1. На вход приемника поступает случайный отсчет принятого сигнала $x(t_1)$, с использованием которого формируется значение логарифма ОП [9, 11]:

$$Z_1 = z_1 = \frac{1}{\sigma^2}\left(x(t_1)(m_s - m) - \frac{1}{2}\left(m_s^2 - m^2\right)\right),$$

где z_1 – значение решающей статистики для выборки на 1-м шаге; Z_1 – накопленное значение статистики на 1-м шаге.

Исходя из заданных значений вероятностей ошибок α и β, рассчитываются пороги обнаружения: Z_1^* и Z_*^1. При этом если выполняется условие $Z_1 \geq Z_1^*$, то принимается гипотеза H_1. Если выполняется условие $Z_1 \leq Z_*^1$, то принимается гипотеза H_0. Если $Z_*^1 < Z_1 < Z_1^*$, то наблюдение продолжается и осуществляется переход к шагу 2. В работе [11] предлагается вместо сравнения решающей статистики Z_1 с порогами осуществлять сравнение величины $x(t_1)$ с модифицированными порогами обнаружения. Такой подход требует дополнительных вычислений (взятие логарифма от порогов Z_1^* и Z_*^1), что в свою очередь увеличит время на обнаружение сигнала и принятие решения.

Шаг 2. На вход приемника поступает выборка $x(t_1)\,x(t_2)$. Формируемое значение логарифма ОП принимает вид:

$$Z_2 = z_1 + z_2 = \frac{(m_s - m)}{\sigma^2}\left(x(t_1) + x(t_2) - (m_s + m)\right).$$

Значения порогов обнаружения Z_*^2 и Z_2^* на 2-м шаге процедуры, определяются исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β. При этом если выполняется условие $Z_2 \geq Z_2^*$, то принимается гипотеза H_1. Если выполняется условие $Z_2 \leq Z_*^2$, то принимается гипотеза H_0. Если $Z_*^2 < Z_2 < Z_2^*$, то наблюдение продолжается и осуществляется переход к следующим итерациям процедуры.

Шаг k. На вход приемника поступает выборка $x(t_1 t_2 ... t_k) = x(t_1) + x(t_2) + ... + x(t_k)$. Формируемое значение логарифма ОП принимает вид:

$$Z_k = Z_{k-1} + z_k = \frac{(m_s - m)}{\sigma^2}\left(\sum_{i=1}^{k} x(t_i) - \frac{k}{2}(m_s + m)\right).$$

Исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β, определяются значения порогов обнаружения Z_*^k и Z_k^* на k-м шаге процедуры.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Реализация модифицированного двухпорогового последовательного наблюдателя в рамках обнаружения сигналов в когнитивной сети представлена в виде обобщенной схемы (рис. 1).

Рассматривая задачу обнаружения случайных гауссовских отсчетов, наблюдаемых на фоне некоррелированного шума, будем полагать, что на вход приемника последовательно поступают случайные отсчеты принятого сигнала $x(t_1), x(t_2), x(t_3),...$. В общем случае их количество определяется ходом процедуры обнаружения сигнала и является случайным.

После 1-го шага обработки процедуры обнаружения на выходе устройства оптимальной обработки формируется случайная величина $z_1 = \ln\frac{p(x(t_1)|s)}{p(x(t_1)|0)}$ – текущее значение решающей статистики пропорциональное логарифму ОП. На выходе запоминающего устройства формируется накопленное значение статистики $Z_1 = z_1$. Далее рассчитываются модифицированные порогами на 1-м шаге наблюдения Z_1^* и Z_*^1.

Пороговое устройство принимает решение: принять окончательное решение с остановкой процесса наблюдения или произвести следующее наблюдение. В случае продолжения наблюдений с модифицированными порогами сравниваются накопленные значения ОП, рассчитываемые на последующих шагах наблюдения Z_2, Z_3, Z_k. При этом пороги определяются на каждом шаге Z_2^* и $Z_*^2 \dots Z_k^*$ и Z_*^k. Проверка продолжается до пересечения решающей статистикой одного из останавливающих порогов обнаружения. В этом случае импульсом «сброс» обнуляется запоминающее устройство.

Для анализа эффективности предложенного метода были программно реализованы в среде Matlab классический метод Вальда и автоматическая процедура обнаружения с усечением.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ эффективности классической процедуры Вальда. На рис. 2 показана пошаговая работа классической процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-3}$. При этом решающие границы представляют собой две параллельные прямые, расстояние между которыми всегда постоянно. В данном случае сигнал обнаружен при условии наличия сигнала.

Расстояние между этими границами (ширина области неопределенности) определяется заданным уровнем ошибок. С повышением точности (уменьшением α и β) область неопределенности увеличивается, а, следовательно, и среднее число наблюдений также увеличивается. Например, при $\alpha = \beta = 10^{-4}$ имеем $Z^* = 9{,}21$, $Z_* = -9{,}21$, а при $\alpha = \beta = 10^{-5}$ получаем $Z^* = 11{,}513$, $Z_* = -11{,}513$. Поскольку величины ошибок α и β, которые при обнаружении сигнала выбираются весьма малыми, очевидно, что отдельные испытания могут длиться достаточно долго, а значит, и среднее число наблюдений становится недопустимо большим [5] (рис. 3).

На рис. 3 показана пошаговая работа процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-5}$. В данном случае сигнал обнаружен при условии наличия сигнала (правильное обнаружение). На рис. 4 показана пошаговая работа

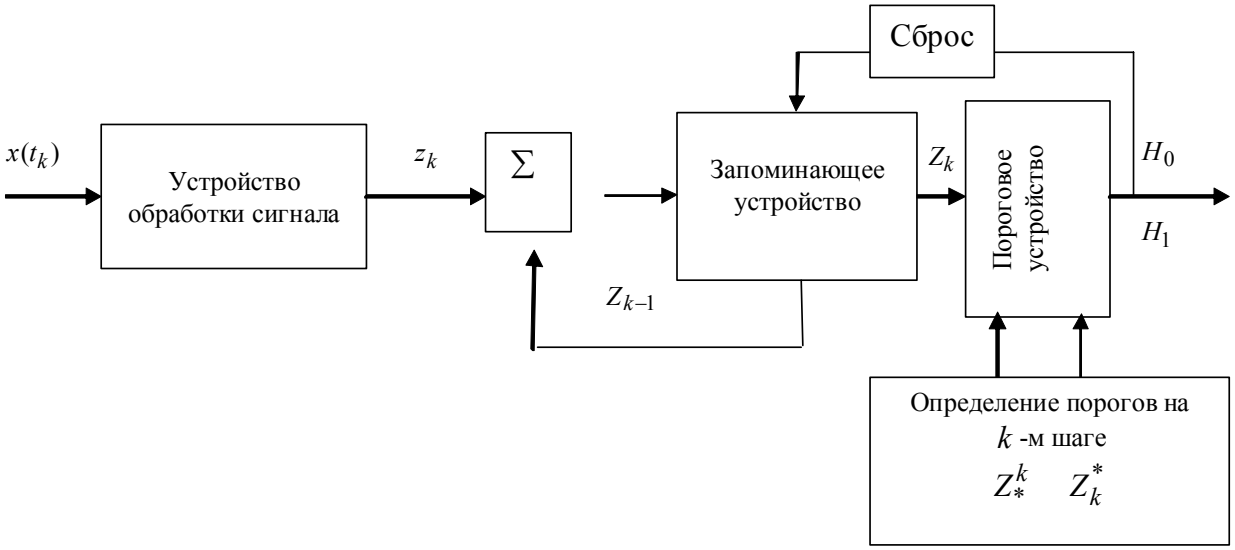


Рисунок 1 – Схема модифицированного двухпорогового последовательного наблюдателя

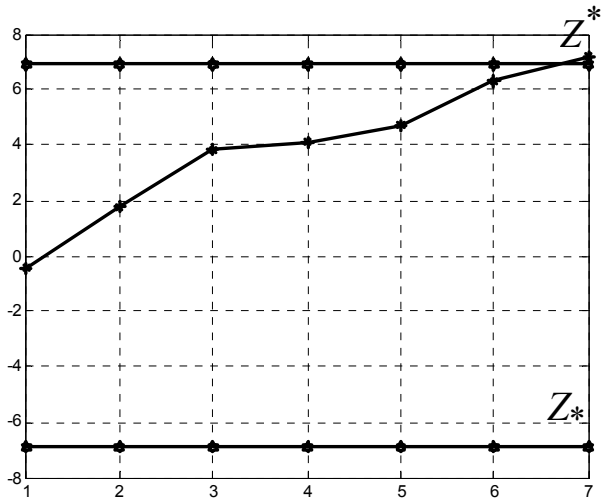


Рисунок 2 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-3}$

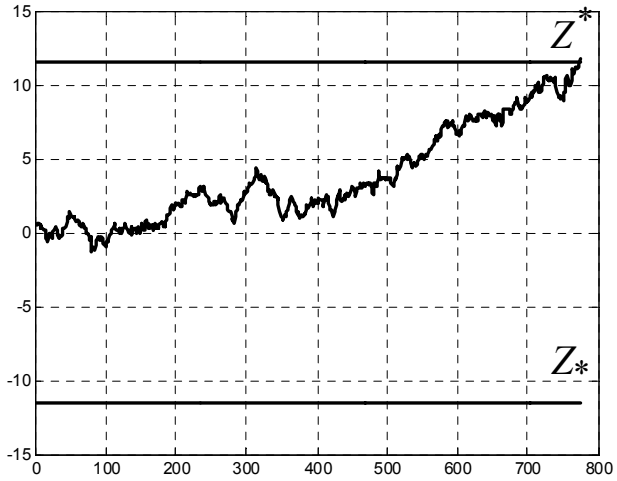


Рисунок 3 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-5}$

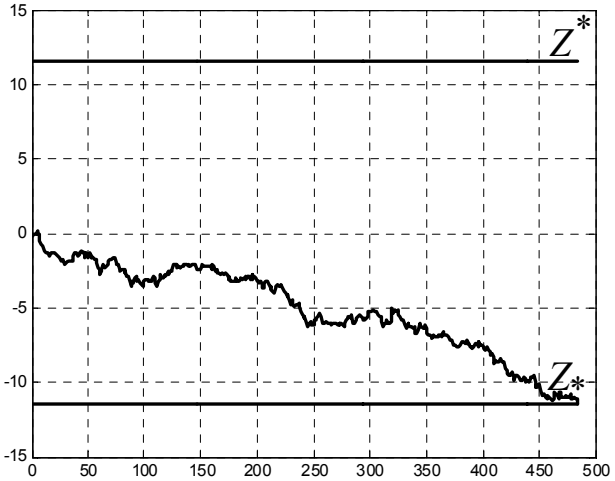


Рисунок 4 – Пошаговая работа процедуры принятия решения на основе критерия Вальда при $\alpha = \beta = 10^{-5}$

процедуры принятия решения при $\alpha = \beta = 10^{-5}$. В данном случае сигнал не обнаружен при условии наличия сигнала (пропуск цели).

С помощью имитационного моделирования получены вероятности пропуска цели от отношения сигнал/шум (ОСШ) (рис. 5). На рис. 5 представлен график зависимости вероятности ошибки $P_{ош}$ от отношения сигнал/шум при $\alpha = \beta = 10^{-3}$. Из данного графика видно, что заданная вероятность пропуска цели достигается при ОСШ больше – 7,5 дБ.

Проведен анализ эффективности автоматической процедуры обнаружения с усечением. Получены пороги обнаружения на 1-м, 2-м и *k*-м шаге процедуры. На 1-м шаге рассчитываются пороги обнаружения: Z_1^* и Z_*^1 (рис. 6), исходя из заданных значений вероятностей ошибок α и β.

На 2-м шаге результатом суммирования нормальных независимых случайных величин $x(t_1)$ и $x(t_2)$ является

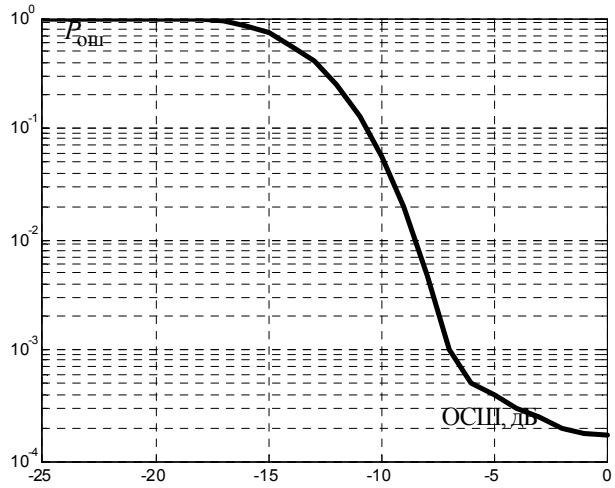


Рисунок 5 – Зависимость вероятности пропуска цели $P_{ПЦ}$ от отношения сигнал/шум

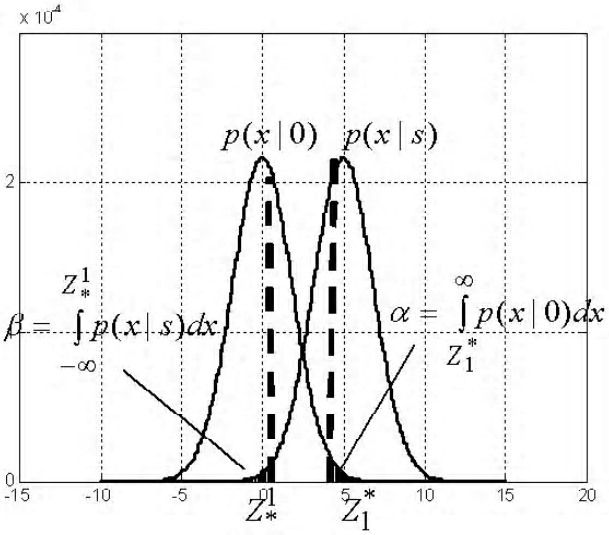


Рисунок 6 – Распределения плотностей вероятностей статистики на первом шаге процедуры наблюдения

случайная величина $x(t_1 t_2) = x(t_1) + x(t_2)$, распределенная по гауссовскому закону с математическим ожиданием $2m_s$ или $2m$ и дисперсией $2\sigma^2$. Произошло изменение формы закона распределения наблюдаемых отсчетов (рис. 7). Значения порогов обнаружения Z_*^2 и Z_2^* на 2-м шаге процедуры определяются, исходя из условия обеспечения фиксированных значений α и β (рис. 7).

На k-м шаге случайная величина $x(t_1 t_2 ... t_k)$ будет распределена по гауссовскому закону с математическим ожиданием km_1 или km_0 и дисперсией $k\sigma^2$.

Очевидно, что трансформация закона распределения наблюдаемой статистики в совокупности с фиксированными значениями вероятностей α и β, приводит к равенству (пересечению) верхнего и нижнего порогов обнаружения (рис. 8), что обеспечивает неизбежное принятие гипотезы H_0 или альтернативы H_1.

На рис. 9 показана пошаговая работа процедуры обнаружения с усечением. Как видно из рис. 9, уже на 4-м шаге сигнал обнаружен.

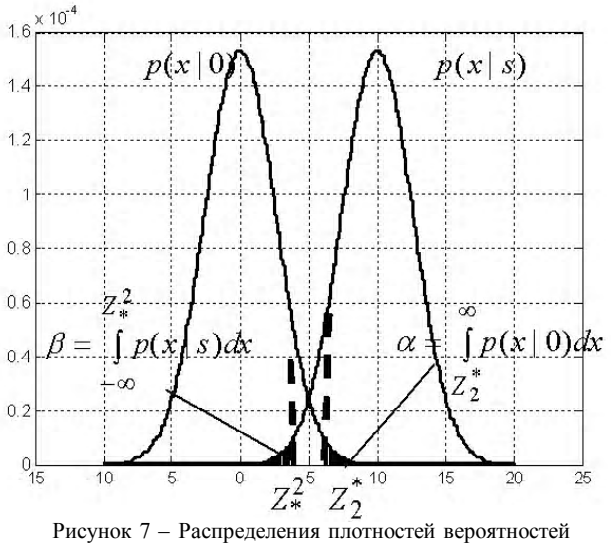


Рисунок 7 – Распределения плотностей вероятностей статистики на втором шаге процедуры наблюдения

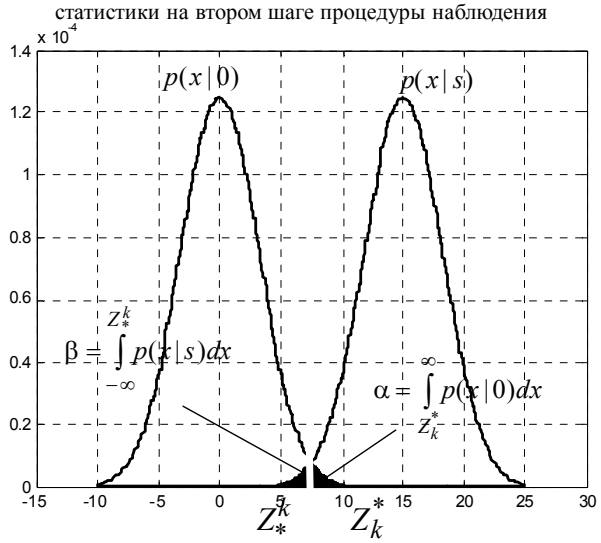


Рисунок 8 – Распределения плотностей вероятностей статистики на k-м шаге процедуры наблюдения

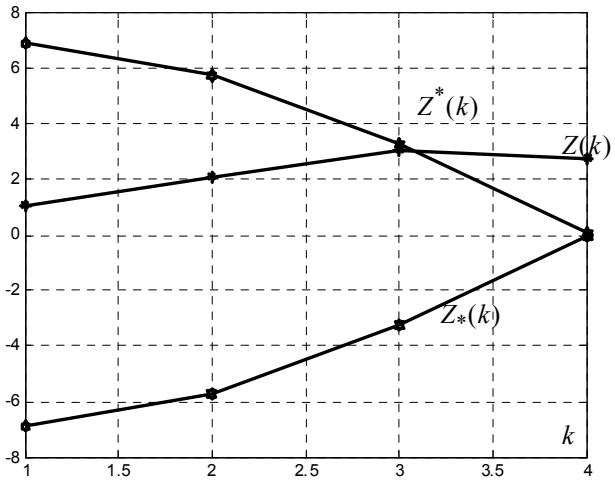


Рисунок 9 – Пошаговая работа процедуры обнаружения с усечением

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Проведен анализ эффективности классической процедуры Вальда для обнаружения сигнала первичного пользователя в когнитивной радиосети. Проанализирована пошаговая работа процедуры (рис. 2–рис. 4). Анализ показал, с повышением точности среднее число наблюдений увеличивается, что нежелательно для ее использования в когнитивной радиосети. Получена зависимость вероятности ошибки $P_{ош}$ от отношения сигнал/шум (рис. 5). Показано, что заданная вероятность пропуска цели достигается при ОСШ больше –7,5 дБ, что может служить хорошим показателем.

Проведен анализ эффективности автоматической процедуры обнаружения с усечением. Получены пороги обнаружения на 1-м, 2-м и k-м шаге процедуры (рис. 6 – рис. 8). Показано, что в отличие от классической последовательной процедуры Вальда, где пороги обнаружения не изменяются, расстояние между модифицированными порогами уменьшается с каждым шагом наблюдения. Следовательно, предложенный подход позволил получить автоматическую процедуру обнаружения с усечением, что является определенным достоинством рассматриваемого решающего правила.

ВЫВОДЫ

В работе предложен алгоритм решения задачи обнаружения на основе модифицированной последовательной процедуры обнаружения.

Научная новизна результатов, полученных в статье, состоит в том, что впервые для обнаружения сигналов первичных пользователей в когнитивной радиосети предложена процедура обнаружения с усечением.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что обеспечение постоянства значения ошибок обнаружения α и β на каждом шаге процедуры обнаружения позволило получить решающие границы в виде пересекающихся линий, что исключает затягивание процедуры обзора. Отмеченный факт является достоинством алгоритма, что обуславливает целесообразность его использования в когнитивных сетях для обнаружения первичных пользователей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Харьковского национального университета радиоэлектроники «Підвищення масштабованості технологічних рішень по забезпеченню якості обслуговування в конвергентних мережах» (номер гос. регистрации 0115U002432).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Багатоканальний електрозв'язок та телекомунікаційні технології: підручник з грифом МОН України / [В. В. Поповський, В. А. Лошаков, С. О. Сабурова та ін.] ; під редакцією В. В Поповського. – Харків : СМІТ, 2010. – 469 с.
2. Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks / [I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, M. A. Shantidev] // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 46. – P. 40–48. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4473090
3. Ghasemi A. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, hallenges, and design trade-off / A. Ghasemi, S. E. Sousa // IEEE Communications Magazine. – 2008. – Vol. 46. – P. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM.2008.4473090
4. Охрименко А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. / А. Е. Охрименко. – М. : Воениздат. – Ч. 1. Основы радиолокации, 1983. – 456 с.
5. Гурьянов И. О. Когнитивное радио: новые подходы к обеспечению радиочастотным ресурсом перспективных радиотехнологий / И. О. Гурьянов // Электросвязь. – 2012. – № 8. – С. 5–8.
6. Кизима С. В. Когнитивные радиотехнологии. Аспекты практической реализации / С. В. Кизима, С. Г. Митченков, Б. Б. Емельянников // Электросвязь. – 2014. – № 9. – С. 44–48.
7. Ролич М. Л. Методы обнаружения первичных пользователей в когнитивных радиосетях / М. Л. Ролич // Молодой ученый. – 2015. – № 20. – С. 70–73.
8. Вальд А. Последовательный анализ / А. Вальд. – М. : Физматгиз, 1960. – 328 с.
9. Фу К. Последовательные методы в распознавании образов и обучении машин / К. Фу. – М. : Наука, 1971. – 256 с.
10. Теория электрической связи: учебник для вузов / [А. Г. Зюко, Д. Д. Кловский, В. И. Коржик, М. В. Назаров] ; под ред. Д. Д. Кловского. – М. : Радио и связь, 1999. – 432 с.
11. Обнаружение одиночного сигнала известной формы на основе модифицированного последовательного алгоритма Вальда / [С. Н. Ярмолик, А. А. Дятко, П. Н. Шумский, А. С. Храменков] // Труды БГТУ. – 2013. – № 6. – С. 119–122.

Статья поступила в редакцию 26.12.2016.
После доработки 10.01.2017.

Поповський В. В.[1], Коляденко А. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

[2]Аспірант кафедри інфокомунікаційної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ СИГНАЛІВ ПЕРВИННИХ КОРИСТУВАЧІВ В КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ

Актуальність. З появою мереж мобільного зв'язку сигнально-завадова обстановка стала різко ускладнюватися. Все зростаюча кількість радіоелектронних засобів різного призначення призводять до утворення множинного характеру електромагнітних взаємодій між ними. Одночасно з цим ще важливішим стає дефіцит частотного ресурсу, загострюється проблема електромагнітної сумісності. Знайти шляхи вирішення даної проблеми можна, використовуючи когнітивний розподіл частотного ресурсу з повторним використанням частот. Таким чином, оптимізація розподілу частотного ресурсу в когнітивних радіомережах і розробка алгоритму розподілу частотного ресурсу з повторним використанням частот є актуальною науковою задачею.

Мета. Метою дослідження є забезпечення електромагнітної сумісності при когнітивному розподілі ресурсів в мережі мобільного зв'язку.

Методи досліджень базуються на основних положеннях радіофізики, теорії електрозв'язку, системного аналізу, математичної статистики, теорії ймовірностей, теорії оптимізації, математичного та імітаційного моделювання.

Результати. Ситуацію і саму електромагнітну обстановку в мережах мобільного зв'язку сильно ускладнює той факт, що в цю обстановку вносяться різні часто випадкові чинники, що носять важко прогнозований характер. У цих умовах розрахувати заздалегідь електромагнітну обстановку і вирішити задачу електромагнітної сумісності з достатньою точністю не завжди вдається, а часто просто неможливо через апріорну невизначеність. Задачу електромагнітної сумісності для мереж мобільного зв'язку необхідно вирішувати на стадії її функціонування в реальному масштабі часу. Запропоновано алгоритм розв'язання задачі оптимізації розподілу частотного ресурсу для мереж мобільного зв'язку. В основі алгоритму лежить метод локальної оптимізації – один з наближених методів дискретного програмування. В даному випадку умовою локальної оптимальності є те, що робоча частота, яка присвоюється черговій абонентській станції повинна бути близькою до присвоєної на попередньому кроці частоті, але при цьому повинні бути виконані вимоги електромагнітної сумісності.

Висновки. Вперше розроблено метод забезпечення електромагнітної сумісності при розподілі частотного ресурсу в мережі мобільного зв'язку, який складається з алгоритму з повторним використанням частот. Використання даного методу дозволяє скоротити смугу частот в 2–3 рази.

Ключові слова: Когнітивна мережа, первинний користувач, вторинний користувач, процедура виявлення сигналу, критерій Вальда.

Popovski V. V.[1], Kolyadenko A. V.[2]

[1]Dr. Sc., Professor, Head of Department of info-communication engineering, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

[2]Post-graduate student of the Department of info-communication engineering, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, Ukraine

METHOD FOR DETECTION OF SIGNALS PRIMARY USERS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS

Context. With the advent of mobile communication networks, the signal-interference situation became sharply complicated. An increasing number of radio electronic devices for various purposes lead to the formation of the multiple nature of electromagnetic interactions between them. At the same time, the deficit of frequency resources becomes even more important, the problem of electromagnetic compatibility becomes aggravated. The ways of solving this problem can be found using the cognitive distribution of the frequency resource with repeated use of frequencies. Thus, the optimization of the distribution of the frequency resource in cognitive radio networks and the development of an algorithm for the allocation of a frequency resource with the repeated use of frequencies is an actual scientific task.

Objective. The aim of the study is to provide electromagnetic compatibility in the cognitive distribution of resources in a mobile communication network.

Methods of research are based on the basic principles of radiophysics, telecommunications theory, system analysis, mathematical statistics, probability theory, optimization theory, mathematical and simulation modeling.

Results. The situation and the most electromagnetic situation in mobile communication networks are greatly complicated by the fact that various random factors, which are difficult to forecast, are introduced into this environment. Under these conditions, it is not always possible to calculate the electromagnetic situation in advance and solve the problem of electromagnetic compatibility with sufficient accuracy, and often it is simply impossible due to a priori uncertainty. The problem of electromagnetic compatibility for mobile communication networks must be solved at the stage of its operation in real time. An algorithm for solving the problem of optimization of frequency resource allocation for mobile communication networks is proposed. The algorithm is based on the method of local optimization – one of the approximate methods of discrete programming. In this case, the local optimality condition is that the operating frequency that is assigned to the next subscriber station should be close to the frequency assigned at the previous step, but electromagnetic compatibility requirements must be met.

Conclusions. For the first time, a method has been developed for ensuring electromagnetic compatibility in the allocation of a frequency resource in a mobile communication network, which consists of an algorithm with repeated use of frequencies. The use of this method makes it possible to reduce the frequency band by 2 to 3 times.

Keywords: Cognitive Network, the primary user, the secondary user, the signal detection procedure, the Wald test.

REFERENCES

1. Popovs'kiy V. V., Loshakov V. A., Saburova S. O. et al píd redaktsíêyu V. V Popovs'kogo Bagatokanal'niy yelektrozv'yazok ta telekomunikatsíyní tekhnologíí: pídruchnik z grifom MON Ukraíni. Kharkív, SMÍT, 2010, 469 p.
2. Akyildiz I. F., Lee W. Y., Vuran M. C., Shantidev M. A. Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks, *IEEE Communications Magazine*, 2008, Vol. 46, pp. 40–48. DOI: 10.1109/MCOM. .2008.4473090
3. Ghasemi A., Sousa S. E. Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, hallenges, and design trade-off, *IEEE Communications Magazine*, 2008, Vol. 46, pp. 32–39. DOI: 10.1109/MCOM. .2008.4473090
4. Okhrimenko A. Ye. Osnovy radiolokatsii i radioelektronnaya bor'ba. Moscow, Voyenizdat. CH. 1. Osnovy radiolokatsii, 1983, 456 p.
5. Gur'yanov I. O. Kognitivnoye radio: novyye podkhody k obespecheniyu radiochastotnym resursom perspektivnykh radiotekhnologiy, *Elektrosvyaz'*, 2012, No. 8, pp. 5–8.
6. Kizima S. V., Mitchenkov S. G., Yemel'yannikov B. B. Kognitivnyye radiotekhnologii. Aspekty prakticheskoy realizatsii, *Elektrosvyaz'*, 2014, No. 9, pp. 44–48.
7. Rolich M. L. Metody obnaruzheniya pervichnykh pol'zovateley v kognitivnykh radiosetyakh, Molodoy uchenyy, 2015, No. 20, pp. 70–73.
8. Val'd A. Posledovatel'nyy analiz. Moscow, Fizmatgiz, 1960, 328 p.
9. Fu K. Posledovatel'nyye metody v raspoznavanii obrazov i obuchenii mashin. Moscow, Nauka, 1971, 256 p.
10. Zyuko A. G. Klovskiy D. D., Korzhik V. I., Nazarov M. V. ; pod red. D. D. Klovskogo Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnik dlya vuzov. Moscow, Radio i svyaz', 1999, 432 p.
11. Yarmolik S. N., Dyatko A. A., Shumskiy P. N., Khramenkov A. S. Obnaruzheniye odinochnogo signala izvestnoy formy na osnove modifitsirovannogo posledovatel'nogo algoritma Val'da, *Trudy BGTU*, 2013, No. 6, pp. 119–122.

УДК 621.37:621.391

Ципоренко В. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки, радіоелектронних апаратів та телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету, Житомир, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АНТЕННИХ РЕШІТОК РІЗНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ ДЛЯ КОРЕЛЯЦІЙНО-ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНОГО ПЕЛЕНГУВАННЯ

Актуальність. Завадостійкість радіопеленгаторів суттєво залежить від параметрів їх антено-фідерних систем і конфігурації антенних решіток. Тому дослідження ефективності просторово-частотної селективності антенних решіток різної конфігурації є актуальною задачею.

Мета. Метою статті є дослідження впливу параметрів просторово-частотної селективності різних конфігурацій антенних решіток на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів.

Метод. В роботі виконано аналітичні дослідження та експериментальні дослідження залежності ефективності просторово-частотної селективності розглянутих конфігурацій антенних решіток від їх основних параметрів.

Результати. В роботі виконано дослідження використання можливих варіантів конфігурації та ефективності антенних решіток для кореляційно-інтерферометричного пеленгування. Визначені основні параметри антенних решіток, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності антенних решіток, таких як рівень бічних пелюсток, ширина головної пелюстки, коефіцієнт спрямованої дії і коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки діаграми спрямованості та незмінній кількості радіоканалів, ефективність конфігурації антенної решітки радіопеленгатора буде збільшуватись. Запропоновано варіант оцінки ефективності просторово-частотної селективності конфігурацій антенних решіток, що кількісно враховує усі основні особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Висновки. Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій антенних решіток показав, що при високому рівні завад суттєво кращу ефективність та перспективність застосування має система з двох ортогональних лінійних антенних решіток. Її ефективність на 20дБ більша порівняно з кільцевою антенною решіткою.

Ключові слова: ефективність антенних решіток; кореляційно-інтерферометричний метод; радіопеленгування; лінійна антенна решітка.

НОМЕНКЛАТУРА

АР – антенна решітка;

АФС – антенно-фідерна система;

ДС – діаграма спрямованості;

ДРВ – джерело радіовипромінювання;

ЕМО – електромагнітна обстановка.

d – відстань між елементами (крок) АР;

K_{SL} – рівень бічних пелюсток;

K_D – коефіцієнт спрямованої дії;

K_n – коефіцієнт шумової ширини головної пелюстки ДС;

K_F – коефіцієнт фільтрації;

K_{SW} – рівень бічних пелюсток вікна спектрального аналізу;

K_W – коефіцієнт когерентного підсилення вікна спектрального аналізу;

K_{nW} – коефіцієнт шумової ширини вікна спектрального аналізу;

k – кількість екранованих лінійних АР;

L – кількість радіовипромінювань в межах смуги Δf_k пропускання радіоканалів АР;

m – кількість кутів конфігурацій АР;

$n(t)$ – власний адитивний білий гаусів шум радіоканалів;

N_Σ – кількість радіоканалів АР;

P_S, P_Z, P_N – потужність сигналу, завад та шумів відповідно;

$S(t)$ – прийнятий квазінеперервний випадковий стаціонарний сигнал;

$S_Z(t)$ – прийняті радіовипромінювання завад;

t – змінна часу;

T_a – час аналізу суміші $U(t)$;

$U(t)$ – прийнята адитивна суміш радіовипромінювань;

$W(z)$ – вагова функція діаграмоутворення (вікна спектрального аналізу);

z – порядковий номер елементів АР;

γ_{A1} – ефективність просторової селективності кільцевої АР;

γ_{A2} – ефективність просторової селективності системи ортогональних лінійних АР;

γ_{A3} – ефективність просторової селективності багатокутної (3-х та 4-х кутної) екранованої системи;

γ_{A4} – ефективність просторової селективності для конфігурацій ортогональних екранованих систем з лінійних АР;

$\Delta\theta_{ML}$ – ширина головної пелюстки ДС;

$\Delta\theta_A$ – ширина робочого сектора пеленгування;

$\Delta\theta_{MW}$ – ширина головної пелюстки Фур'є-перетворення функції вікна спектрального аналізу;

Δf_k – ширина смуги пропускання радіоканалів АР;

θ_{ML} – напрямок головної пелюстки ДС АР відносно вісі АР;

$\hat{\theta}$ – оцінка напрямку на ДРВ;

λ – довжина хвилі сигналу;

© Ципоренко В. В., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-2

μ – відношення сигнал/(шум+завади);

μ_A – відношення сигнал/(шум+завади) на виході АР радіопеленгатора.

ВСТУП

При стрімкому збільшенні кількості радіоелектронних засобів в різних галузях діяльності суспільства актуальною задачею є ефективний контроль використання радіочастотного ресурсу і забезпечення електромагнітної сумісності. В цих умовах основною задачею служб радіомоніторингу є контроль роботи ліцензованих ДРВ, а також оперативний пошук несанкціонованих ДРВ і усунення причин їх виникнення [1]. Виконання цієї задачі суттєво ускладнюється в умовах великих населених пунктів, де просторова щільність ДРВ може сягати величини 10^4 джерел на квадратний кілометр.

Основними засобами, що забезпечують ефективну просторову локалізацію джерел завад є радіопеленгатори. Перспективним напрямком реалізації пеленгування для апаратури радіомоніторингу є цифрові кореляційно-інтерферометричні радіопеленгатори, що використовують АР.

Основною перевагою кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є висока точність пеленгування джерел широкосмугових радіовипромінювань при невеликих (менше 0дБ) відношеннях сигнал/шум [1]. Це зумовлено наступними факторами: можливість використання ефективних алгоритмів оброблення сигналів в умовах апріорної невизначеності щодо параметрів радіовипромінювань; можливість ефективної компенсації завад і спотворень, що зумовлені впливом сторонніх об’єктів і елементів АР. Також технологія кореляційно-інтерферометричного пеленгування дає можливість використання різноманітних конфігурацій АР, що дозволяє розширювати область однозначного пеленгування і збільшувати просторову розрізнювальну здатність.

Завадостійкість радіопеленгаторів суттєво залежить від параметрів їх антено-фідерних систем і конфігурації АР [2]. Важливою проблемою розробки радіопеленгаторів є забезпечення їх завадостійкості, що, в свою чергу, дозволяє їм ефективно функціонувати в складній ЕМО при дії різноманітних завад.

Вказані переваги зумовлюють те, що на сьогодні розробка цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів з АР є одним із перспективних напрямків розвитку засобів радіомоніторингу.

Таким чином, невирішеною раніше частиною загальної проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, є дослідження впливу параметрів просторової селективності та ефективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відповідно до невирішеної раніше проблеми розробки і дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, метою статті є: дослідження впливу параметрів просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні задачі:

– дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів;

– визначення основних параметрів АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів;

– дослідження ефективності конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що визначає їх завадостійкість;

– порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень по аналізу та синтезу конфігурацій АР, а також впливу їх параметрів на завадостійкість та точність кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів представлені в великій кількості сучасних наукових праць.

В роботах [2, 3] наведені результати досліджень принципів побудови та завадостійкості швидкодіючих моноімпульсних цифрових кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що використовують лінійні АР. Показана можливість забезпечення пеленгування в реальному масштабі часу одночасно декількох ДРВ, спектри радіовипромінювань яких перекриваються за частотою. Така можливість реалізується на основі лінійних АР з цифровим діаграмоутворенням, що забезпечує низький рівень бічних пелюсток ДС, наприклад, не більше –60дБ. Однак в даних роботах не наведений порівняльний аналіз можливих конфігурацій АР і відповідного досягнення високої завадостійкості та швидкодії радіопеленгатора.

У роботах [4, 5] досліджені пошукові кореляційно-інтерферометричні методи оцінки напрямку на ДРВ з використанням АР, які ефективно реалізуються в цифровій формі. Ці методи використовують багатоітераційний компенсаційний алгоритм оцінки затримки прийому радіовипромінювання рознесеними в просторі пеленгаційними каналами. Це обумовлює низьку швидкодію пеленгування.

В роботі [6] запропоновано безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу, що має високу точність і завадостійкість за рахунок використання попередньої просторової селекції та дисперсійно-кореляційної оцінки напрямків на ДРВ. Даний метод пеленгування використовує оцінку просторової частоти сигналу по двом реконструйованим відлікам просторового аналітичного сигналу. Це залишає можливість подальшого його вдосконалення з метою мінімізації обчислювальних витрат і підвищення швидкодії пеленгування. Також дослідження завадостійкості даного методу не проведено.

У роботах [7–9] досліджені нелінійні спектральні методи пеленгування, які забезпечують високу просторову роздільну здатність прийнятих випромінювань. Однак вони мають ряд суттєвих для систем радіомоніторингу недоліків, таких як висока обчислювальна складність (час обробки сигналів), що в кілька разів перевищує складність пошукового кореляційного методу пеленгування; не-

обхідність точної апріорної інформації про кількість прийнятих в суміші випромінювань; зміщеність оцінок напрямків, що погіршує точність пеленгування; втрата стійкості роботи при низьких (близько 10дБ) вхідних відношеннях сигнал/шум. В результаті ефективність застосування спектральних методів пеленгування, що визначається, в першу чергу, відношенням швидкодія/точність пеленгування, в системах радіомоніторингу недостатня. Це підтверджується відсутністю їх використання в сучасних цифрових пеленгаторах систем радіомоніторингу [1].

В роботах [10–12] наведені результати синтезу основних варіантів побудови спрямованих і неспрямованих антенних систем сучасних радіопеленгаторів. Проведені дослідження їх основних параметрів і характеристик. Визначено, що для задач пеленгування доцільно використовувати фазовані АР із кільцевою та лінійною конфігураціями. Такі АР зазвичай реалізуються в одній або декількох площинах і забезпечують якісну просторову селективність. Застосування АР забезпечує можливість швидкого просторового сканування в широкому робочому секторі і можливість ефективного подавлення та пеленгування завад.

Таким чином, для використання в автоматизованих системах радіомоніторинга розробка та дослідження завадостійкості кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів є актуальною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Нехай здійснюється прийом АР в межах смуги пропускання радіоканалів радіопеленгатора адитивної суміші $U(t)$ взаємно некорельованих сигналу $S(t)$ та радіовипромінювань $S_Z(t)$ завад при наявності шуму $n(t)$:

$$U(t) = S(t) + S_Z(t) + n(t). \quad (1)$$

Будемо вважати відомими значення середніх потужностей P_S сигналу $S(t)$, P_Z завад $S_Z(t)$, та P_N шумів $n(t)$.

Для вказаних умов виконаємо дослідження впливу параметрів просторової селективності різних конфігурацій АР на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів, що використовують АР.

АФС радіопеленгаторів в умовах складної ЕМО виконує дві основні функції: функціонального кутового дискримінатора і просторового селектуючого елементу [1]. Просторові селектуючі властивості АФС, що реалізуються на основі АР, визначаються формою та параметрами її ДС, такими як $\Delta\theta_{ML}$, K_{SL}, K_D.

Складність ЕМО та умови функціонування радіопеленгатора кількісно доцільно характеризувати кількістю L радіовипромінювань та відношенням μ в межах смуги Δf_k:

$$\mu = \frac{P_S}{P_Z + P_N}. \quad (2)$$

На виході АР радіопеленгатора відношення μ_A покращується за умови, що напрямок на ДРВ завади знаходиться за межами головної пелюстки ДС АР і визначається наступним чином:

$$\mu_A = \frac{P_S \cdot K_D^2}{P_Z \cdot K_{SL}^2 + P_N \cdot (\Delta\theta_{ML}/2\pi) \cdot K_n}. \quad (3)$$

Аналіз рівнянь (1)–(3) показує, що відношення μ_A на виході АР і відповідна завадостійкість радіопеленгатора в цілому суттєво залежить від ширини $\Delta\theta_{ML}$ і рівня K_{SL}, які в свою чергу визначаються кількістю N_Σ і способом утворення ДС [13, 14].

В результаті оцінку ефективності γ_A просторової селективності АР радіопеленгатора доцільно визначити як відношення покращення μ_A/μ на її виході до кількості N_Σ, що визначає об'єм її апаратурних витрат, наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{\mu_A}{\mu \cdot N_\Sigma} = \frac{(1 + P_N/P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N/P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML}/2\pi) \cdot K_n)}. \quad (4)$$

Аналіз рівняння (4) показує, що оцінка ефективності γ_A кількісно враховує усі особливості реалізації тільки просторового тракту радіопеленгатора, тобто є інтегрованою оцінкою його просторових селектуючих властивостей. Однак недоліком такого варіанта оцінки ефективності γ_A є відсутність врахування особливостей реалізації часово-частотного тракту радіопеленгатора, що визначається алгоритмом оброблення прийнятої суміші $U(t)$ після АР. В цілому просторовий та часово-частотний тракт кореляційних радіопеленгаторів забезпечує максимально правдоподібну оцінку $\hat{\theta}$ і еквівалентний низькочастотному фільтру з коефіцієнтом K_F, що пропорційний часу T_a.

З урахуванням статистичної незалежності сигналу $S(t)$, радіовипромінювань $S_Z(t)$ завад та шуму $n(t)$ етапи просторового та часово-частотного оброблення можуть виконуватись в довільному порядку. З урахуванням цього ефективність просторово-частотної селективності γ_A в (4) доцільно представити наступним чином:

$$\gamma_A = \frac{(1 + P_N/P_Z) \cdot K_D^2}{N_\Sigma (K_{SL}^2 + (P_N/P_Z) \cdot (\Delta\theta_{ML}/2\pi \cdot K_F) \cdot K_n)}. \quad (5)$$

Особливістю оцінок ефективності γ_A згідно (4) та (5) є їх залежність від відношення q.

При переважанні в суміші $U(t)$ потужних станційних завад $S_Z(t)$ відношення q буде зменшуватись і ефективність γ_A буде визначатися якістю придушення завад за межами сектора $\Delta\theta_{ML}$ головної пелюстки, тобто рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС.

При переважанні в суміші $U(t)$ шумів $n(t)$, що рівномірно розподілені у просторі, ефективність γ_A буде в основному визначатися відносною шириною $(\Delta\theta_{ML}/2\pi)$ головної пелюстки ДС і відповідними апаратурними витратами N_Σ.

Перевагою запропонованого в (5) варіанта оцінки ефективності γ_A є його висока інформативність при простоті розрахунку. Аналіз рівняння (5) показує, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень K_{SL}, ширина $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт K_D і коефіцієнт K_n, та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Виконаємо дослідження залежності ефективності γ_A від її топології. Для цього визначимо конфігурацію АР, як спосіб розташування у просторі її N_Σ елементів [15]. Для подальшого аналізу доцільно виділити наступні основні варіанти конфігурації АР, що мають найбільш широке застосування в кореляційно-інтерферометричних методах радіопеленгування: кільцева АР, система з двох ортогональних лінійних АР (хрестоподібна), багатокутна з екрануванням, система з двох ортогональних лінійних АР з екрануванням [14]. Графічне зображення вказаних конфігурацій АР наведені на рис. 1.

На рис. 1 крапками позначені просторові позиції елементів АР, суцільними лініями позначені елементи екранування.

Визначимо значення ефективності γ_{A1}, рис. 1а. Основною перевагою кільцевих АР є незалежність їх просторової селективності від напрямку θ_{ML} в межах $(0;2\pi)$ радіан робочого сектору пеленгування при відносно невеликих габаритах [1].

Основним недоліком кільцевих АР є відносно великий рівень бічних пелюсток ДС, що зумовлює низьку завадозахищеність за відношенням сигнал/завада радіопеленгатора. Визначимо значення параметрів селективності кільцевої АР наступним чином [1]:

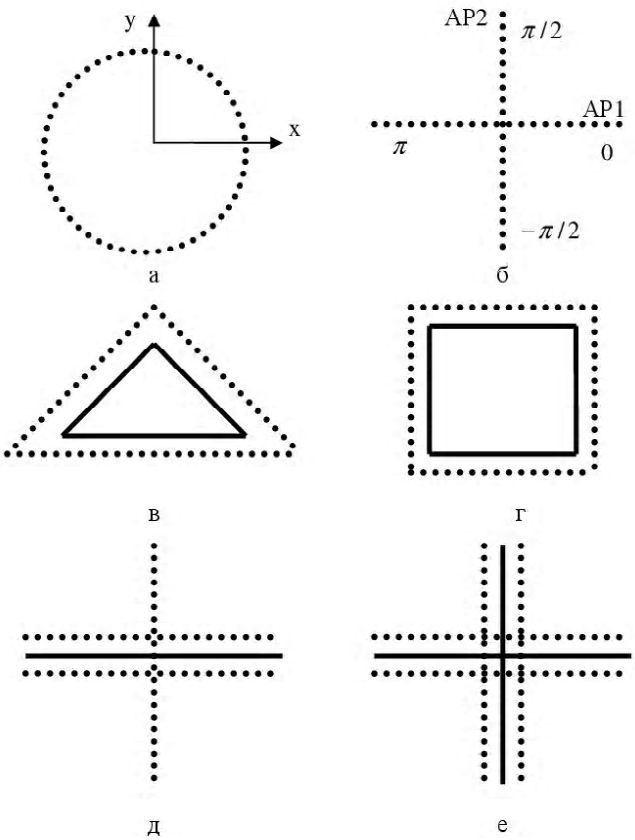


Рисунок 1 – Основні варіанти конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів:
а – кільцева; б – система з двох ортогональних лінійних АР;
в – трикутна з екрануванням; г – чотирикутна з екрануванням;
д – система з двох ортогональних лінійних АР з частковим екрануванням; е – система з двох ортогональних лінійних АР з повним екрануванням

$$\begin{aligned}
&\Delta\theta_{ML1} = 2\cdot\arcsin\left(\frac{2{,}43\cdot\lambda}{N_\Sigma\cdot d}\right);\\
&d \le \lambda/2;\\
&K_{SL1} \in [0{,}1;0{,}4] = [-20\text{dB};-8\text{dB}];\\
&K_{D1} = 1;\\
&K_{n1} = [1;1{,}2].
\end{aligned} \tag{6}$$

З урахуванням (4) і (5) визначимо ефективність γ_{A1} за умови $N_\Sigma >> 1$:

$$\gamma_{A1} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot K_D^2}{N_\Sigma\left(K_{SL1}{}^2 + K_{n1}\cdot\left(2\cdot\arcsin\left(\frac{2{,}43\cdot\lambda}{N_\Sigma\cdot d}\right)/2\pi\cdot K_F\right)\right)}. \tag{7}$$

Аналіз рівнянь (6) та (7) показав, що селективність за шумами та ефективність γ_{A1} в цілому збільшується пропорційно кількості N_Σ радіоканалів АР і її габаритів $(N_\Sigma\cdot d/2\pi)$. При цьому просторова селективність за завадами, що визначається рівнем K_{SL} бічних пелюсток ДС АР, низька (максимум -10dB), і за умови $d \le \lambda/2$ не залежить від величини кроку d АР та кількості N_Σ радіоканалів.

Виконаємо аналіз ефективності селективності конфігурації системи АР, яка складається із двох ортогональних лінійних АР, рис. 1б. Параметри селективності системи ортогональних лінійних АР визначимо наступним чином [14, 15]:

$$\begin{aligned}
&\Delta\theta_{ML2} = \Delta\theta_{MW} = \frac{2\lambda}{d\cdot 0{,}5N_\Sigma\cdot\sin\theta_{ML}};\\
&K_{SL2} = K_{SW} \in [10^{-2};10^{-5}] = [-40\text{dB};-100\text{dB}];\\
&K_{D2} = K_W/2;\\
&K_{n2} = K_{nW} \in [1;1{,}8].
\end{aligned} \tag{8}$$

$K_{SL2} = K_{SW}$, $K_{D2} = K_W$, $K_{n2} = K_{nW}$ – коефіцієнти рівня бічних пелюсток, спрямованої дії, шумової ширини головної пелюстки, відповідно, що визначаються видом вагової функції $W(z)$ діаграмоутворення (вікна спектрального аналізу);

Аналіз рівнянь (8) показує, що коефіцієнти K_{SL2}, K_{D2}, K_{n2} визначаються видом вагової функції $W(z)$, тобто селективність системи ортогональних лінійних АР суттєво залежить від кількості N_Σ її радіоканалів, виду вагової функції $W(z)$ і ширини $\Delta\theta_A$. При пеленгуванні ДРВ в широкому робочому секторі ($\theta_{ML} \in [45;135]^\circ$ для кожної АР) обернено пропорційно множнику $\sin\theta_{ML}$ змінюється (максимум на 30%) ширина $\Delta\theta_{ML2}$ головної пелюстки ДС АР.

Для системи ортогональних лінійних АР весь робочий сектор $\Delta\theta_A$ можна розділити на чотири підсектори шириною $\Delta\theta_A/4 = 0{,}5\pi$ радіан, які попарно відповіда-

ють першій та другій ортогональним лінійним АР пеленгатора наступним чином: для першої АР $\Delta\theta_{A1} \in [-\pi/4;\pi/4] \vee [3\pi/4;-3\pi/4]$, для другої АР $\Delta\theta_{A2} \in (\pi/4;3\pi/4) \vee (-3\pi/4;-\pi/4)$.

З урахуванням цього максимальне відхилення головної пелюстки для кожної зі складових першої та другої ортогональних лінійних АР буде становити:

$$\max\{|\theta_{ML}|\} = \theta_{ML.\max} = \pi/4. \quad (9)$$

З урахуванням (8) та (9) оцінимо значення ефективності γ_{A2} системи ортогональних лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A2} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot K_W^2/4}{N_\Sigma\left(K_{SW}^2 + \dfrac{(1+P_N/P_Z)\cdot K_{nW}\cdot 4\cdot\lambda}{d\cdot N_\Sigma\cdot\sin(\theta_{ML})\cdot 2\pi\cdot K_F}\right)}. \quad (10)$$

Аналіз (9) та (10) показав, що просторова селективність системи ортогональних лінійних АР, рис. 1б, може легко регулюватися в широких межах шляхом вибору функції $W(z)$ і кількості N_Σ радіоканалів.

Суттєвим недоліком системи ортогональних лінійних АР є наявність в її ДС побічних головних пелюсток θ_{ML2} з напрямками просторових каналів $\theta_Z = \{-\theta_{ML2}, (\pi-\theta_{ML2}), (\theta_{ML2}-\pi)\}$, рівень яких дорівнює коефіцієнту K_D головної пелюстки. Частково цей недолік може бути усунений завдяки просторовій селекції одночасно діючих першої та другої ортогональних лінійних АР при обмеженій кількості $m_Z \le 3$ одночасно діючих завад по побічним головним пелюсткам. Також треба враховувати, що при рівномірному розподілі густини імовірності $P_{Z\theta} = 1/2\pi$ ДРВ завад в межах робочого сектора $\Delta\theta_A = 2\pi$ імовірність враження радіопеленгатора по чотирьом побічним просторовим каналам θ_Z прийому буде незначною і має порядок 10^{-6}.

Вказаний недолік системи ортогональних лінійних АР усувається шляхом використання додаткового екранування АР або використання складних адаптивних алгоритмів компенсації завад [15, 16]. Першому варіанту ортогональних лінійних АР з екрануванням відповідають лінійні АР з опуклою конфігурацією у вигляді багатокутників, що містять внутрішні екрануючі системи, рис. 1в, рис. 1г, або подвоєнні ортогональні лінійні АР з екраном між кожною парою АР, рис. 1д, рис. 1е. Недоліком топологій системи лінійних АР з екрануванням є додаткові апаратурні витрати зі збільшенням кількості N_Σ радіоканалів, а також складність реалізації.

Визначимо основні параметри просторової селективності багатокутної системи лінійних АР з екрануванням. В загальному випадку для m-кутної конфігурації:

$$\max\{\Delta\theta_{ML3}\} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot 2\lambda}{d\cdot(N_\Sigma/2m)\cdot\sin\theta_{ML.\max}} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot 4m\cdot\lambda}{d\cdot N_\Sigma\cdot\sin\theta_{ML3.\max}};$$

$$K_{D3} = K_W/m;$$
$$K_{n3} = K_{nW} = \in [1;1{,}8];$$
$$K_{SL3} = K_{SW} = \in [10^{-2};10^{-5}];$$
$$\theta_{ML3.\max} = (2\pi/m)/2 = \pi/m. \quad (11)$$

З урахуванням (4) і (11) для умови $N_\Sigma >> 1$ визначимо ефективність просторової селективності багатокутної екранованої системи, рис. 1в, рис. 1г, з лінійних АР наступним чином:

$$\gamma_{A3} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot(K_W/m)^2}{N_\Sigma\left(K_{SW}^2 + \dfrac{(1+P_N/P_Z)\cdot 4m\cdot\lambda\cdot K_{nW}}{d\cdot N_\Sigma\cdot\sin(\pi/m)\cdot 2\pi\cdot K_F}\right)}. \quad (12)$$

Аналогічним чином визначимо параметри селективності $\Delta\theta_{ML}$, K_D, K_n, K_{SL}, $\theta_{ML.\max}$:

$$\max\{\Delta\theta_{ML4}\} = \max\{\Delta\theta_{ML5}\} = \frac{2\lambda}{d\cdot(N_\Sigma/(2+k))\cdot\sin\theta_{ML}};$$

$$K_{D4} = K_{D5} = K_W/(2+k);$$
$$K_{n4} = K_{n5} = K_{nW} = \in [1;1{,}8];$$
$$K_{SL4} = K_{SL5} = K_{SW} = \in [10^{-2};10^{-5}];$$
$$\theta_{ML4.\max} = \theta_{ML5.\max} = \pi/4. \quad (13)$$

З урахуванням (4) та (13) ефективність γ_{A4} просторової селективності для конфігурацій ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 1д, рис. 1е:

$$\gamma_{A4} = \frac{(1+P_N/P_Z)\cdot K_W^2/(2+k)^2}{N_\Sigma\left(K_{SW}^2 + \dfrac{(1+P_N/P_Z)\cdot 2(2+k)\cdot\lambda\cdot K_{nW}}{d\cdot N_\Sigma\cdot\sin(\pi/4)\cdot 2\pi\cdot K_F}\right)}. \quad (14)$$

Порівняльний аналіз рівнянь (10) та (14) показує, що додаткова селекція дзеркальних просторових каналів прийому в системі ортогональних лінійних АР досягається відносно невеликим (на $[30-50]\%$) збільшенням кількості N_Σ радіоканалів при незмінному значенні $\theta_{ML.\max} = \pi/4$ радіан максимального відхилення напрямку головної пелюстки від нормалі. В екранованих ортогональних лінійних АР селективність за дзеркальними просторовими каналами прийому може бути збільшена до (-60dB) при відсутності розширення $\Delta\theta_{ML}$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо з використанням програми MathCad та рівнянь (7), (10), (12) та (14) експериментальні дослідження залежності ефективності γ_A розглянутих конфігурацій АР від кількості N_Σ радіоканалів АР при ЕМО різної складності – при $P_Z/P_N = 0$дБ та $P_Z/P_N = 20$дБ.

Моделювання виконаємо за наступних умов: для кільцевої АР γ_{A1}: $K_{SL1} = 0{,}4$, $K_{D1} = 1$, $K_{n1} = 1{,}2$; для оцінки ефективності γ_{A2}, γ_{A3}, γ_{A4} врахуємо використання функції $W(z)$ діаграмоутворення – Хемінга з параметрами: коефіцієнт спрямованої дії $K_W = 0{,}54$, коефіцієнт

шумової ширини головної пелюстки $K_{nW} = 1{,}36$, коефіцієнт рівня бічних пелюсток $K_{SW} = -43$дБ [17]. Також оберемо коефіцієнт фільтрації корелятора рівним $K_F = 4 \cdot 10^4$, що відповідає умові оброблення $4 \cdot 10^4$ часових сигнальних відліків. Режим роботи АР – прийом під нахилом (з межевим напрямком прийому головної пелюстки) з кутом $\theta_{ML} = \pi / 4$ для ортогональних систем та $\pi / 3$ для трикутної конфігурації.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 2 та рис. 3 наведені залежності ефективностей: γ_{A1} для рис. 1а, γ_{A2} для рис. 1б, γ_{A3} для рис. 1в, γ_{A4} для рис. 1е за умови мінімальних апаратурних витрат, тобто при $m = 3$ для m-кутної конфігурації, рис. 1в, та $k = 2$ для конфігурації ортогональних екранованих систем з лінійних АР, рис. 1е.

Порівняльний аналіз залежностей ефективностей γ_{A1}–γ_{A4} від кількості N_Σ радіоканалів на рис. 2 та рис. 3 показує, що ефективність АР незалежно від конфігурації є монотонною спадаючою функцією в залежності від кількості N_Σ радіоканалів. Залежності ефективностей γ_{A1}–γ_{A4} є нелінійними.

Доцільно виділити два піддіапазони графіків. В піддіапазоні $N_\Sigma \in [4;30]$ крутизна залежностей суттєва і зумов-

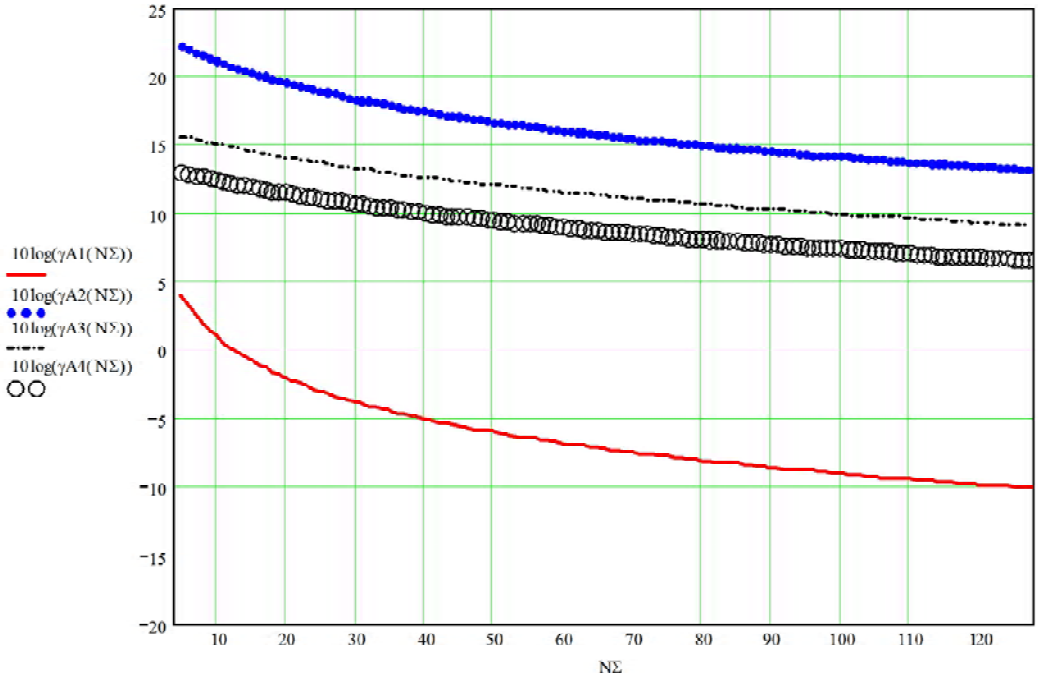


Рисунок 2 – Сімейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 0$дБ від кількості N_Σ радіоканалів

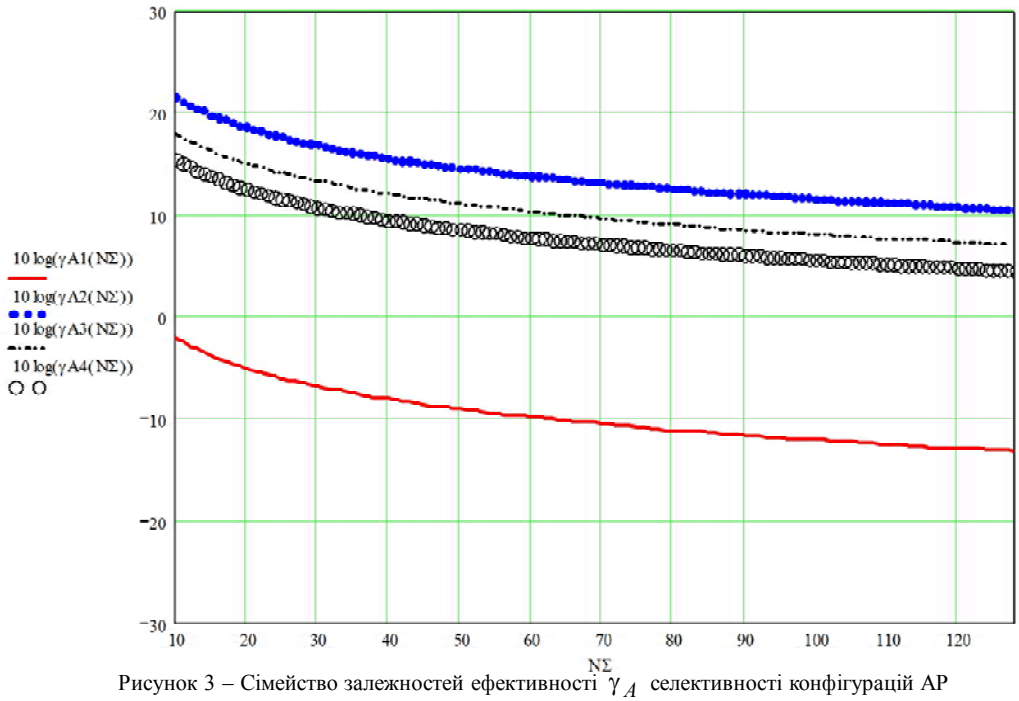


Рисунок 3 – Сімейство залежностей ефективності γ_A селективності конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20$дБ від кількості N_Σ радіоканалів

лює зменшення ефективності в межах [3;7]дБ. В піддіапазоні $N_\Sigma > 30$ крутизна залежностей набагато менша.

Найкращу ефективність для двох варіантів ЕМО, при $P_Z / P_N = 0$дБ та $P_Z / P_N = 20$дБ має система з двох ортогональних лінійних АР, рис. 1б. Її ефективність γ_{A2} просторової селективності краща порівняно з ефективністю γ_{A1} кільцевої АР на [20;25]дБ.

На рис. 4 наведені залежності ефективностей γ_A конфігурацій АР при $P_Z / P_N = 20$дБ від коефіцієнта K_F фільтрації. Для отримання залежності рис. 4 оберемо $N_\Sigma = 32$.

При погіршенні ЕМО і зростанні відношення P_Z / P_N на 20дБ абсолютні значення ефективностей γ_{A2}, γ_{A3} та γ_{A4} збільшуються в середньому на 2дБ, а ефективність γ_{A1} кільцевої АР зменшується на 3дБ.

В результаті для умов складної ЕМО при $P_Z / P_N = 20$дБ і більше доцільним є застосування ортогональної лінійної АР, рис. 1б, а застосування кільцевої АР є малоефективним.

При застосуванні екранування, що захищає радіопеленгатор від дії множинних завад, найбільшу ефективність забезпечує трикутна АР з екрануванням, рис. 1в.

Аналіз рис. 4 показує, що ефективність просторової селективності конфігурацій АР за запропонованим критерієм суттєво залежить від коефіцієнта K_F. Залежності на рис. 4 ефективності γ_A від коефіцієнта K_F є немонотонно зростаючими, крутизна яких найбільша в діапазоні $K_F \in [10;1000]$. При цьому ефективність просторової селективності кільцевої АР практично не залежить від коефіцієнта K_F.

Врахування коефіцієнта K_F, що зазвичай більший $K_F > 10^3$, якісно не змінює співвідношення залежностей порівняно з рис. 2 та рис. 3, але значно підвищує інформативність критерія (5).

В цілому результати досліджень рис. 2–рис. 4 підтверджують інформативність та об'єктивність запропонованого критерія ефективності селективності конфігурації АР і підтверджують в складній ЕМО суттєво кращу ефективність та перспективність застосування конфігурацій з лінійних АР.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати розробки та дослідження критерія ефективності селективності АР різної конфігурації для кореляційно-інтерферометричного пеленгування підтверджують інформативність запропонованого критерія ефективності. Проведені дослідження ефективності варіантів одновимірних АР показали, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторової селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з лінійних ортогональних АР.

Отримані результати доцільно використовувати при реалізації апаратури систем радіомоніторингу та радіонавігації, які функціонують в складній динамічній ЕМО.

Обмеженнями на використання лінійних АР є їх великі габарити на частотах нижче 500МГц, а також лінійна пропорційна залежність точності і роздільної здатності пеленгатора від частоти сигналу.

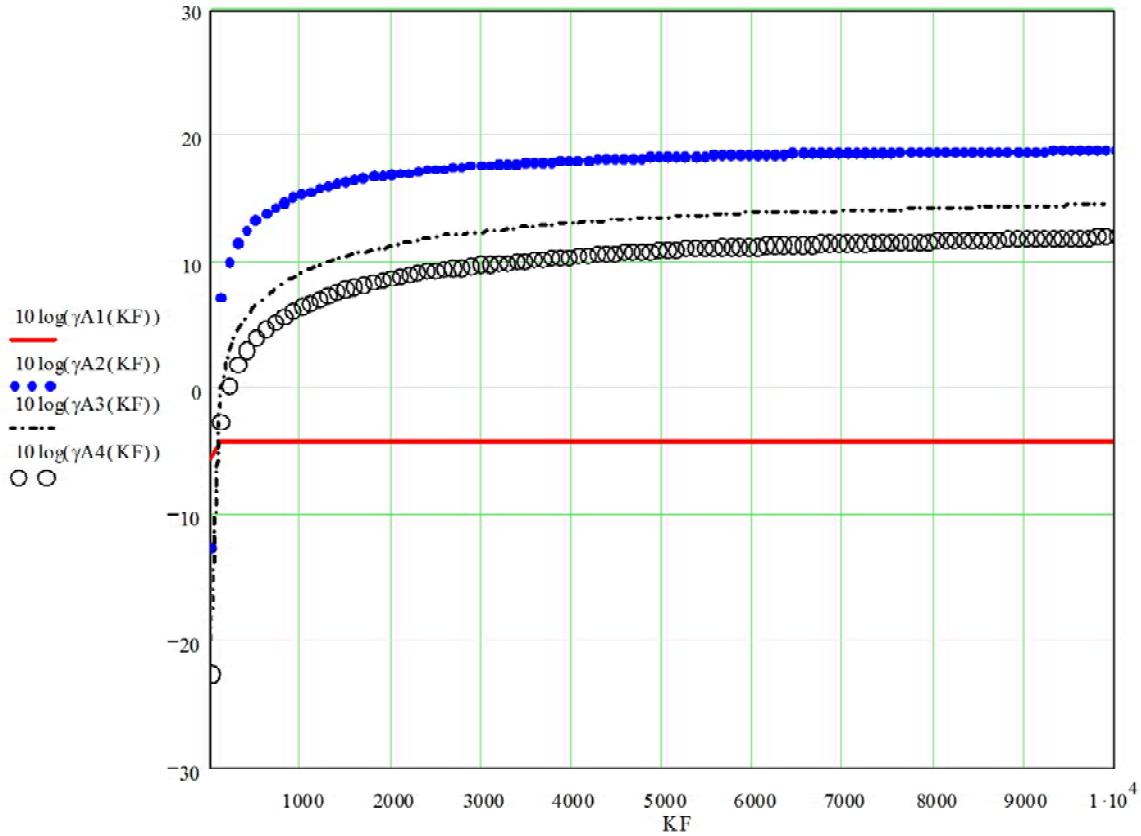


Рисунок 4 – Сімейство залежностей ефективності γ_A при $P_Z / P_N = 20$дБ від коефіцієнта K_F фільтрації

Дані дослідження є продовженням роботи по розробці цифрових кореляційно-інтерферометричний пеленгаторів.

В подальшому необхідно провести дослідження ефективності селективності АР з використанням імовірнісних характеристик ЕМО, а також складних варіантів конфігурацій, в тому числі адаптивних АР.

ВИСНОВКИ

Проведені дослідження можливих варіантів конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показують інформативність та інтегрований характер запропонованого показника ефективності γ_A просторово-частотної селективності конфігурацій антенних решіток.

Визначені основні параметри АР, що впливають на завадостійкість кореляційно-інтерферометричних пеленгаторів. Показано, що при покращенні параметрів селективності АР, таких як рівень бічних пелюсток K_{SL}, ширина головної пелюстки $\Delta\theta_{ML}$, коефіцієнт спрямованої дії K_D і коефіцієнт K_n шумової ширини головної пелюстки діаграми спрямованості, та незмінній кількості N_Σ радіоканалів АР ефективність γ_A буде збільшуватись.

Запропоновано варіант оцінки ефективності γ_A просторово-частотної селективності різних конфігурацій АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів, що кількісно враховує усі особливості реалізації їх просторового та часово-частотного тракту та визначає їх завадостійкість.

Порівняльний аналіз ефективності можливих конфігурації АР кореляційно-інтерферометричних радіопеленгаторів показав, що для умов складної ЕМО при високому рівні завад суттєво кращу ефективність просторово-частотної селективності, на [20;25]дБ більшу порівняно з кільцевою АР, та перспективність застосування мають конфігурації з двох ортогональних лінійних АР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рембовский А. М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А. М. Рембовский, А. В. Ашихмин, В. А. Козьмин ; под ред. А. М. Рембовского; 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2010. – 624 с.
2. Jianfeng L. Joint direction finding and array calibration method for MIMO radar with unknown gain phase errors / L. Jianfeng, J. Ding, J. Defu // IET Microwaves, Antennas & Propagation. – 2016. – Vol. 10, № 14. – P. 1563–1569. DOI: 10.1049/iet-map.2016.0104
3. Ципоренко В. В. Дослідження завадостійкості безпошукового цифрового спектрального кореляційно-інтерферометричного радіопеленгатора з антенною решіткою шляхом моделювання / В. В. Ципоренко, В. Г. Ципоренко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Сер. Технічні науки. – 2012. – № 3 (62). – С. 82–90.
4. Jung-Hoon L. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations / L. Jung-Hoon, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2014. – Vol. 14. – P. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source / [Y. Jian, C. Wangjie, L. Lei, N. Xiaokang] // Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings. – Mengqi Zhou, 2014. – P. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Ципоренко В. В. Безпошуковий цифровий метод кореляційно-інтерферометричного пеленгування з реконструюванням просторового аналітичного сигналу / В. В. Ципоренко // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Сер. Радіотехніка. Радіоапаратуробудування. – 2012. – № 48. – С. 75–84.
7. Kaluri V. R. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum / V. R. Kaluri, V. Shridhar // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 4. – P. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements / [W. Chen, X. Xu, S. Wen, Z. Cao] // IET Radar, Sonar & Navigation. – 2011. – Vol. 5, № 8. – P. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT / [F. Xiao, N. D. Sidiropoulos, M. Wing-Kin, J. Tranter] // Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings. – Pisa : Marco Luise, 2014. – P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation / [J. S. Matthew, D. C. Schmitz, D. M. Anderson, L. J. Douglas, T. B. Jennifer] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2013. – Vol. 61, № 3. – P. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
11. Houcem G. Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources / G. Houcem, P. D. Jean, M. J. Larsys Sergio // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – 2016. – Vol. 52, № 4. – P. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Jung-Hoon L. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System / L. Jung-Hoon, L. Jong-Hwan, W. Jong-Myung // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2016. – Vol. 15. – P. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
13. Chandran S. Advances: Direction-of-Arrival Estimation / S. Chandran. – Norwood : ARTECH HOUSE, 2006. – 474 p.
14. Milligan T. A. Modern antenna design: second edition / T. A. Milligan. – New Jersey: IEEE Press, Wiley-Interscience, 2005. – 614 p.
15. Lawrence M. J. Digital Spectral Analysis: With Applications / M. J. Lawrence. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1986. – 492 p.
16. Antenna engineering handbook / Ed. By J. L. Volakis. – New York : Digital Engineering Library. Mc Graw-Hill Comparies, 2007. – 1755 p.
17. Proakis J. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition / J. G. Proakis, D. G. Manolakis. – New Jersey: Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006. – 1077 p.

Стаття надійшла до редакції 03.01.2016.
Після доробки 20.02.2017.

Ципоренко В. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры радиотехники, радиоэлектронных аппаратов и телекомуникаций Житомирского государственного технологического университета, Житомир, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК РАЗНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ДЛЯ КОРРЕЛЯЦИОННО-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОГО ПЕЛЕНГОВАНИЯ

Актуальность. Помехоустойчивость радиопеленгаторов существенно зависит от параметров их антенно-фидерных систем и конфигурации антенных решеток. Поэтому исследования эффективности пространственно-частотной селективности антенных решеток различной конфигурации является актуальной задачей.

Цель. Целью статьи является исследование влияния параметров пространственно-частотной селективности различных конфигураций антенных решеток на помехоустойчивость корреляционно-интерферометрических пеленгаторов.

Метод. В работе выполнены аналитические и экспериментальные исследования зависимости эффективности пространственно-частотной селективности рассмотренных конфигураций антенных решеток от их основных параметров.

Результати. В работе выполнены исследования использования возможных вариантов конфигурации и эффективности антенных решеток для корреляционно-интерферометрического пеленгования. Определены основные параметры антенных решеток, влияющие на помехоустойчивость корреляционно-интерферометрических пеленгаторов. Показано, что при улучшении параметров селективности антенных решеток, таких как уровень боковых лепестков, ширина главного лепестка, коэффициент направленного действия и коэффициент шумовой ширины главного лепестка диаграммы направленности, и неизменном количестве радиоканалов эффективность конфигурации антенной решетки радиопеленгатора будет увеличиваться. Предложен вариант оценки эффективности пространственно-частотной селективности конфигураций антенных решеток, который количественно учитывает все основные особенности реализации их пространственного и временно-частотного тракта и определяет их помехоустойчивость.

Выводы. Сравнительный анализ эффективности возможных конфигураций антенных решеток показал, что при высоком уровне помех существенно лучшую эффективность, на 20дБ большую по сравнению с кольцевой антенной решеткой, и перспективность применения имеют конфигурации из линейных антенных решеток.

Ключевые слова: эффективность антенных решеток, корреляционно-интерферометрический метод, радиопеленгование, линейная антенная решетка.

Tsyporenko V. V.

PhD, Associate professor, Associate professor of department of radio engineering, radioelectronic devises and telecommunication systems, Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine

RESEARCH OF EFFICIENCY OF ANTENNA ARRAYS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS FOR CORRELATIVE-INTERFEROMETRIC OF DIRECTION FINDING

Context. The immunity of radio direction finders depends greatly on the parameters of their antenna-feeder systems and on the configurations of antenna arrays. Thus, the study of the effectiveness of the spatial-frequency selectivity of antenna arrays of various configurations is an urgent task.

Objective. The aim of the article is to study the influence of parameters of the spatial-frequency selectivity of different configurations of antenna arrays on the noise immunity of correlation-interferometric direction finding.

Method. The analytical and the experimental researches of the efficiency dependence of the spatial-frequency selectivity of the considered configurations of antenna arrays of their basic parameters were completed.

Results. In the work the use of different kinds of configuration and efficiency of antenna arrays for correlative-interferometric direction finding was explored. The basic parameters of antenna arrays that affect the noise immunity of correlative-interferometric direction finders were determined. It is shown that with the improvement of selective parameters of antenna arrays, such as the level of minor lobes, the width of the main lobe, the coefficient of directional noise ratio and the coefficient of the noise width of the main lobe of the radiation pattern and with the constant number of radio channels the efficiency of configuration of antenna array of the direction finder will increase. The variant of estimation of effectiveness of spatial-frequency selectivity of configurations of antenna arrays was suggested, that counts quantitatively all main peculiarities of realization of their spatial and time-frequency path and determines their noise immunity.

Conclusions. The comparative analysis of the effectiveness of possible configurations of antenna arrays showed that the configuration of the orthogonal linear antenna arrays has the significantly better performance and the perspective of use, which is 20dB bigger, comparing with a circular antenna array.

Keywords: efficiency of antenna arrays, correlative-interferometric method of direction finding, linear antenna array.

REFERENCES

1. Rembovskiy A. M., Ashychmin A. V., Kozmin V. A. ; pod red. A. M. Rembovskogo Radiomonitoring – zadaczi, metody, sredstva 2-ye izd.,pererab. i dop. Moscow, Goriacziaya liniya. Telekom, 2010, 624 p.
2. Jianfeng L., Ding J., Defu J. Joint direction finding and array calibration method for MIMO radar with unknown gain phase errors, *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2016, Vol. 10, No. 14, pp. 1563–1569. DOI: 10.1049/iet-map.2016.0104
3. Tsyporenko V. V., Tsyporenko V. G. Doslidzhennia zavadostiykosti bezposhukovogo tsyfrovogo spektralnogo koreliatsiyno-interferometrycznogo radiopelengatora z antennoyu reshitkoyu shliachom modeliuvannia, *Visnyk Zhytomyrskogo derzhavnogo technologicznogo universytetu. Ser. Techniczni nauky*, 2012, No. 3 (62), pp. 82–90.
4. Jung-Hoon L., Jong-Myung W. Interferometer direction-finding system with improved DF accuracy using two different array configurations, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,* 2014, Vol. 14, pp. 719–722. DOI: 10.1109/LAWP.2014.2377291
5. Jian Y., Wangjie C., Lei L., Xiaokang N. Long baseline direction finding and localization algorithms for noise radiation source, *Signal Processing : 12th International Conference ICSP-2014, Hangzhou, 19–23 October, 2014 : proceedings*. Mengqi Zhou, 2014, pp. 52–57. DOI: 10.1109/ICOSP.2014.7014968
6. Tsyporenko V. V. Bezposhukovyj tsyfrovyj metod koreliatsiyno-interferometrycznogo pelenguvannia z rekonstruyuvannim prostorovogo analitycznogo sygnalu, *Visnyk Natsionalnogo technicznogo universytetu Ukrainy "Kyjivskyj politetechnicznyj instytut". Ser. Radiotechnika. Radioaparaturobuduvannia*, 2012, No. 48, pp. 75–84.
7. Kaluri V. R., Shridhar V. Gold-MUSIC: A Variation on MUSIC to Accurately Determine Peaks of the Spectrum, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 4, pp. 2263–2268. DOI: 10.1109/TAP.2012.2232893
8. Chen W., Xu X., Wen S., Cao Z. Super-resolution direction finding with far-separated subarrays using virtual array elements, IET Radar, Sonar & Navigation, 2011, Vol. 5, No. 8, pp. 824–834. DOI: 10.1049/iet-rsn.2010.0289
9. Xiao F., Sidiropoulos N. D., Wing-Kin M., Tranter J. Blind spectra separation and direction finding for cognitive radio using temporal correlation-domain ESPRIT, Acoustics, Speech and Signal Processing : 2014 IEEE International Conference ICASSP, Florence, 4–9 May, 2014 : proceedings. Pisa, Marco Luise, 2014, P. 7749–7753. DOI: 10.1109/ICASSP.2014.6855108
10. Matthew J. S., Schmitz D. C., Anderson D. M., Douglas L. J., Jennifer T. B. Demonstration of an Electrically Small Antenna Array for UHF Direction-of-Arrival Estimation, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, Vol. 61, No. 3, pp. 1371–1377. DOI: 10.1109/TAP.2012.2227921
11. Houcem G., Jean P. D., Larsys M. J. Sergio Direction-finding arrays of directional sensors for randomly located sources, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2016, Vol. 52, No. 4, pp. 1995–2003. DOI: 10.1109/TAES.2016.150655
12. Jung-Hoon L., Jong-Hwan L., Jong-Myung W. Method for Obtaining Three- and Four-Element Array Spacing for Interferometer Direction-Finding System, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, Vol. 15, pp. 897–900. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2479224
13. Chandran S. Advances: Direction-of-Arrival Estimation. Norwood, ARTECH HOUSE, 2006, 474 p.
14. Milligan T. A. Modern antenna design: second edition. New Jersey, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2005, 614 p.
15. Lawrence M. J. Digital Spectral Analysis: With Applications. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 1986, 492 p.
16. Ed. By J. L. Volakis Antenna engineering handbook. New York, Digital Engineering Library. Mc Graw-Hill Comparies, 2007, 1755 p.
17. Proakis J. G., Manolakis D. G. Digital Signal Processing, Principles, Algorithms, and Applications, 4th Edition. New Jersey, Prentice-Hall, Inc. Upper Saddle River, NJ, USA, 2006, 1077 p.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 536.24

Бердник М. Г.

Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет», Дніпро, Україна

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І МЕТОД РІШЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ УЗАГАЛЬНЕНОЇ КРАЙОВОЇ ЗАДАЧІ ТЕПЛООБМІНУ ПОРОЖНЬОГО КУСКОВО-ОДНОРІДНОГО ЦИЛІНДРА, ЯКИЙ ОБЕРТАЄТЬСЯ

Актуальність. У феноменологічній теорії теплопровідності передбачається, що швидкість поширення тепла є нескінченно великою. Однак при високих інтенсивних нестаціонарних процесах, що спостерігаються, наприклад, при вибухах, надзвукових потоках, великих швидкостях обертання використання цього припущення приводить до помилок, тому необхідно враховувати, що розповсюдження теплоти проходить з кінцевою швидкістю.

Мета. Розробка нової узагальненої математичної моделі температурних розподілів у порожньому кусково-однорідному циліндрі у вигляді крайової задачі математичної фізики для рівняння теплопровідності, та розв'язання отриманої крайової задачі.

Метод. Застосовування відомих інтегральніх перетворень Лапласа, Фур'є, а також розробленого нового інтегрального перетворення для кусково-однорідного простору.

Результати. Знайдено нестаціонарне температурне поле порожнього кругового циліндра в циліндричній системи координат, кусково-однорідного в напрямку полярного радіуса, який обертається з постійною кутовою швидкістю навколо осі OZ, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла. Теплофізичні властивості в кожному шарі не залежать від температури за умови ідеального теплового контакту між шарами, а внутрішні джерела тепла відсутні.

Висновки. Вперше розроблена математична модель температурних розподілів у порожньому кусково-однорідному циліндрі, який обертається з постійною кутовою швидкістю навколо осі OZ з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, у вигляді крайової задачі математичної фізики для гіперболічних диференціальних рівнянь теплопровідності з граничними умовами першого роду. Теплофізичні властивості якого в кожному шарі не залежать від температури за умови ідеального теплового контакту між шарами, а внутрішні джерела тепла відсутні.

Розроблено нове інтегральне перетворення для кусково-однорідного простору, за допомогою якого знайдено температурне поле порожнього кусково-однорідного кругового циліндра у вигляді збіжних ортогональних рядів по функціям Бесселя і Фур'є. Знайдений аналітичний розв'язок узагальненої крайової задачі теплообміну циліндра, який обертається, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла може знайти застосування при модулюванні температурних полів, які виникають у багатьох технічних системах (в супутниках, прокатних валках, турбінах і т.ін.).

Ключові слова: крайова задача, узагальнене рівняння переносу енергії, інтегральні перетворення Лапласа, Фур'є, час релаксації.

НОМЕНКЛАТУРА

a_s – коефіцієнт температуропровідності s-го шара циліндра;

Bi – критерій Біо;

c – питома теплоємність;

c_s – питома теплоємність s-го шара циліндра;

F_0 – критерій Фур'є;

I – уявна одиниця;

$J_n(x)$ – функція Бесселя 1го роду $n^{\text{го}}$ порядку;

$Y_n(x)$ – функція Бесселя 2го роду порядку;

Pd – критерій Предводітелева;

R_0 – внутрішній радіус циліндра;

R_1 – радіус межі шарів;

$T(\rho,\varphi,z,t)$ – температура середовища;

$T_{\max}$ – максимальна температура циліндра;

$T_s(\rho,\varphi,z,t)$ – температури s-го шара циліндра;

t – час;

γ – щільність середовища;

γ_s – щільність s-го шара циліндра;

λ – коефіцієнт теплопровідності;

λ_s – коефіцієнт теплопровідності s-го шара циліндра;

τ_r – час релаксації.

© Бердник М. Г., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-3

ВСТУП

У феноменологічній теорії теплопровідності передбачається, що швидкість поширення тепла є нескінченно великою [1, 2]. Однак при високих інтенсивних нестаціонарних процесах, що спостерігаються, наприклад, при вибухах, надзвукових потоках, великих швидкостях обертання вплив скінченності величини швидкості поширення тепла на теплообмін стає помітним [1–6].

В [1] отримано узагальнене рівняння переносу енергії для рушійного елемента суцільного середовища, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла.

Метою роботи є розробка нової узагальненої математичної моделі температурних розподілів у кусково-однорідному циліндрі у вигляді крайової задачі математичної фізики для рівняння теплопровідності, та розв'язання отриманої крайової задачі, розв'язки якої використовуються під час керування температурними полями.

1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Розглянемо розрахунок нестаціонарного температурного поля порожнього кругового циліндра скінченної довжини L, зовнішнього радіуса R в циліндричній системи координат (r,φ,z), кусково-однорідного в напрямку полярного радіуса r, який обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла. Теплофізичні властивості якого в кожному шарі не залежать від температури за умови ідеального теплового контакту між шарами, а внутрішні джерела тепла відсутні. У початковий момент часу температура циліндра постійна G_0, а на зовнішній і внутрішній поверхні циліндра температура відома і не залежить від часу $G(\varphi,z)$ і $G_1(\varphi,z)$ відповідно.

Відносну температуру циліндра $\theta(\rho,\varphi,z,t)$ можна представити у вигляді:

$$\theta(\rho,\varphi,z,t)=\begin{cases}\theta_1(\rho,\varphi,z,t) \text{ якщо } \rho\in(\rho_0,\rho_1);\\ \theta_2(\rho,\varphi,z,t) \text{ якщо } \rho\in(\rho_1,\rho_2).\end{cases} \quad (1)$$

Відносні температури $\theta_s(\rho,\varphi,z,t)$ s-го шара циліндра обчислюються по формулам:

$$\theta_s(\rho,\varphi,z,t)=\frac{T_s(\rho,\varphi,z,t)-G_0}{T_{\max}-G_0},$$

де $\rho=\dfrac{r}{R}$, s=1,2.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Як показує огляд літератури теплообмін в циліндрах, які обертаються, вивчений в даний час ще недостатньо [1, 7]. Показано, що чисельні методи дослідження нестаціонарних неосесиметричних задач теплообміну циліндрів, які обертаються, є не завжди ефективними, якщо мова йде про обчислення при великих швидкостях обертання. Так доводиться [8], що умови стійкості обчислень в методі кінцевих елементів і методі кінцевих різниць, що застосовуються до розрахунку нестаціонарних неосесиметричних температурних полів циліндрів, які обертаються, визначаються аналогічними характеристиками. Ці умови мають вигляд:

$$1-\frac{\Delta F_0}{\Delta\varphi^2}\ge 0 \text{ та } \frac{1}{\Delta\varphi}-\frac{Pd}{2}\ge 0.$$

Якщо $Pd=10^5$, що відповідає кутовій швидкості обертання металевого циліндра $\omega=1{,}671\,\text{сек}^{-1}$ радіусом 100 мм, змінні $\Delta\varphi$ и ΔF_o повинні бути підпорядковані таким умовам:

$$\Delta\varphi\le 2\cdot 10^{-5} \text{ та } \Delta F_o\le 2\cdot 10^{-10}.$$

Для рівномірно охолоджуваного циліндра за умови Bi = 5 час необхідний для того, щоб температура досягла 90% стаціонарного стану, дорівнює $Fo\approx 0{,}025$ [8]. Це означає, що потрібно принаймні здійснити $1{,}3\cdot 10^8$ операцій по часу для того, щоб було досягнуто стаціонарний розподіл температури.

Більше того, потрібно відзначити, що протягом одного циклу обчислень потрібно здійснити $3{,}14\cdot 10^5$ обчислень, так як внутрішній стан у кільці характеризується $3{,}14\cdot 10^5$ точками. У результаті видно, що число обчислень, необхідних для отримання чисельного результату видається нереальним.

Тому для вирішення крайової задачі, яка виникають при математичному моделюванні нестаціонарних процесів теплообміну в циліндрах, які обертаються, будемо застосовувати інтегральні перетворення.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В [1] отримано узагальнене рівняння переносу енергії для рушійного елемента суцільного середовища, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла. Згідно [1] узагальнене рівняння балансу енергії твердого тіла, який обертається, з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, теплофізичні властивості якого не залежать від температури, а внутрішні джерела тепла відсутні приймає вигляд:

$$\gamma c\left\{\frac{\partial T}{\partial t}+\omega\frac{\partial T}{\partial\varphi}+\tau_r\left[\frac{\partial^2 T}{\partial t^2}+\omega\frac{\partial^2 T}{\partial\varphi\partial t}\right]\right\}=$$

$$=\lambda\left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial\varphi^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right], \quad (2)$$

Математично задача визначення відносної температури циліндра $\theta(\rho,\varphi,z,t)$ складається в інтегруванні гіперболічних диференціальних рівнянь теплопровідності (2) в області $D_s=\{(\rho,\varphi,z,t)|\rho\in(\rho_{s-1},\rho_s),\varphi\in(0,2\pi),z\in(0,1),t\in(0,\infty)\}$, що з урахуванням прийнятих допущень запишеться у виді:

$$\frac{\partial\theta_s}{\partial t}+\omega\frac{\partial\theta_s}{\partial\varphi}+\tau_r\frac{\partial^2\theta_s}{\partial t^2}+\tau_r\omega\frac{\partial^2\theta_s}{\partial\varphi\partial t}=$$

$$=\alpha_s^2\left[\frac{\partial^2\theta_s}{\partial\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\theta_s}{\partial\rho}+\frac{1}{\rho^2}\frac{\partial^2\theta_s}{\partial\varphi^2}+\chi\frac{\partial^2\theta_s}{\partial z^2}\right]. \quad (3)$$

з початковими умовами

$$\theta_s(\rho,\varphi,z,0)=0,\quad \frac{\partial\theta_s(\rho,\varphi,z,0)}{\partial t}=0, \tag{4}$$

граничними умовами

$$\theta_1(\rho_0,\varphi,z,t)=W(\varphi,z),\quad \theta_2(1,\varphi,z,t)=V(\varphi,z), \tag{5}$$

$$\theta_s(\rho,\varphi,0,t)=0,\ \theta_s(\rho,\varphi,1,t)=0, \tag{6}$$

умовами ідеального теплового контакту

$$\theta_1(\rho_1,\varphi,z,t)=\theta_2(\rho_1,\varphi,z,t), \tag{7}$$

$$\lambda_1\frac{\partial\theta_1(\rho_1,\varphi,z,t)}{\partial\rho}=\lambda_2\frac{\partial\theta_2(\rho_1,\varphi,z,t)}{\partial\rho}, \tag{8}$$

де $\rho_1=\frac{R_1}{R}$; $\rho_0=\frac{R_0}{R}$; $\rho_2=1$; $a_s=\frac{\lambda_s}{c_s\gamma_s}$; $\chi=\left(\frac{R}{L}\right)^2$; $\alpha_s^2=\frac{a_s}{R^2}$; $z=\frac{z}{L}$; s=1,2; $W(\varphi),V(\varphi)\in C(D)$.

Тоді рішення крайової задачі (3)–(8) $\theta_s(\rho,\varphi,z,t)$ є двічі неперервно диференційованим по ρ, φ, z, t в області D і неперервним на $\overline{D}$ [9], тобто $\theta_s(\rho,\varphi,z,t)\in C^{2,1}(D)\cap C(\overline{D})$, а функції $W(\varphi,z),V(\varphi,z)$, $\theta_s(\rho,\varphi,z,t)$ можуть бути розкладені в комплексний ряд Фур'є [9]:

$$\begin{Bmatrix}\theta_s(\rho,\varphi,z,t)\\ V(\varphi,z)\\ W(\varphi,z)\end{Bmatrix}=\sum_{n=-\infty}^{+\infty}\begin{Bmatrix}\theta_{s,n}(\rho,z,t)\\ V_n(z)\\ W_n(z)\end{Bmatrix}\cdot\exp(in\varphi), \tag{9}$$

де

$$\begin{Bmatrix}\theta_{s,n}(\rho,z,t)\\ V_n(z)\\ W_n(z)\end{Bmatrix}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\begin{Bmatrix}\theta_s(\rho,\varphi,z,t)\\ V(\varphi,z)\\ W(\varphi,z)\end{Bmatrix}\cdot\exp(-in\varphi)d\varphi;$$

$$\theta_{s,n}(\rho,z,t)=\theta_{s,n}^{(1)}(\rho,z,t)+I\theta_{s,n}^{(2)}(\rho,z,t);\ V_n(z)=$$

$$=V_n^{(1)}(z)+IV_n^{(2)}(z);W_n(z)=W_n^{(1)}(z)+I\,W_n^{(2)}(z).$$

З огляду на те, що $\theta_s(\rho,\varphi,z,t)$ функції дійсні, обмежимося надалі розглядом $\theta_{s,n}(\rho,z,t)$ для n=0,1,2,…, тому що $\theta_{s,n}(\rho,z,t)$ і $\theta_{s,-n}(\rho,z,t)$ будуть комплексно спряженими [9]. Підставляючи значення функцій з (9) у (3)–(8) у результаті одержимо систему диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial\theta_{s,n}^{(i)}}{\partial t}+\vartheta_n^{(i)}\theta_{s,n}^{(m_i)}+\tau_r\frac{\partial^2\theta_{s,n}^{(i)}}{\partial t^2}+\tau_r\vartheta_n^{(i)}\frac{\partial\theta_{s,n}^{(m_i)}}{\partial t}=$$

$$=\alpha_s^2\left[\frac{\partial^2\theta_{s,n}^{(i)}}{\partial\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\theta_{s,n}^{(i)}}{\partial\rho}-\frac{n^2}{\rho^2}\theta_{s,n}^{(i)}+\chi\frac{\partial^2\theta_{s,n}^{(i)}}{\partial z^2}\right]. \tag{10}$$

з початковими умовами

$$\theta_{s,n}^{(i)}(\rho,z,0)=0,\quad \frac{\partial\theta_{s,n}^{(i)}(\rho,z,0)}{\partial t}=0 \tag{11}$$

граничними умовами

$$\theta_{1,n}^{(i)}(\rho_0,z,t)=W_n^{(i)}(z),\quad \theta_{2,n}^{(i)}(1,z,t)=V_n^{(i)}(z), \tag{12}$$

$$\theta_{s,n}^{(i)}(\rho,0,t)=0,\quad \theta_{s,n}^{(i)}(\rho,1,t)=0, \tag{13}$$

умовами ідеального теплового контакту

$$\theta_{1,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)=\theta_{2,n}^{(i)}(\rho_1,z,t), \tag{14}$$

$$\lambda_1\frac{\partial\theta_{1,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)}{\partial\rho}=\lambda_2\frac{\partial\theta_{2,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)}{\partial\rho}, \tag{15}$$

де $\vartheta_n^{(1)}=-\omega n$; $\vartheta_n^2=\omega n$; $m_1=2$, $m_2=1$; i,s=1,2.

Застосовуємо до системи диференціальних рівнянь (10) інтегральне перетворення Фур'є [10]:

$$\bar{f}(\lambda_m)=\int_0^1 f(x)\sin(\pi\cdot m\cdot x)\,dx,$$

де $\lambda_m=\pi\cdot m$; m=1,2,…, а формула оберненого перетворення має вигляд:

$$f(x)=2\sum_{m=1}^{\infty}\sin(\pi\cdot m\cdot x)\cdot\bar{f}(\lambda_m). \tag{16}$$

В результаті одержуємо систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{\partial\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}}{\partial t}+\vartheta_n^{(i)}\tilde{\theta}_{s,n}^{(m_i)}+\tau_r\frac{\partial^2\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}}{\partial t^2}+\tau_r\vartheta_n^{(i)}\frac{\partial\tilde{\theta}_{s,n}^{(m_i)}}{\partial t}=$$

$$=\alpha_s^2\left[\frac{\partial^2\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}}{\partial\rho^2}+\frac{1}{\rho}\frac{\partial\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}}{\partial\rho}-\frac{n^2}{\rho^2}\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}-\chi\lambda_m^2\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}\right]. \tag{17}$$

з початковими умовами

$$\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}(\rho,0)=0,\quad \frac{\partial\tilde{\theta}_{s,n}^{(i)}(\rho,0)}{\partial t}=0, \tag{18}$$

граничними умовами

$$\tilde{\theta}_{1,n}^{(i)}(\rho_0,z,t)=\tilde{W}_n^{(i)},\quad \tilde{\theta}_{2,n}^{(i)}(1,z,t)=\tilde{V}_n^{(i)}, \tag{19}$$

умовами ідеального теплового контакту

$$\tilde{\theta}_{1,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)=\tilde{\theta}_{2,n}^{(i)}(\rho_1,z,t), \tag{20}$$

$$\lambda_1\frac{\partial\tilde{\theta}_{1,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)}{\partial\rho}=\lambda_2\frac{\partial\tilde{\theta}_{2,n}^{(i)}(\rho_1,z,t)}{\partial\rho}. \tag{21}$$

Для розв'язання крайової задачі (17)–(21) побудуємо інтегральне перетворення:

$$\bar{f}(\mu_{n,k}) = \int_{\rho_0}^{1} \frac{Q_0\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_s}\rho\right)}{\alpha(\rho)} \rho f(\rho) d\rho =$$

$$= \sum_{s=1}^{2} \int_{\rho_{s-1}}^{\rho_s} \frac{Q_s\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_s}\rho\right)}{\alpha_s^2} \rho f(\rho) d\rho, \qquad (22)$$

де $Q_0\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_s}\rho\right)$,

$$\alpha(\rho) = \begin{cases} Q_1\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right), \ \alpha_1^2 & \textit{якщо} \quad \rho \in (\rho_0, \rho_1); \\ Q_2\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right), \ \alpha_2^2 & \textit{якщо} \quad \rho \in (\rho_1, \rho_2). \end{cases}$$

Власні функції $Q_s\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_s}\rho\right)$ і власні значення $\mu_{n,k}$ знаходяться із розв'язку задачі Штурма-Ліувілля:

$$\frac{d^2 Q_s}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{dQ_s}{d\rho} - \frac{n^2}{\rho^2} + \frac{\mu^2{}_{n,k}}{\alpha_s^2} Q_s = 0, \qquad (23)$$

$$Q_1\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_0\right) = 0, \ Q_2\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right) = 0, \qquad (24)$$

$$Q_1\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right) = Q_2\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right),$$

$$\lambda_1 \frac{\partial Q_1\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right)}{\partial\rho} = \lambda_2 \frac{\partial Q_2\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}{\partial\rho} \ (s=1,2). \qquad (25)$$

Розв'язавши задачу Штурма-Ліувілля (23)–(25) одержуємо:

$$Q_1\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right) = \frac{\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right)}{\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right)},$$

$$Q_2\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) = \frac{\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right)}{\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)},$$

де $\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) = Y_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_0\right) J_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right) - J_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_0\right) Y_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right)$;

$$\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) = Y_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right) J_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) - J_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right) Y_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right).$$

Власні значення $\mu_{n,k}$ знаходяться із розв'язку трансцендентного рівняння:

$$\frac{\mu_{n,k}\Lambda'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right)}{\alpha_1\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right)} = \sigma \frac{H\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}{\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)},$$

де $H\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) = \frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\left[Y_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right) J_n'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right) - \right.$

$$\left. - J_n\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right) Y_n'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right)\right]; \ \sigma = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

Формула оберненого перетворення має вигляд:

$$f(\rho) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Q_0(\mu_{n,k}\rho)}{\left\|Q_0(\mu_{n,k}\rho)\right\|^2} \bar{f}(\mu_{n,k}). \qquad (26)$$

Де квадрат норми власної функції $\left\|Q_0(\mu_{n,k}\rho)\right\|^2$ дорівнює:

$$\left\|Q_0\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_s}\rho\right)\right\|^2 = \frac{\rho_1^2}{2\alpha_1^2}\left\{\left(1 - \frac{n^2\alpha_1^2}{\mu_{n,k}^2\rho_1^2}\right) + \left[\frac{\Lambda'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}{\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}\right]^2\right\} -$$

$$- \frac{\rho_0^2}{2\alpha_1^2} \cdot \left[\frac{\Lambda'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_0\right)}{\Lambda\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho_1\right)}\right]^2 + \frac{\rho_2^2}{2\alpha_2^2}\left[\frac{\alpha_2 H\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_2\right)}{\mu_{n,k}\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}\right]^2 -$$

$$- \frac{\rho_1^2}{2\alpha_2^2}\left\{\left(1 - \frac{n^2\alpha_2^2}{\mu_{n,k}^2\rho_1^2}\right) + \left[\frac{\alpha_2 H\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}{\mu_{n,k}\Psi\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho_1\right)}\right]^2\right\}.$$

Застосовуємо до системи диференціальних рівнянь (17) інтегральне перетворення (22) і враховуючи позначення (1), в результаті одержуємо систему звичайних диференціальних рівнянь:

$$\frac{d\bar{\tilde{\theta}}_n^{(i)}}{dt} + \vartheta_n^{(i)}\left[\bar{\tilde{\theta}}_n^{(m_i)} + \tau_r \frac{d\bar{\tilde{\theta}}_n^{(m_i)}}{dt}\right] + \tau_r \frac{d^2\bar{\tilde{\theta}}_n^{(i)}}{dt^2} =$$

$$= \mu_{n,k}\Omega_{n,k}^{(i)} - \mu_{n,k}^2\bar{\tilde{\theta}}_n^{(i)} - \chi\lambda_m^2\bar{\tilde{\theta}}_n^{(i)}, \qquad (27)$$

де $\Omega_{n,k}^{(i)} = \frac{\rho_0}{\alpha_1} Q_1'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_1}\rho\right)\widetilde{W}_n^{(i)} - \frac{1}{\alpha_2} Q_2'\left(\frac{\mu_{n,k}}{\alpha_2}\rho\right)\widetilde{V}_n^{(i)}$

с початковими умовами

$$\overline{\widetilde{\theta}}_n^{(i)}(\mu_{n,k},t) = 0,\ \frac{\partial \overline{\widetilde{\theta}}_n^{(i)}(\mu_{n,k},t)}{\partial t} = 0,\ (i=1,2). \qquad (28)$$

Застосовуємо до системи диференціальних рівнянь (27) с початковими умовами (28) інтегральне перетворення Лапласа [10]:

$$\widehat{f}(s) = \int_0^\infty f(\tau) e^{-s\tau}\, d\tau .$$

В результаті одержуємо систему алгебраїчних рівнянь відносно $\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(i)}$:

$$s\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(i)} + \vartheta_n^{(i)}\left(\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(m_i)} + \tau_r s \widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(m_i)}\right) + \tau_r s^2 \widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(i)} = q_{n,k}\left(\frac{\mu_{n,k}\widehat{\Omega}_{n,k}^{(i)}}{q_{n,k}} - \widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(i)}\right), \qquad (29)$$

де i=1,2; $q_{n,k} = \mu_{n,k}^2 + \chi\lambda_m^2$.

Розв'язавши систему рівнянь (29) одержуємо:

$$\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(i)} = \mu_{n,k} \frac{\widehat{\Omega}_{n,k}^{(i)}\left(\tau_r s^2 + s + q_{n,k}\right) + (-1)^{i+1}\omega n \widehat{\Omega}_{n,k}^{(m_i)}(1+s\tau_r)}{\left(\tau_r s^2 + s + q_{n,k}\right)^2 + \omega^2 n^2 (1+s\tau_r)^2},$$

$$(i=1,2). \qquad (30)$$

Застосовуючи до зображення функцій (30) формули оберненого перетворення Лапласа [10] одержуємо оригінали функцій:

$$\overline{\widetilde{\theta}}_n^{(1)}(t) = \sum_{j=1}^{2} \zeta_{n,k}(s_j)\Big\{\widehat{\Omega}_{n,k}^{(1)}(s_j)\cdot\left[(2\tau_r s_j + 1) + \tau_r\omega n I\right] + \widehat{\Omega}_{n,k}^{(2)}(s_j)\cdot\left[\tau_r\omega n - (2\tau_r s_j + 1) I\right]\Big\}\cdot\left(e^{s_j t} - 1\right) + \sum_{j=3}^{4} \zeta_{n,k}(s_j)\cdot\Big\{\widehat{\Omega}_{n,k}^{(1)}(s_j)\cdot\left[(2\tau_r s_j + 1) - \tau_r\omega n I\right] + \widehat{\Omega}_{n,k}^{(2)}(s_j)\cdot\left[\tau_r\omega n + (2\tau_r s_j + 1) I\right]\Big\}\cdot\left(e^{s_j t} - 1\right), \qquad (31)$$

$$\overline{\widetilde{\theta}}_n^{(2)}(t) = \sum_{j=1}^{2} \zeta_{n,k}(s_j)\cdot\Big\{\widehat{\Omega}_{n,k}^{(2)}(s_j)\cdot\left[(2\tau_r s_j + 1) + \tau_r\omega n I\right] - \widehat{\Omega}_{n,k}^{(1)}(s_j)\cdot\left[\tau_r\omega n - (2\tau_r s_j + 1) I\right]\Big\}\cdot\left(e^{s_j t} - 1\right) + \sum_{j=3}^{4} \zeta_{n,k}(s_j)\cdot\Big\{\widehat{\Omega}_{n,k}^{(2)}(s_j)\cdot\left[(2\tau_r s_j + 1) - \tau_r\omega n I\right] - \widehat{\Omega}_{n,k}^{(1)}(s_j)\cdot\left[\tau_r\omega n + (2\tau_r s_j + 1) I\right]\Big\}\left(e^{s_j t} - 1\right), \qquad (32)$$

де $\zeta_{n,k}(s_j) = \frac{0{,}5 s_j^{-1}\mu_{n,k}}{(2\tau_r s_j + 1)^2 + (\tau_r\omega n)^2}$, а значення s_j для j=1,2,3,4 визначаються за формулами:

$$s_{1,2} = \frac{(\tau_r\omega n i - 1) \pm \sqrt{(1+\tau_r\omega n i)^2 - 4\tau_r q_{n,k}}}{2\tau_r},$$

$$s_{3,4} = \frac{(\tau_r\omega n i + 1) \pm \sqrt{(1-\tau_r\omega n i)^2 - 4\tau_r q_{n,k}}}{2\tau_r}.$$

Таким чином, з урахуванням формул обернених перетворень (9),(16) і (26) одержуємо температурне поле кусково-однорідного кругового циліндра в напрямку полярного радіуса, який обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла:

$$\theta(\rho,\varphi,z,t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty}\left\{\sum_{k=1}^{\infty}\left\langle 2\sum_{m=1}^{\infty}\left[\overline{\widetilde{\theta}}_n^{(1)}(t) + i\cdot\overline{\widetilde{\theta}}_n^{(2)}(t)\right]\times \sin(\pi m z)\right\rangle\cdot\frac{Q_0(\mu_{n,k}\rho)}{\left\|Q_0(\mu_{n,k}\rho)\right\|^2}\right\}\cdot\exp(in\varphi), \qquad (33)$$

де значення $\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(1)}(t)$ і $\widehat{\overline{\widetilde{\theta}}}_n^{(2)}(t)$ визначаються по формулам (31), (32).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для розрахунку температурних полів $\theta(\rho,\varphi,z,t)$ в кусково-однорідному циліндра по отриманій формули (33) було розроблено програмне забезпечення. При чисельних розрахунках знаходження суми рядів вони були замінені на часткові суми з точністю 10^{-4}.

Програмне забезпечення написане на мові об'єктно-орієнтованого програмування C#, реалізоване у середовищі розробки Microsoft Visual Studio 2010 та функціонує на будь-якій операційній системі, на котрій встановлено Microsoft .NET Framework версії 4.0 або вище.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для перевірки математичної моделі проведені розрахунки, за допомогою розробленого програмного забезпечення, температурного поля в порожньому кусково-однорідному циліндрі.

Температура на поверхні циліндра задавалась у вигляді:

$$\theta(1,\varphi,z,t) = \Theta_1(\varphi)\cdot\eta(l_1 - z) + \Theta_2(\varphi)\cdot\left[\eta(1-l_2-z) - \eta(l_1 - z)\right] + \Theta_3(\varphi)\cdot\left[\eta(1-z) - \eta(1-l_2-z)\right],$$

$$\Theta_2(\varphi) = 2\cdot\pi^{-1}\cdot\varphi\cdot\eta(0{,}5\pi-\varphi) + \eta(1{,}5\pi-\varphi) - \eta(0{,}5\pi-\varphi) + \left[1 + 2\cdot\pi^{-1}\cdot\eta(1{,}5\pi-\varphi)\right]\cdot\left[\eta(2\cdot\pi-\varphi) - \eta(1{,}5\pi-\varphi)\right],$$

де $\Theta_1(\varphi)=\Theta_3(\varphi)$=0,03; $\rho_0=0{,}5$; $\rho_1=0{,}75$ $l_1=l_2$=0,25;

$$\eta(z)=\begin{cases}1 & \text{якщо} \quad z\ge 0;\\ 1 & \text{якщо} \quad z\ge 0,\end{cases}$$

$\theta(\rho,\varphi,0,t)=\theta(\rho,\varphi,1,t)$=0,1, $\theta(\rho_0,\varphi,z,t)$=0,05.

Необхідні для розрахунку властивості матеріала циліндра наступні:

$\lambda_1=34{,}8$ Вт/(м·К); $\tau_r=10^{-11}$сек; $c_1=560$ Дж/(кг·К);

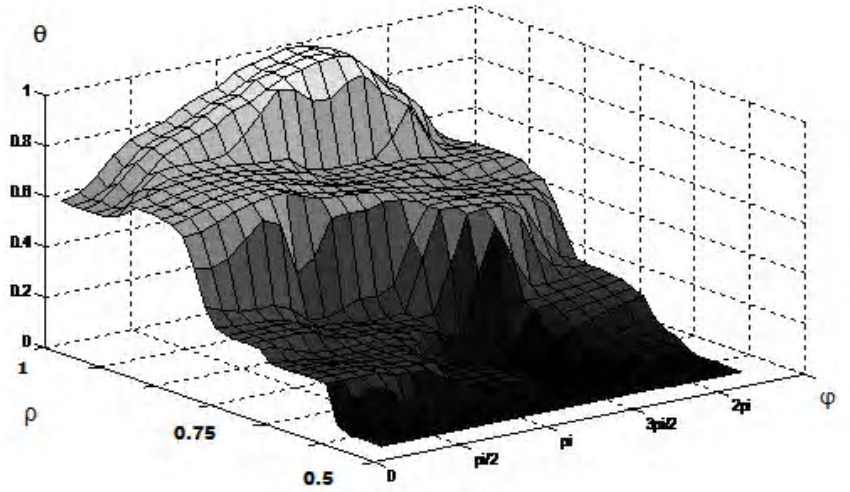
$c_2=560$ Дж/(кг·К); $\gamma_1=7800$ кг/м^3; $\sigma=1{,}5$.

На рис. 1 представлені результати чисельних експериментів у вигляді кривих розподілу температури при наступних значеннях параметрів: z=0,5, $Pd=100$ ($Pd=\dfrac{\omega R^2}{a_1}$), де $F_0=a_1 t\cdot R^{-2}$.

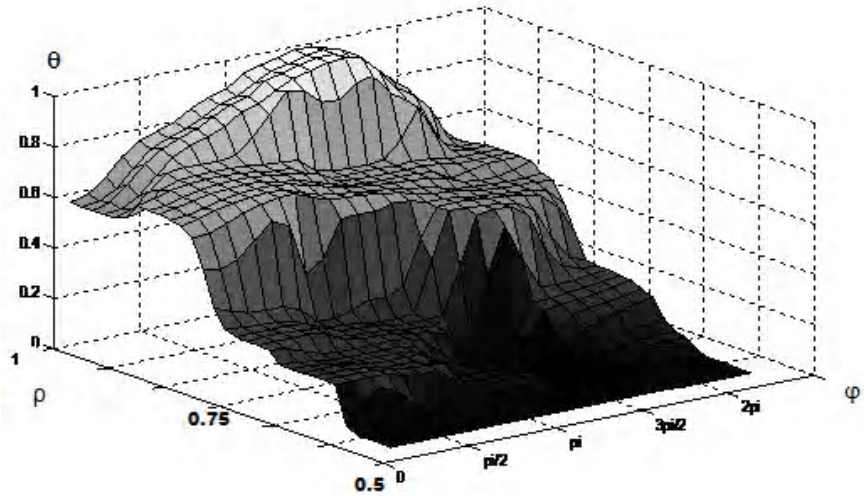
6 ОБГОВОРЕННЯ

Як видно з рис. 1 температурне поле при $\rho<0{,}54$, є осесиметричне, а амплітуда коливань температурі з часом зменшується.

Історично склалося, що в Україні розвинута мережа металургійних підприємств, на яких виробляють значну частину світового випуску сталі. На високопродуктивні слябові машини безперервного лиття заготовок (МБЛЗ) припадає приблизно 2/3 об'єму безперервного лиття заготовок [7]. Ролик МБЛЗ – це пустотілий циліндр діаметром від 140 до 600 мм, залежно від відстані до кристалізатора, довжина робочої частини 1900–2300 мм при загальній довжині 2400–4320 мм [1]. На МБЛЗ встановлено кілька сотень (500–800 штук) роликів, які підтримують сляб. Температура на його поверхні роликів 1300°С [7]. Через внутрішню порожнину ролика прокачують технічну воду для його охолодження. Швидкість обертання



а



б

Рисунок 1 – Розподіл температурного поля в циліндрі при різних значеннях критерія Фурьє:

а – $F_0=04$; б – $F_0=1$

ролика залежить від його діаметра та швидкості переміщення сляба. Ролики, які працюють у складних умовах термомеханічного навантаження, визначають ресурс МБЛЗ.

Таким чином знайдений аналітичний вираз (33) для розрахунку нестаціонарного неосесиметричного температурного температурного поля порожнього кругового циліндра циліндра скінченної довжини L, зовнішнього радіуса R в циліндричній системи координат (r, φ, z), кусково-однорідного в напрямку полярного радіуса r, який обертається з постійною кутовою швидкістю ω навколо осі OZ, з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла можна використовувати для моделювання температурніх станів прокатних валків.

ВИСНОВКИ

Вперше розроблена математична модель температурних розподілів у порожньому кусково-однорідному циліндрі, який обертається з постійною кутовою швидкістю навколо осі OZ з урахуванням кінцевої швидкості поширення тепла, у вигляді крайової задачі математичної фізики для рівняння теплопровідності.

Розроблено нове інтегральне перетворення для кусково-однорідного простору, за допомогою якого знайдено температурне поле у порожньому кусково-однорідного циліндра у вигляді збіжних ортогональних рядів по функціям Бесселя і Фур'є.

Знайдений аналітичний розв'язок узагальненої крайової задачі теплообміну циліндра, який обертається, з урахуванням скінченності величини швидкості поширення тепла може знайти застосування при модулюванні температурних полів, які виникають у багатьох технічних системах (в супутниках, прокатних валках, турбінах і т.ін.).

ПОДЯКИ

Робота виконана в державном вищом навчальном закладі «Національний гірничий університет» в рамках держбюджетній науковій роботі «Розробка та впровадження сучасних засобів дистанційного навчання та діагностики знань з дисциплін напряму підготовки комп'ютерні науки» за спеціальністю 6.050101 «Інформаційні управляючі системи та технології» (Е-310).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бердник М. Г. Математичне моделювання тривимірної узагальненої задачі теплообміну суцільного циліндра, який обертається / М. Г. Бердник // Питання прикладної математики і математичного моделювання. – Д. : ДНУ, 2014. – С. 26–35.
2. Конет І. М. Гіперболічні крайові задачі в необмежених тришарових областях / І. М. Конет, М. П. Ленюк. – Львів, 2011. – 48 с. – (Препр./ НАН України Ін-т прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача; 01.11).
3. Ячменьов В. О. Розрахунок температурних полів в складеному напівнескінченному тілі з урахуванням узагальненого закону Фур'є / В. О. Ячменьов, В. В. Ніколенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія : Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 10 (1182). – С. 61–65.
4. Mainardi F. The fundamental solutions for the fractional diffusion wave equation [Text] / F. Mainardi // Appl. Math. Lett. – 1996. – № 9. – P. 23–28.
5. Povstenko Y. Time-fractional heat conduction in an infinite medium with a spherical hole under Robin boundary condition / Y. Povstenko // Fract. Calc. Appl. Anal. – 2013. – № 16. – P. 356–369.
6. Povstenko Y. Fractional heat conduction in an infinite medium with a spherical inclusion. Entropy / Y. Povstenko // Fract. Calc. Appl. Anal. – 2013. – № 15. – P. 4122–4133.
7. Громик А. П. Нестаціонарні задачі теплопровідності в кусково-однорідних просторових середовищах / А. П. Громик, І. М. Конет. – Кам'янець-Подільський : Абетка-Світ, 2009. – 120 с.
8. Kuwashimo Kensuke. Temperature distribution within a rotatinq cylindrieal body/ Kuwashimo Kensuke, Yamada Tominori // Bull. JSME. – 1978. – Vol. 21, № 152. – P. 266–272.
9. Маркович Б. М. Рівняння математичної фізики / Б. М. Маркович – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – 384 с.
10. Лопушанська Г. П. Перетворення Фур'є, Лапласа: узагальнення та застосування /Г. П. Лопушанська, А. О. Лопушанський, О. М. М'яус. – Львів : ЛНУ ім. Івана Франка, 2014. – 152 с.
11. Калініченко В. Вплив експлуатаційних факторів на напружено-деформований та граничний стан роликів машин безперервного лиття заготовок / В. Калініченко, Н. Гопкало // Вісник ТДТУ. – 2010. – Том 15, № 1. – С. 41–51.

Стаття надійшла до редакції 12.02.2017.
Після доробки 27.02.2017.

Бердник М. Г.
Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем, государственного высшего учебного заведения «Национальный горный университет», Днепр, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОБОБЩЕННОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛООБМЕНА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ПОЛОГО КУСОЧНО-ОДНОРОДНОГО ЦИЛИНДРА

Актуальность. В феноменологической теории теплопроводности предполагается скорость распространения тепла бесконечно большой. Однако при высоких интенсивных нестационарных процессах наблюдаемых, например, при взрывах, сверхзвуковых потоках, больших скоростях вращения использования этого предположения приводит к ошибкам, поэтому необходимо учитывать, что распространение теплоты проходит с конечной скоростью.

Цель. Разработка новой обобщенной математической модели температурных распределений в полом кусочно-однородном цилиндре в виде краевой задачи математиче-ской физики для уравнения теплопроводности, и решение полученной краевой задачи.

Метод. Применение известных интегральных преобразований Лапласа, Фурье, а также разработанного нового интегрального преобразования для кусочно-однородного пространства.

Результаты. Найдено нестационарное температурное поле полого кругового цилиндра в цилиндрической системы координат, кусочно-однородного в направлении полярного радиуса, который вращается с постоянной угловой скоростью вокруг оси OZ, с учетом конечной скорости распространения тепла. Теплофизические свойства в каждом слое не зависят от температуры при идеальном тепловом контакте между слоями, а внутренние источники тепла отсутствуют.

Выводы. Впервые разработана математическая модель температурных распределений в полом кусочно-однородном цилиндре, который вращается с постоянной угловой скоростью вокруг оси OZ с учетом конечной скорости распространения тепла в виде краевой задачи математической физики для гиперболических дифференциальных уравнений теплопроводности с граничными условиями первого рода. Теплофизические свойства которого в каждом слое не зависят от температуры при идеальном тепловом контакте между слоями, а внутренние источники тепла отсутствуют.

Разработано новое интегральное преобразование для кусочно-однородного пространства, с помощью которого найдено температурное поле полого кусочно-однородного кругового цилиндра в виде сходящихся ортогональных рядов по функциям Бесселя и Фурье. Найденное аналитическое решение обобщенной краевой задачи теплообмена цилиндра, который вращается, с учетом конечности величины скорости распространения тепла, может найти применение при моделировании температурных полей, которые возникают во многих технических системах (в спутниках, прокатных валках, турбинах и т.д.).

Ключевые слова: краевая задача, обобщенное уравнение переноса энергии, интегральные преобразования Лапласа, Фурье, время релаксации.

Berdnyk M. G.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Software Systems State Higher Education Institution «National Mining University», Dnipro, Ukraine

MATHEMATICAL MODELS AND METHODS OF SOLVING SPATIAL GENERALIZED BOUNDARY VALUE PROBLEM HEAT ROTATING HOLLOW PIECEWISE HOMOGENEOUS CYLINDER

Context. The phenomenological theory of heat conduction speed of heat propagation is assumed infinitely large. However, the high intensity of the observed transient processes such as explosions, supersonic flow, high speeds of rotation of the use of this assumption leads to errors, so it is necessary to take into account that the distribution of heat takes place at a finite rate.

Objective. Development of a new generalized mathematical model of the temperature distribution in the hollow piecewise uniform cylinder in the form of a boundary value problem of mathematical physics for the heat equation and the solution of the resulting boundary value problem.

Method. The use of known integral Laplace transforms, Fourier series, and developed a new integral transformation for piecewise homogeneous space.

Results. Found Polga transient temperature field of a circular cylinder in a cylindrical coordinate system, a piecewise homogeneous polar radius direction, which rotates at a constant angular velocity about the axis OZ, with the ultimate heat propagation speed. Thermal properties of each layer does not depend on the temperature at an ideal thermal contact between the layers, and there are no internal sources of heat.

Conclusions. For the first time developed a mathematical model of the temperature distribution in the empty piecewise uniform cylinder, which rotates at a constant angular velocity about the axis OZ, taking into account the finite speed of propagation of heat in the form of mathematical physics boundary value problem for hyperbolic partial differential equations of heat conduction with boundary conditions of the first kind. Thermal properties are in each layer does not depend on the temperature at an ideal thermal contact between the layers, and there are no internal sources of heat.Created a new integral transform of a piecewise-homogeneous space, with which found the temperature field of the hollow piecewise homogeneous circular cylinder in the form of convergent orthogonal series of Bessel functions and of Fourier. The obtained analytical solution of a generalized boundary value problem of heat transfer cylinder, which rotates, given a finite amount of heat propagation velocity can be used for modeling of temperature fields, which occur in many technical systems (satellites, forming rolls, turbines, etc.).

Keywords: boundary value problem, generalized equation of energy transfer, integrated Laplace, Fourier, relaxation time.

REFERENCES

1. Berdnyk M. G. Matematychne modeljuvannja tryvymirnoi' uzagal'nenoi' zadachi teploobminu sucil'nogo cylindra, jakyj obertajet'sja, *Pytannja prykladnoi' matematyky i matematychnogo modeljuvannja,* D, DNU, 2014, pp. 26–35.
2. Jachmen'ov V. O., Nikolenko V. V. Rozrahunok temperaturnyh poliv v skladenomu napivneskinchennomu tili z urahuvannjam uzagal'nenogo zakonu Fur'je, *Visnyk NTU «HPI». Serija: Energetychni ta teplotehnichni procesy j ustatkuvannja.* Harkiv, NTU «HPI», 2016, No. 10(1182), pp. 61–65.
3. Mainardi F. The fundamental solutions for the fractional diffusion wave equation [Text], *Appl. Math. Lett*, 1996, No. 9, pp. 23–28.
4. Povstenko Y. Time-fractional heat conduction in an infinite medium with a spherical hole under Robin boundary condition, *Fract. Calc. Appl. Anal*., 2013, No. 16, pp. 356–369.
5. Povstenko Y. Fractional heat conduction in an infinite medium with a spherical inclusion. Entropy, Fract. Calc. Appl. Anal, 2013, No. 15, pp. 4122–4133.
6. Konet I. M., Lenjuk M. P. Giperbolichni krajovi zadachi v neobmezhenyh trysharovyh oblastjah. L'viv, 2011, 48 p. (Prepr./ NAN Ukrai'ny In-t prykladnyh problem mehaniky i matematyky im. Ja. S. Pidstrygacha; 01.11).
7. Gromyk A. P., Konet I. M. Nestacionarni zadachi teploprovidnosti v kuskovo-odnoridnyh prostorovyh seredovyshhah. Kam'janec'-Podil's'kyj, Abetka-Svit, 2009, 120 p.
8. Kuwashimo Kensuke, Tominori Yamada Temperature distribution within a rotatinq cylindrieal body, *Bull. JSME*, 1978, Vol. 21, No. 152, pp. 266–272.
9. Markovych B. M. Rivnjannja matematychnoi' fizyky. L'viv, Vydavnyctvo L'vivs'koi' politehniky, 2010, 384 p.
10. Lopushans'ka G. P., Lopushans'kyj A. O., M'jaus O. M. Peretvorennja Fur'je, Laplasa: uzagal'nennja ta zastosuvannja. L'viv, LNU im. Ivana Franka, 2014, 152 p.
11. Kalinichenko V., Gopkalo N. Vplyv ekspluatacijnyh faktoriv na napruzheno-deformovanyj ta granychnyj stan rolykiv mashyn bezperervnogo lyttja zagotovok, *Visnyk TDTU*, 2010, Tom 15, No. 1, pp. 41–51.

УДК 004.986

Жарикова М. В.

Канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина

МОДЕЛЬ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРА

Актуальность. В статье рассматривается динамическая пространственная модель территориальной системы в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера, предназначенная для решения задач поддержки принятия решений и представляющая собой модель сложной динамической системы. Анализ литературных источников показал, что применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса сложных динамических систем не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности систем поддержки принятия решений. Это обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений, способных обеспечить выполнение предъявляемых к подобным системам требований по быстродействию и эффективности.

Цель. Целью исследования является уменьшение убытков от чрезвычайных ситуаций природного характера за счет повышения качества и своевременности прогнозирования динамики территориальных систем в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера.

Метод. Концепция территориальной системы в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера представлена в виде наложения статических и динамических топологических пространств, порожденных отношением неразличимости, каждое из которых позволяет представлять географическую и атрибутивную информацию о природных условиях, о требующих защиты ценных объектах, а также о динамике чрезвычайных ситуаций природного характера. Модель динамики чрезвычайных ситуаций природного характера построена на основе дискретизации пространства сеткой равновеликих квадратных ячеек и представлена в виде нечеткого динамического топологического пространства во множестве ячеек.

Результаты. На основе разработанной концепции и модели создана географическая веб-ориентированная система поддержки принятия решений. Были проведены эксперименты, которые показали, что предложенная модель чрезвычайных ситуаций природного характера может обеспечить приемлемые характеристики по точности и быстродействию при дискретизации пространства (местности) с размерами ячеек от 8 м до 18 м.

Выводы. Впервые разработана концепция представления территориальных систем в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера в виде наложения статических и динамических топологических пространств. Впервые разработана формальная модель динамики чрезвычайных ситуаций природного характера в виде движения граничной области нечетко-приближенного множества, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенную концепцию и метод, на основе которого решена практическая задача поддержки принятия решений в условиях чрезвычайных ситуаций природного характера.

Ключевые слова: территориальная система, отношение неразличимости, топологическое пространство, класс эквивалентности, геотаксон, чрезвычайная ситуация природного характера.

НОМЕНКЛАТУРА

ЧСПХ – чрезвычайная ситуация природного характера;

ТС – территориальная система;

ГИС – геоинформационная система;

СДС – сложная динамическая система;

ППР – поддержка принятия решений;

СППР – система поддержки принятия решений;

ЛПР – лицо, принимающее решения;

КО – картографический объект;

ОС – окружающая среда;

ГИС – геоинформационная система;

БД – база данных;

X – подпространство двумерного Евклидова пространства;

Ξ – территориальная система;

A – набор атрибутов точки пространства;

P – подмножество атрибутов точки пространства;

$\Re_X^P$ – отношение P-неразличимости по Павлаку во множестве точек пространства X;

$f(x, a)$ – значение атрибута $a \in A$ точки $x \in X$;

$X / \Re_X^P$ – семейство классов эквивалентности, на которые отношение $\Re_X^P$ разбивает множество X;

apr_X^P – пространство аппроксимации;

$Def\left(apr_X^P\right)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации apr_X^P;

T_X^P – топологическое пространство, порожденное отношением P-неразличимости во множестве X;

A_S – набор статических атрибутов;

A_D – набор динамических атрибутов;

A_E – набор параметров окружающей среды;

$T_X^{A_S}$ – топологическое пространство, порожденное отношением A_S-неразличимости во множестве X;

g^{A_S} – геотаксон;

$\Re_X^{A_S}\left(g^{A_S}\right)$ – класс эквивалентности, к которому принадлежит геотаксон g^{A_S};

$G_X^{A_S}$ – множество геотаксонов;

$Def(G_X^{A_S})$ – семейство составных множеств, полученных из множества геотаксонов, включая пустое множество и универсальное множество X;

© Жарикова М. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-4

$T_{G_X}^{A_S}$ – топологическое пространство, компонентами связности которого являются геотаксоны;

$Def(C)$ – семейство составных множеств, полученных их множества ячеек C;

T_C – топологическое пространство, компонентами связности которого являются ячейки;

$W_D = \{w_{D0}, w_{D1}, \ldots, w_{Dn}\}$ – множество динамических «возможных миров ячейки»;

W_S – множество статических «возможных миров» ячейки;

W – множество обобщенных миров ячейки;

$\Re_C^{A_i}$ – отношение A_i-неразличимости во множестве ячеек;

$\Re_C^{A_i}(c)$ – класс эквивалентности во множестве ячеек, порожденный отношением A_i-неразличимости;

$Def\left(apr_C^{A_i}\right)$ – пространство аппроксимации во множестве ячеек;

$apr_C^{A_i} = \left(C, \Re_C^{A_i}\right)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации во множестве ячеек;

$T_C^{A_i}$ – топологическое пространство, порожденное отношением A_i-неразличимости во множестве ячеек;

$G_C^{A_S}$ – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками;

$\left(G_C^{A_S}\right)_i$ – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками, которые принадлежат i-му классу эквивалентности, порожденному отношением A_S-неразличимости во множестве ячеек;

$Def\left(G_C^{A_S}\right)$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества $G_C^{A_S}$;

$T_{G_C}^{A_S}$ – топологическое пространство, построенное с помощью декомпозиции подпространства аппроксимации C пространства X с помощью геотаксонов, аппроксимированных ячейками;

$\Re_C^{w_D}$ – отношение w_D-неразличимости во множестве ячеек;

$C^{w_i}(t)$ – подмножество ячеек, находящихся в момент времени t в мире w_i;

$T_C^{w_D}(t)$, $T_C^{A_S \cup w_D}(t)$ – топологические пространства, порожденные отношениями w_D- и $A_S \cup w_D$-неразличимости во множестве ячеек;

$\tilde{\Re}_C^{w_D}(t)$ – нечеткое отношение w_D-неразличимости во множестве ячеек;

$\tilde{apr}_C(t)$ – нечеткое пространство аппроксимации во множестве ячеек;

$\tilde{C}^{w_i}(t)$ – нечеткое множество ячеек, находящихся в мире w_i в момент времени t.

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивность и частота ЧСПХ значительно повысились на протяжении последних десятилетий в связи с ростом численности населения и промышленного производства, массовой урбанизацией, деградацией природной среды, глобальным потеплением и т. д. В данной статье ЧСПХ рассматривается во взаимосвязи с ТС – целостным территориальным образованием, формирующимся в тесном взаимодействии природных и искусственных объектов. ТС относится к классу ГИС и обладает следующими отличительными особенностями: имеет пространственную привязку; объединяет в себе модель территории, природных и искусственных объектов; имеет послойную структуру.

ЧСПХ представляют собой класс процессов разрушительного характера, обладающих следующими отличительными особенностями: развиваются в пространстве и времени; возникают чаще всего внезапно, в результате чего сложны в предупреждении; протекают в условиях неопределенности; наносят ущерб объектам ТС; развиваются в условиях дефицита времени и ресурсов.

ТС в условиях ЧСПХ представляет собой СДС, включающую множество взаимосвязанных процессов, развивающихся в пространстве и времени, для которых особо актуальными являются задачи ППР. Поскольку одновременно на данную СДС воздействует значительное число факторов и событий, имеющих в том числе стохастическую природу, а развивающиеся при этом процессы, как правило, нелинейны, нестационарны и быстротечны, построение СППР представляет собой сложную и нетривиальную задачу, которая еще больше усложняется неточностью, неполнотой и противоречивостью исходной информации, значительной территориальной распределенностью событий и дефицитом времени. Неотъемлимой частью построения СППР является моделирование динамики ЧСПХ и ее воздействия на объекты, требующие защиты.

Несмотря на активные исследования, применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса СДС не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности СППР, основанных на ГИС. Это обуславливает актуальность дальнейшего поиска нетрадиционных моделей и методов поддержки принятия решений, основанных на использовании геоинформационных систем реального времени и способных обеспечить выполнение предъявляемых к СППР требований по быстродействию и эффективности.

Таким образом, объектом исследования являются ТС в условиях ЧСПХ, предметом исследования являются модель динамики ТС в условиях ЧСПХ.

В связи с этим целью исследования является уменьшение убытков от ЧСПХ за счет повышения качества и своевременности прогнозирования динамики ТС в условиях ЧСПХ, что позволит более обоснованно принимать решения по локализации и противодействию ЧСПХ. Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

– построить статическую модель ТС в виде топологического пространства, порожденного отношением неразличимости;

– разработать динамическую модель ТС в условиях в виде нечеткого динамического топологического пространства, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проведенные в данной работе исследования имели целью построить приближенную пространственную модель территориальной системы в условиях ЧСПХ, пригодную для решения задач поддержки принятия решений по противодействию ЧСПХ с использованием методов теории топологии, а также нечетких множеств.

В качестве исходных данных рассматривается участок местности, подверженный воздействию ЧСПХ. Участок местности состоит из однородных статических природных и искусственных объектов (участки леса, водоисточники, пески и т.д.) – геотаксонов. Модель местности во взаимосвязи с природными и искусственными объектами называется ТС.

Для моделирования динамики геотаксонов в условиях ЧСПХ ТС дискретизируется на равновеликие квадратные ячейки, каждая из которых считается однородной. Динамика ТС в условиях ЧСПХ представлена в виде смен состояний ячеек, которые моделируются с помощью заранее заданной модели.

Вычислительный эксперимент, описанный в данной статье, был проведен на примере Цюрупинского лесничества Херсонской области, Украина. В качестве ЧСПХ был рассмотрен лесной пожар, динамика которого была смоделирована с помощью модели Жариковой [1]. Критерием оценки качества результата является быстродействие расчетов.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время большое внимание уделяется моделированию ЧСПХ. В работах [2–4] эта задача решается с применением методов статистического анализа для ретроспективных баз данных. Однако, неполная наблюдаемость событий, связанных с возникновением ЧСПХ, и недостаточная точность измерения параметров внешней среды препятствуют получению достоверных прогнозов, что снижает ценность самостоятельного применения статистических подходов. В работах [5, 6] используются детальные математические модели физико-химических процессов, проистекающих при ЧСПХ при определенном состоянии внешней среды на однородных участках местности, что позволяют достаточно точно определять границы контура ЧСПХ в заданные моменты времени. Недостатком использования таких моделей является их высокая вычислительная сложность. В [7] модель ЧСПХ в значительной мере упрощается, что позволяет ускорить вычисления, но снижает их точность, вследствие чего снижается и убедительность оценки ситуации [8, 9].

Существующие пространственные модели динамики ЧСПХ подразделяются на 2 категории: векторные и растровые. В векторных моделях [11] контур ЧСПХ представлен замкнутой ломаной линией, заданной множеством точек-узлов, каждый из которых представлен локальным источником. Множество локальных очагов, сформированных от локальных источников, в каждый момент времени формируют новый контур ЧСПХ. К таким моделям относится модель распространения лесного пожара Финни [12]. Основной недостаток векторного подхода состоит в необходимости проведения сложных вычислений для генерации выпуклого контура ЧСПХ в каждый момент времени. При растровом подходе территория дискретизируется с помощью сетки из ячеек, а динамика ЧСПХ представляется в виде смены состояний ячеек (клеточный автомат). Этот подход является более эффективным с точки зрения вычислительной сложности [13], однако менее точным. Существуют также подходы, комбинирующие растровый и векторный. К таким подходам относится, например, усовершенствованный растровый подход к моделированию динамики лесного пожара Труфино, согласно которому строятся локальные контуры распространения пожаров в виде эллипсов, которые распространяются по ячейкам. При этом повышается точность, но появляются дополнительные вычислительные сложности по сравнению с растровым подходом [14].

По результатам анализа литературных источников можно сделать вывод о том, что требуемое для ЛПР быстродействие СППР может быть достигнуто с помощью построения адекватной пространственной модели территории в условиях ЧСПХ. Поскольку ЧСПХ обладают свойством неполной наблюдаемости, а неполнота и неточность измерения различных характеристик событий позволяют существенно смягчить требования по точности представления исходной информации, можно сделать вывод, что требуемое быстродействие СППР может быть достигнуто с помощью некоторого огрубления (размывания) пространственной модели, что позволит значительно снизить требования к модели ЧСПХ по точности.

Таким образом, несмотря на активные исследования, применение устоявшихся подходов для рассматриваемого класса процессов, к которому принадлежат ЧСПХ, не обеспечивает требуемого быстродействия и приемлемой эффективности СППР. Это обуславливает актуальность данных исследований.

Для формирования ТС в условиях ЧСПХ, представляющей пространственную модель в СППР, будем использовать топологические пространства, а для ее размывания могут быть использованы методы теорий нечетких множеств [8, 9].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Модель местности, или территории, в пределах которой развивается ЧСПХ, представляет собой ТС Ξ. Модель ТС представлена в виде подпространства X двумерного Евклидова пространства с заданной на нем нормой, метрикой и наложенной сеткой из равновеликих квадратных ячеек C [9, 15, 16].

Построим статическую модель ТС, не подверженную ЧСПХ, в совокупности с природными объектами и окружающей средой. Пусть каждая точка пространства X обладает набором атрибутов A. Для любого непустого подмножества атрибутов $P \in A$ определим отношение эквивалентности во множестве X (рефлексивное, симметричное, транзитивное отношение):

$$\Re_X^P = \{(x, y) \in X \times X \mid \forall a \in P, f(x, a) = f(y, a)\}, \quad (1)$$

которое называется отношением *P*-неразличимости по Павлаку [17]. Если $(x, y) \in \Re_X^P$, то говорят, что точки *x* и *y* *P*-неразличимы (относительно атрибутов из множества *P*). Отношение $\Re_X^P$ разбивает множество *X* на семейство классов эквивалентности $X / \Re_X^P$. Получаем пространство аппроксимации:

$$apr_X^P = \left(X, \Re_X^P\right). \quad (2)$$

Пусть $Def\left(apr_X^P\right)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации (2), включая пустое множество $\varnothing$ и универсальное множество *X*. Получаем топологическое пространство, порожденное отношением *P*-неразличимости на подпространстве двумерного Евклидова пространства *X*:

$$T_X^P = \left(X, Def\left(apr_X^P\right)\right). \quad (3)$$

Класс эквивалентности $\Re_X^P(x) \in X / \Re_X^P$ в общем случае является несвязным подпространством пространства *X*, состоящим из непустых открытых непересекающихся множеств. На рис. 1 отображен пример топологического пространства, порожденного отношением *P*-неразличимости, разбивающего пространство *X* на 5 непересекающихся классов эквивалентности, каждый из которых является несвязным.

Совокупность всех открытых подмножеств, принадлежащих семейству составных множеств $Def\left(apr_X^P\right)$, является открытым покрытием топологического пространства, так как объединение этих множеств составляет множество *X*: $\bigcup_{X_i \in Def(apr_X^P)} X_i = X$. Множество классов эквивалентности $X / \Re_X^P \subset Def\left(apr_X^P\right)$ является подпокрытием топологического пространства, так как объединение этих множеств также является множеством *X* [17]:

$$\bigcup_{X_i \in X / \Re_X^P} X_i = X.$$

Пусть множество атрибутов *A* любой точки подразделяется на два подмножества: статических атрибутов A_S (не изменяющихся во времени) и динамических атрибутов A_D (изменяющихся во времени), $A = A_S \cup A_D$. К статическим атрибутам относятся атрибуты, описывающие местность, такие, как тип растительности, ее геометрические параметры, возраст и т.д. Динамические атрибуты описывают динамику КО в условиях развивающейся ЧСПХ. В отдельное множество выделим совокупность параметров ОС A_E, таких как скорость и направление ветра, влажность воздуха, температура воздуха, значения которых не привязаны к определенным КО.

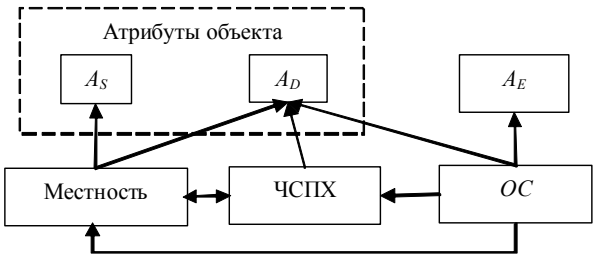


Рисунок 2 – Виды атрибутов

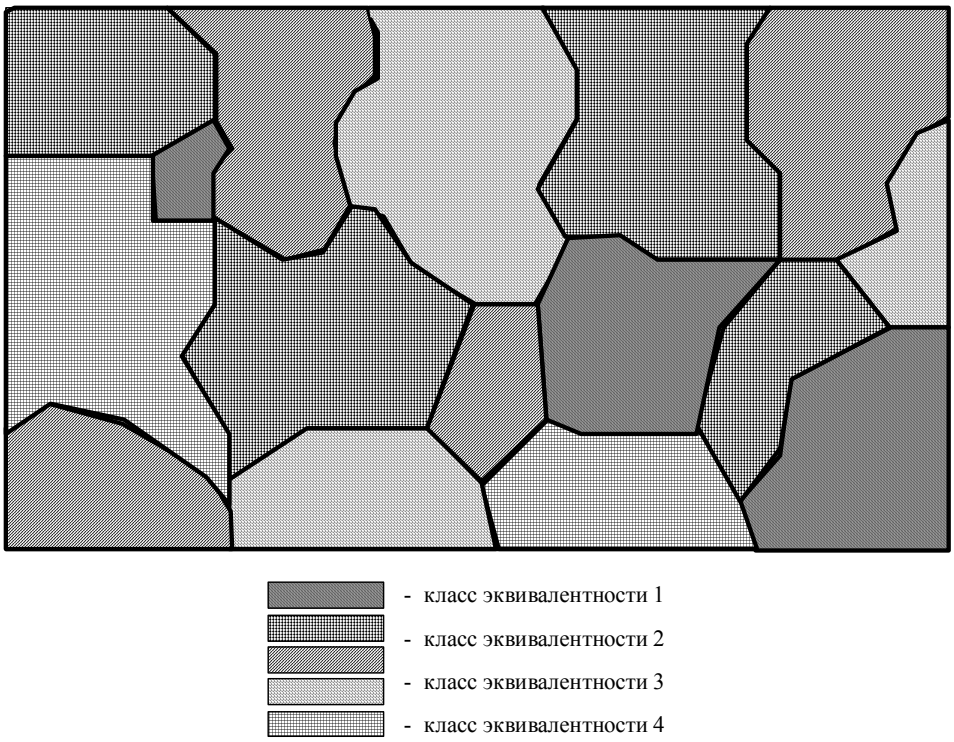


Рисунок 1 – Топологическое пространство, порожденное классами эквивалентности

Если $P \subseteq A_S$, то классы эквивалентности семейства $X/\Re_X^P$, порожденные отношением *P*-неразличимости, представляют собой статические множества, не изменяющиеся во времени, и соответственно топологическое пространство (3) является статическим. Если $P \cap A_D \neq \emptyset$, то классы эквивалентности семейства $X/\Re_X^P$ представляют собой динамические множества, и соответственно топологическое пространство (3) является динамическим.

Для рассмотрения ТС, не подверженной влиянию ЧСПХ, остановимся на подмножестве статических атрибутов $P = A_S$. Основным структурным элементом ТС Ξ, а также и основным звеном в задаче пространственной привязки, представления и анализа информации о подверженности территориальной системы ЧСПХ, является статический КО, являющийся компонентой связности топологического пространства $T_X^{A_S}$, построенного с помощью отношения A_S-неразличимости на основе подмножества статических атрибутов A_S, обладающий следующими свойствами:

1) привязки к координатам пространства *X*;

2) наглядности (данные КО представляют собой участки местности, с которыми ЛПР привык иметь дело);

3) однородности (все точки данного КО являются A_S-неразличимыми);

4) связности (каждый такой КО является компонентой связности топологического пространства $T_X^{A_S}$);

5) статичности (данный КО построен с помощью отношения A_S-неразличимости на основе подмножества статических атрибутов);

6) множество таких КО является подпокрытием топологического пространства $T_X^{A_S}$;

7) сравнимости (описания таких КО должны позволять их адекватно сравнивать).

В качестве такого КО будем использовать понятие геотаксона g^{A_S} – статического КО, являющегося связным подмножеством определенного класса эквивалентности, $x \in g^{A_S} \to g^{A_S} \subseteq \Re_X^{A_S}(x) \in X/\Re_X^{A_S}$. Класс эквивалентности, к которому принадлежит геотаксон g^{A_S}, обозначим $\Re_X^{A_S}\left(g^{A_S}\right)$. Геотаксоны, принадлежащие одному классу эквивалентности, являются A_S-неразличимыми. Декомпозиция пространства *X* на геотаксоны формирует статическое топологическое пространство $T_{G_X}^{A_S}$ [18–20]:

$$T_{G_X}^{A_S} = (X, Def(G_X^{A_S})), \tag{4}$$

наложенное на топологическое пространство $T_X^{A_S}$, где $G_X^{A_S}$ – множество геотаксонов, $Def(G_X^{A_S})$ – семейство составных множеств, полученных из множества геотаксонов, включая пустое множество и универсальное множество *X*.

Следует заметить, что в большинстве современных ГИС статистика ведется с привязкой к пронумерованным участкам местности, свойства которых вполне соответствуют определению геотаксона. Это позволяет рассматривать геотаксоны в ГИС как однородные пронумерованные участки местности и использовать их для моделирования статики ТС.

Для моделирования динамики ТС в условиях ЧСПХ ТС дискретизируется на более мелкие КО с помощью сетки равновеликих координатно-ориентированных элементов (ячеек) квадратной формы *C*, что позволяет осуществить переход от непрерывной формы представления геоинформации внутри геотаксона к дискретной – в масштабе отдельных ячеек, каждая из которых считается однородной с точки зрения всех атрибутов из множества *A*. Декомпозиция подпространства X Евклидова пространства с помощью ячеек является топологическим пространством:

$$T_C = (X, Def(C)), \tag{5}$$

наложенным на топологическое пространство геотаксонов $T_{G_X}^{A_S}$. Ячейки являются попарно-непересекающимися *A*-неразличимыми множествами, а их дизъюнктное объединение совпадает с множеством *X*.

Моделирование динамики ЧСПХ на сетке из ячеек заключается в моделировании смен состояния ячеек. Будем считать, что при изменении своего состояния в условиях ЧСПХ ячейка проходит через последовательность качественно различных категорий состояний – «возможных миров» W_D. Например, в простейшем случае в качестве последовательности возможных миров можно выделить следующие:

1) состояние покоя (состояние ячейки, еще не охваченной ЧСПХ) – w_{D0};

2) активное состояние (состояние ячейки, охваченной ЧСПХ, значения динамических параметров изменяются во времени) – w_{D1};

3) поврежденное (измененное) состояние покоя (состояние ячейки, подвергшейся влиянию ЧСПХ) – w_{D2}.

В общем случае возможных миров можно выделить неограниченное количество. Пусть множество возможных миров представляет собой множество $W_D = \{w_{D0}, w_{D1}, \ldots, w_{Dn}\}$, где *n* – количество возможных миров. Выделим особый мир w_{D0} из множества возможных, который предполагает, что ячейка находится в состоянии покоя, то есть еще не охвачена ЧСПХ.

Поскольку каждая ячейка принадлежит определенному геотаксону, который, в свою очередь, принадлежит определенному классу эквивалентности, порожденному отношением A_S-неразличимости, будем считать эти классы эквивалентности статическими возможными мирами, множество которых обозначим W_S. Исходя из вышесказанного, можно определить обобщенный возможный мир каждой ячейки, состоящий из двух миров: статического и динамического. Обозначим множество обобщенных миров *W*.

$$W = W_S \times W_D.$$

По аналогии с отношением неразличимости во множестве точек пространства *X*, во множестве ячеек также

можно построить отношения A_i-неразличимости для любого подмножества атрибутов $A_i \subseteq A$.

Определим отношение A_i-неразличимости во множестве ячеек C:

$$(\forall A_i \subseteq A)\Re_C^{A_i} = \{(c_m, c_n) \in C \times C | \forall a \in A_i, f(c_m, a) = f(c_n, a)\}.$$

Обозначим $\Re_C^{A_i}(c)$ класс эквивалентности во множестве ячеек, порожденный отношением A_i-неразличимости, которому принадлежит ячейка c. Все ячейки, принадлежащие одному классу эквивалентности из множества классов эквивалентности, порожденных отношением A_i-неразличимости, имеют одинаковые значения атрибутов из подмножества $A_i \subseteq A$:

$$(\forall A_i \subseteq A)(\forall a \in A_i)(\forall c_m, c_n \in C)\left[\left(\Re_C^{A_i}(c_m) = \right.\right.$$
$$\left.\left. = \Re_C^{A_i}(c_n)\right) \Leftrightarrow f(c_m, a) = f(c_n, a)\right].$$

Отношение A_i-неразличимости порождает топологическое пространство:

$$T_C^{A_i} = \left(C, Def\left(apr_C^{A_i}\right)\right), \quad (6)$$

где $Def\left(apr_C^{A_i}\right)$ – пространство аппроксимации во множестве ячеек; $apr_C^{A_i} = \left(C, \Re_C^{A_i}\right)$ – семейство всех составных множеств пространства аппроксимации во множестве ячеек, включая пустое множество $\varnothing$.

Особый интерес представляют отношения A_S-неразличимости, w_D-неразличимости и $(A_S \cup w_D)$-неразличимости во множестве ячеек. Отношение A_S-неразличимости во множестве ячеек $c \in C$ порождает статические классы эквивалентности, компонентами связности которого являются множества ячеек, аппроксимирующих геотаксоны. Пусть $G_C^{A_S}$ – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками, $\left(G_C^{A_S}\right)_i$ – множество геотаксонов, аппроксимированных ячейками, которые принадлежат i-му классу эквивалентности, порожденному отношением A_S-неразличимости во множестве ячеек. Пусть $Def\left(G_C^{A_S}\right)$ – семейство всех составных множеств, полученных из множества геотаксонов $G_C^{A_S}$, аппроксимированных ячейками, включая пустое множество $\varnothing$.

Определение. Декомпозиция подпространства аппроксимации C пространства X с помощью геотаксонов, аппроксимированных ячейками, является топологическим пространством

$$T_{G_C}^{A_S} = (C, Def(G_C^{A_S})), \quad (7)$$

наложенным на топологическое пространство $T_C^{A_S}$.

Отношение w_D-неразличимости во множестве ячеек порождает динамические классы эквивалентности. На их основе строится динамическое топологическое пространство $T_C^{w_D}$, динамика которого определяется поведением ЧСПХ.

Отношение $(A_S \cup w_D)$-неразличимости также порождает динамические классы эквивалентности. На их основе формируется топологическое пространство, которое формируется в результате наложения двух топологических пространств: $T_C^{A_S}$ и $T_C^{w_D}$. Таким, образом, для любой ячейки c, находящейся в условиях ЧСПХ, то есть обладающей динамическими параметрами из подмножества A_D, верно равенство:

$$(\forall c \in C)\Re_C^{A_S \cup w_D}(c) = \Re_C^{A_S}(c) \cap \Re_C^{w_D}(c).$$

В табл. 1 отображены свойства рассмотренных топологических пространств.

Классы эквивалентности $C^{w_i}(t)$, $i = 0, \ldots, n-1$, порожденные отношением $\Re_C^{w_D}$, представляют собой модель динамики экосистемы в условиях ЧСПХ в виде динамического топологического пространства $T_C^{w_D}(t)$. Наложение топологических пространств, моделирующих динамику ЧСПХ и множество геотаксонов, образует динамическое топологическое пространство $T_C^{A_S \cup w_D}(t)$, компонентами связности которого являются подмножества $A_S \cup w_D$-неразличимых ячеек (рис. 3).

Для того, чтобы данная модель была более приближена к реальности, предложено вместо строгого отношения эквивалентности $\Re_C^{w_D}(t)$ использовать его нечеткое обобщение $\tilde{\Re}_C^{w_D}(t)$, которое в каждый момент времени t порождает нечеткое пространство аппроксимации $\tilde{apr}_C(t) = \left(C, \tilde{\Re}_C^{w_D}(t)\right)$ и нечеткую топологию, то есть раз-

Таблица 1 – Топологические пространства

Топологическое пространство	Основа формирования	Свойства
Геотаксоны	Отношение A_S-неразличимости	Статическое (в смысле неизменных значений атрибутов), статическое (в смысле неподвижное в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов A_S
Ячейки	Дискретизация пространства	Динамическое (в смысле изменяющихся во времени значений атрибутов), статическое (в смысле неподвижности в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов $A_S \cup w_D$
ЧСПХ	Отношение w_D-неразличимости	Динамическое (в смысле изменяющихся во времени значений атрибутов), динамическое (в смысле изменяющееся в пространстве), элементы каждого класса эквивалентности однородны в смысле множества атрибутов w_D

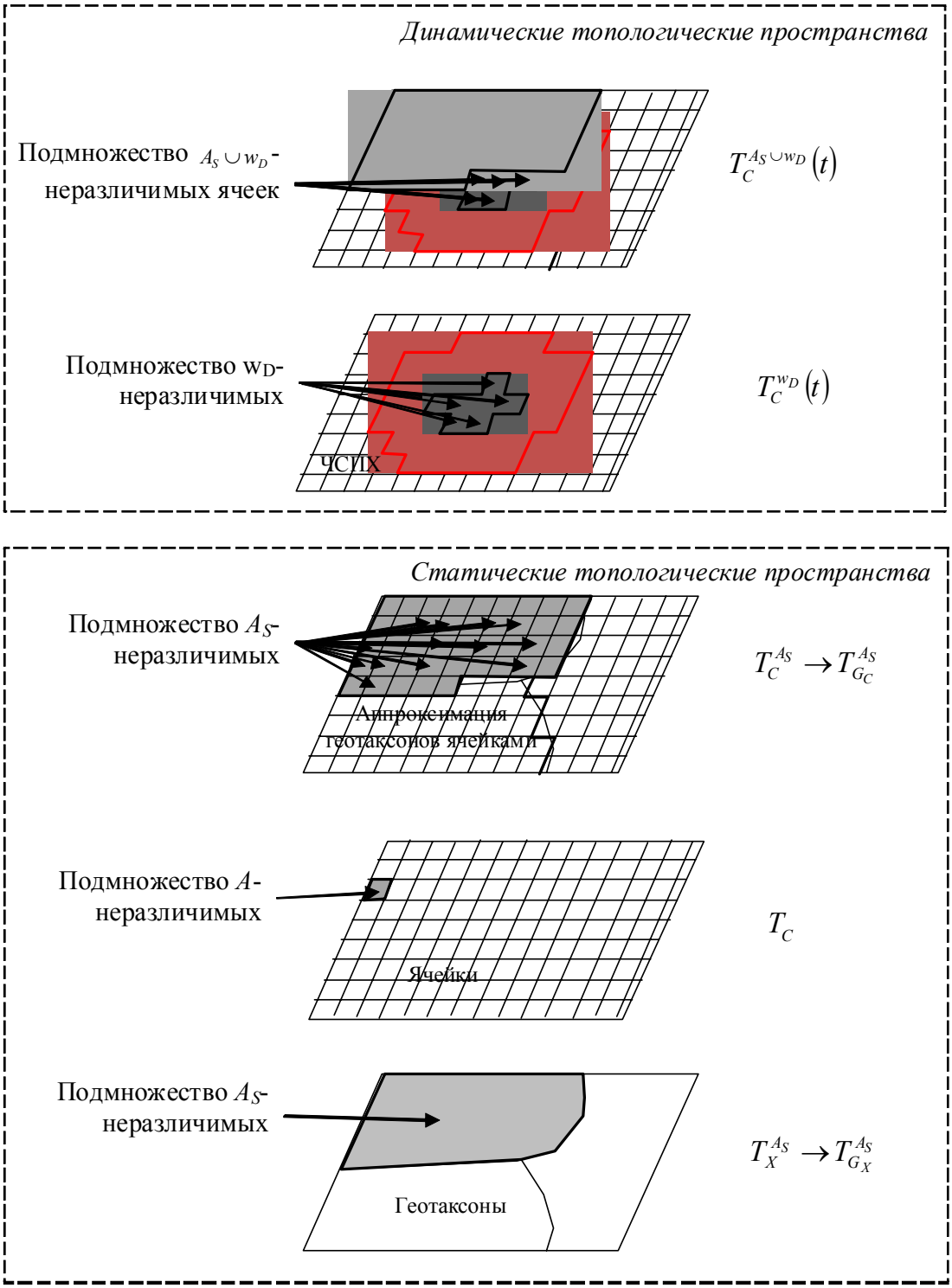


Рисунок 3 – Наложение топологических пространств

биение множества ячеек C в каждый момент времени t на нечеткие множества ячеек $\widetilde{C}^{w_i}(t)$, $i = 0, \ldots, n-1$, находящихся в каждом из возможных динамических миров из множества W_D.

Динамическое топологическое пространство, порожденное нечетким отношением $\widetilde{\Re}_C^{w_D}(t)$, является моделью ТС в условиях ЧСПХ.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Представленная в данной работе модель ТС в условиях ЧСПХ была реализована на языке программирования Python с помощью фреймворка Django и его расширения GeoDjango в виде географической веб-ориентированной СППР Disaster Risk Management. При создании проекта были использованы библиотека OpenLayers для создания карт, а также система управления базами данных PostgreSQL.

Разработанная модель ТС была использована для формирования электронной карты Цюрупинского лесного хозяйства Херсонской области, сформированной путем наложения топологических пространств геотаксонов и ячеек. Топологическое пространство геотаксонов было сформировано на основе выделов лесного хозяйства (однородные участки местности). БД, описывающая геотаксоны, реализована с помощью СУБД PostgreSQL и содержит пространственные атрибуты, описывающие форму (в виде полигона) и местоположение геотаксона, а также набор привязанных к геотаксону статических атрибутов A_S, содержащий такие атрибуты, как тип участка (участок леса, пески, водоисточник, биополяна,…), рельеф. Участок леса дополнительно содержит такие атрибуты, как тип леса, высота деревьев, возраст, класс бонитета, степень сомкнутости, ширина между рядами деревьев, расстояние между деревьями в ряду. Динамика ЧСПХ была описана с помощью модели распространения пожара Жариковой [1]. Для моделирования динамики ячейки был выделен набор возможных миров W_D: пассивное состояние, нагрев до состояния горения, горение, состояние после горения. Были также выделены параметры окружающей среды A_E: скорость и направление ветра, влажность воздуха, температура воздуха, температура точки росы. На основании выделенных параметров с помощью модели [1] было построено динамическое топологическое пространство ячеек, находящихся в различных возможных мирах, которое является моделью ЧСПХ.

С помощью созданного программного обеспечения были произведены эксперименты для оценки быстродействия СППР и погрешности аппроксимации контура ЧСПХ по сравнению с существующими векторной моделью Финни и векторно-растровой моделью Труфино. В ходе эксперимента также исследовалось влияние размера ячейки на время расчета области, занятой пожаром. Для проведения расчетов было выбрано Цюрупинское лесное хозяйство Херсонской области.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 представлена карта Цюрупинского лесничества Херсонской области, реализованная в СППР Disaster Risk Management в виде совокупности геотаксонов и дискретизированная координатной сеткой с переменным размером ячейки (δ). Каждый геотаксон представлен однородным участком местности с привязанной к нему информацией из базы данных.

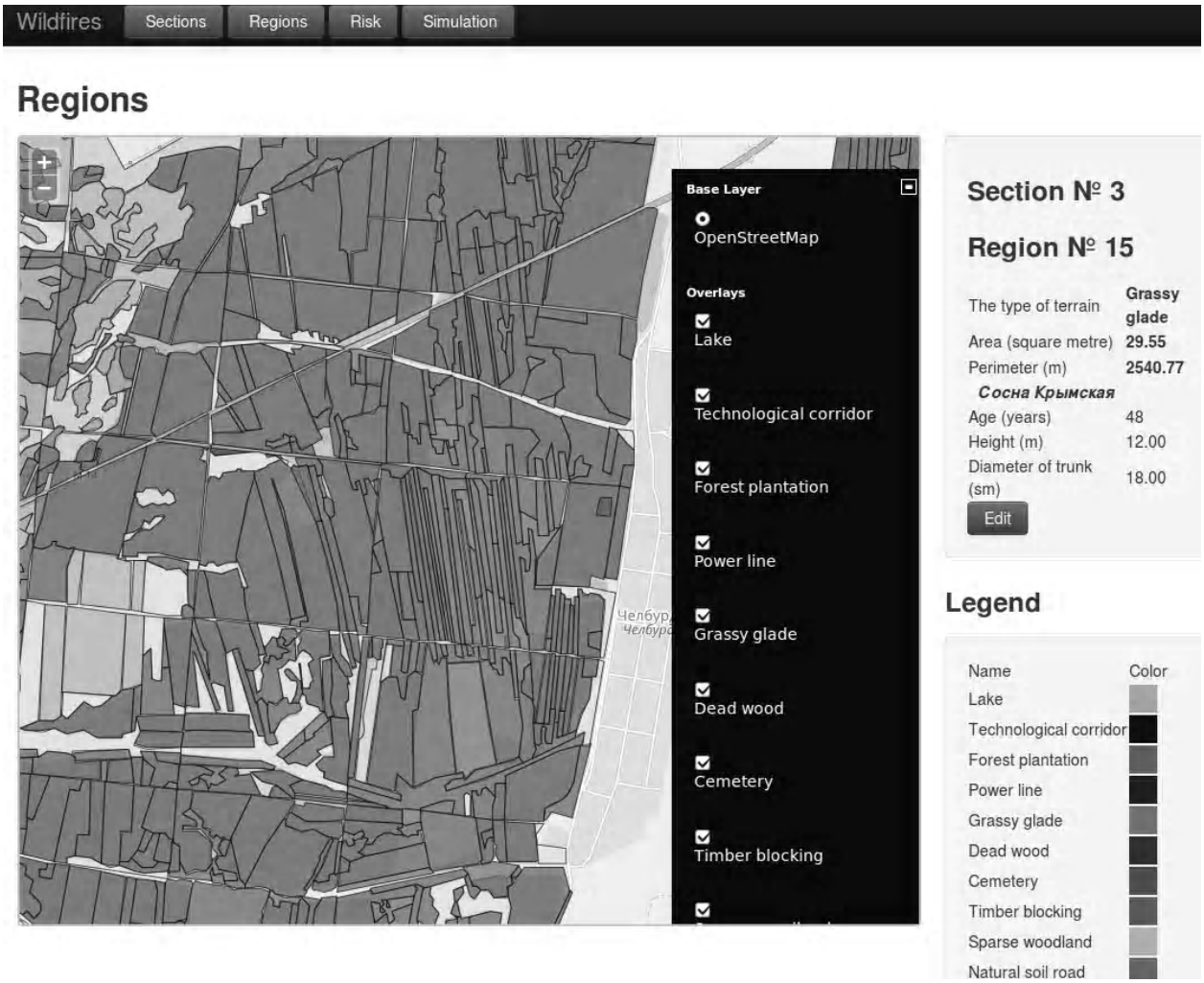


Рисунок 4 – Представление совокупности геотаксонов Цюрупинского лесничества в программе Disaster Risk Management

Для оценки быстродействия были выполнены эксперименты с использованием модели распространения пожара [1]. В ходе эксперимента исследовалось влияние размера ячейки δ на время, необходимое для моделирования распространения пожара площадью 40000 м^2 и на точность аппроксимации контура пожара. Эксперименты осуществлялись при различной величине ячейки, но при одинаковы параметрах ОС. В качестве источника пожара принималась ячейка, расположенная внутри геотаксона, соответствующего 15-му выделу 3-го квартала лесничества. Результаты эксперимента представлены в табл. 2. Параллельно были проведены такие же эксперименты с использованием векторно-растровой модели Труфино и векторной модели Финни.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента позволили сделать следующие выводы. Среди трех сравниваемых моделей самой эффективной с точки зрения вычислительной сложности оказалась предложенная автором, самой неэффективной – векторная модель Финни. В то же время модель Финни оказалась самой точной. На втором месте по точности находится модель Труфино. Учитывая то, что задача заключается в ППР в условиях ЧСПХ, быстродействие является более важным фактором, чем точность. Следовательно, можно сделать вывод, что предложенная модель подходит для решения поставленной задачи.

Анализ быстродействия и точности предложенного метода в зависимости от величины ячейки позволил сделать следующие выводы. Дискретизация пространства рассмотрения координатной сеткой ячеек с размером меньше 8 м приводит к резкому увеличению времени вычисления, а при размере ячеек от 18 до 22 м точность аппроксимации является недостаточной. Таким образом, предложенная модель ЧСПХ может обеспечить приемлемые характеристики по точности и быстродействию при дискретизации пространства (местности) с размерами ячеек от 8 м до 18 м.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработана модель территориальной системы в условиях ЧСПХ в виде динамического нечеткого топологического пространства, основанного на разбиении пространства на конечное множество непересекающихся однородных участков – геотаксонов, и последующей их дискретизации координатной сеткой равновеликих ячеек. Динамика распространения чрезвычайной ситуации отражается в виде динамического нечеткого топологического пространства во множестве ячеек.

Научная новизна исследований заключается в следующем:

1) впервые разработана концепция представления ТС в условиях ЧСПХ в виде наложения статических и динамических топологических пространств, порожденных отношением неразличимости, каждое из которых позволяет представлять географическую и атрибутивную информацию о природных условиях, о ценных объектах, требующих защиты от ЧСПХ, а также о динамике ЧСПХ.

2) впервые разработана формальная модель динамики ЧСПХ в виде нечеткого динамического топологического пространства, в которой, в отличие от существующих моделей, динамика ЧСПХ представлена в виде движения граничной области нечетко-приближенного множества, что позволило снизить вычислительную сложность и обеспечить приспособление к условиям неполной и неточной информации.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод, на основе которого решена практическая задача поддержки принятия решений в условиях ЧСПХ для использования в СППР по противодействию ЧСПХ, основанных на геоинформационных системах.

Перспективы дальнейших исследований состоят в том, чтобы на основе предложенной модели построить модель оценки риска для ценных объектов, находящихся под воздействием ЧСПХ.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование проводится в рамках госбюджетной научно-исследовательской работы Херсонского национального технического университета №0113U007939 «Разработка теоретических и методологических основ формирования системы управления лесными ресурсами региона».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Граб М. В. Модели, методы и алгоритмы распространения лесных пожаров: дисс. … канд. техн. наук: 01.05.02 / Граб Марина Витальевна. – Харьков : ХНУРЭ, 2004. – 230 с.
2. Martinez J. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain / J. Martinez, C. Vega-Garcia, E. Chuvieco // Journal of Environmental Management. – 2009. – № 90. – P. 1241–1252.

Таблица 2 – Результаты эксперимента

№ п/п	Размер ячейки δ, м	Предложенная модель		Модель Труфино		Модель Финни	
		Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %	Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %	Время вычислений, мин	Погрешность аппроксимации, %
1	22	1	45,5	2,1	31,3	21,5	5,9
2	20	1,1	34	2,3	28,9		
3	18	1,2	25	2,5	21,9		
4	16	1,6	20,5	7,8	18,7		
5	14	1,9	15	7,8	12,4		
6	12	1,9	13,5	8,1	11,2		
7	10	3,1	11	8,2	8,9		
8	8	3,9	9,5	9,1	6,5		
9	6	6,2	8	13,1	5,9		
10	4	11	7,5	16,7	5,8		

3. Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment / [D. Atkinson, M. Chladil, V. Janssen et al]. // International Journal of Wildland Fire. – 2010. – № 19. – P. 649–658.
4. Chuvieco E. Development of a framework for fire risk assessment usong remote sensing and geographic information system technologies / E. Chuvieco et al. // Ecological Modelling. – 2010. – № 221. – P. 46–58.
5. Preisler H. K. Probability based models for estimating wildfire risk / H. K. Preisler, D. R. Brillinger, R. E. Burgan et al. // International Journal of Wildland Fire. – 2004. – № 13. – P. 133–142.
6. Spatiotemporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida / [M.G. Genton, D. T. Butry, M. L. Prestemon et al.] // International Journal of Wildland Fire. – 2006. – № 15. – P. 87–97.
7. Baranovskiy N. A web-oriented geoinformation system for forest fire danger prediction in typical forests of the Ukraine / N. Baranovskiy, M. Zharikova // Thematic cartography for the society. – Springer, 2014. – P. 13–22. – (Lecture notes in geoinformation and cartography).
8. Zharikova M. Threat assessment method for intelligent disaster decision support system / M. Zharikova, V. Sherstjuk // Advances in Int. Systems and Computing. – Springer, 2016. – Vol. 512. – P. 81–99.
9. Жарикова М. В. Разработка модели чрезвычайной ситуации природного характера в системе поддержки принятия решений / М. В. Жарикова, В. Г. Шерстюк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – 1/4(73). – P. 62–74.
10. An improved cellular automata for wildfire spread / T. Ghisy, B. Arca, G. Pellizaro et al. // Procedia Computer Science: ICCS 2015 International Conference On Computational Science, Reykjavik, Iceland, 1–3 June 2015: proceedings. – Elsevier: Volume 51, 2015. – P. 2287–2296.
11. Modeling the spread of grass fires / [D. H. Anderson, E. Catchpole, De Meste N. J. et al.] // The J. Of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics. – 1982. – № 23(4). – P. 451–466.
12. Fire area simulator-model development and evaluation: technical report: RMRS-RP-4 / M. A. Finney / USDA, UT. – Ogden, 2004. – 50 p.
13. A level-set algorithm for simulating wildfire spread / [T. Ghisu, B. Arca, G. Pellizzaro et al.]// CMES Computer Modeling in Engineering & Sciences. – 2014. – № 102(1). – P. 83–102.
14. A new algorithm for simulating wildfire through cellular automata / [G. A. Trufino, D. D.' Ambrosio, R. Rongo et al.] // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation. – 2011. – № 22(1). – P. 1–26.
15. Zharikova M. The plausible wildfire model in geoinformation decision support system for wildfire response / M. Zharikova, V. Sherstjik, N. Baranovskiy // Water resources, Forest, marine and ocean ecosystems: 15th international conference SGEM, 18–24 June 2015: proceedings. – Albena, Bulgaria: DOI: 10.5593/sgem2015B32, 2015. – P. 575–583.
16. Zharikova M. Development of the model of natural emergencies in decision support system / M. Zharikova, V. Sherstjik // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. – 2015. – Vol 1, № 4(73). – P. 62–69.
17. Slowinski R. Rough set and rule-based multicriteria decision aiding / R. Slowinski, G. Salvatore, M. Benedetto // Pesquisa operacional. – 2012. – Vol. 32(2). – P. 213–269.
18. Pawlak Z. Rough Sets / Z. Pawlak, W. Jerzy, R. Slowinski et al. / / Comm. of ACM. – 1995. – Vol.38, № 11. – P. 88–95.
19. Pawlak Z. Vagueness – a Rough Set View / Z. Pawlak // Structures in Logic and Computer Science. – 1997. – P. 106–117.
20. Abd El-Monsef M. E. On relationships between revised rough fuzzy approximation operators and fuzzy topological spaces / M. E. Abd El-Monsef, M. A. El-Cayar, R.M. Aqeel // International Journal of Granular Computing, Rough Sets and Intelligent Systems. – 2014. – Volume 3, № 4. – P. 257–269.

Статья поступила в редакцию 30.11.2016.
После доработки 25.12.2016.

Жарікова М. В.
Канд. техн. наук, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна

МОДЕЛЬ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ СИСТЕМИ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИРОДНОГО ХАРАКТЕРУ

Актуальність. У статті розглядається динамічна просторова модель територіальної системи в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру, що призначена для вирішення задач підтримки прийняття рішень і представляє собою модель складної динамічної системи. Аналіз літературних джерел показав, що застосування усталених підходів для розглянутого класу складних динамічних систем не забезпечує необхідної швидкодії та необхідної ефективності систем підтримки прийняття рішень. Це обумовлює актуальність подальшого пошуку нетрадиційних моделей і методів підтримки прийняття рішень, здатних забезпечити виконання пропонованих до подібних систем вимог щодо швидкодії та ефективності.

Мета. Метою дослідження є зменшення збитків від надзвичайних ситуацій природного характеру за рахунок підвищення якості та своєчасності прогнозування динаміки територіальних систем в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Метод. Концепція територіальної системи в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру представлена у вигляді накладення статичних і динамічних топологічних просторів, породжених відношенням нерозрізненості, кожний з яких дозволяє представляти географічну і атрибутивну інформацію про природні умови, про цінні об'єкти, які потребують захисту, а також про динаміку надзвичайних ситуацій природного характеру. Модель динаміки надзвичайних ситуацій природного характеру побудована на основі дискретизації простору сіткою рівновеликих квадратних комірок і представлена у вигляді нечіткого динамічного топологічного простору в множині комірок.

Результати. На основі розробленої концепції і моделі створена географічна веб-орієнтована система підтримки прийняття рішень. Були проведені експерименти, які показали, що запропонована модель надзвичайних ситуацій природного характеру може забезпечити необхідні характеристики щодо точності і швидкодії за умови дискретизації простору (місцевості) з розмірами комірок від 8 м до 18 м.

Висновки. Вперше розроблена концепція представлення територіальних систем в умовах надзвичай-чайних ситуацій природного характеру у вигляді накладення статичних і динамічних топологічних просторів. Вперше розроблена формальна модель динаміки надзвичайних ситуацій природного характеру у вигляді руху граничної області нечітко-наближеної множини, що дозволило знизити обчислювальну складність і забезпечити пристосування до умов неповної та неточної інформації. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновану концепцію і метод, на основі якого вирішена практична задача підтримки прийняття рішень в умовах надзвичайних ситуацій природного характеру.

Ключові слова: територіальна система, відношення нерозрізненості, топологічний простір, клас еквівалентності, геотаксон, надзвичайна ситуація природного характеру.

Zharikova M.
Ph.D., Associate Professor of Information Technologies Department, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine

THE MODEL OF TERITORIAL SYSTEM IN NATURAL DISASTER CONDITIONS

Context. The spatial model of territorial system in natural emergency conditions dedicated to decision support tasks solving and represented as the model of complex dynamic system is described in the paper. The literature data analysis has shown that applying the established approaches to the class of complex dynamic systems under consideration doesn't provide the required calculation speed and efficiency of decision support system. This determines the timeliness of the further searching of nontraditional models and methods of decision support, which provide the fulfillment of calculation speed and efficiency requirements applicable to such systems.

Objective. The goal of research is decreasing the damage from the natural emergency by means of improving the quality and timeless of forecasting the territorial system dynamics in the natural emergency conditions

Method. The concept of territorial system in natural emergency conditions is represented in the form of overlaying static and dynamic topological spaces induced by indiscernibility relation, each of which allows representing geographical and attributive information about nature conditions, value objects demanding protection against natural emergency, as well as about natural emergency dynamics. The model of natural emergency dynamics is based on the discretization of the space by the grid of square cells of equal area and represented in the form of fuzzy dynamic topological space in the set of cells.

Results. The web-oriented decision support system is created on the base of developed concept and model. The experiments have been conducted, which have shown that the proposed natural emergency model can provide reasonable characteristics in terms of accuracy and speed providing that the space is discretized with the size of cell being from 8 m to 18 m.

Conclusions. The concept of territorial system representation in the natural emergency conditions is first developed in the form of overlaying static and dynamic topological spaces. The formal model of the natural emergency dynamics in the form of moving the bounding region of fuzzy-rough set, which has allowed reducing computational complexity and provided adaptation to the conditions of incomplete and inaccurate information is first created. The software for realization of suggested concept and method is developed. The software has allowed performing the practical task of decision support in natural emergency conditions.

Keywords: territorial system, indiscernibility relation, topological space, equivalence class, geotaxon, natural emergency.

REFERENCES

1. Grab M. V. Modeli, metody i algoritmy rasprostranenija lesnyh pozharov: Diss. kand. tehn. nauk: 01.05.02. Har'kov, HNURJe, 2004, 230 p.
2. Martinez J., Vega-Garcia C., Chuvieco E. Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain, *Journal of Environmental Management*, 2009, No. 90, pp. 1241–1252.
3. Atkinson D., Chladil M., Janssen V. et al.Implementation of quantitative bushfire risk analysis in a GIS environment, *International Journal of Wildland Fire,* 2010, No. 19, pp. 649–658.
4. Chuvieco E. et al. Development of a framework for fire risk assessment usong remote sensing and geographic information system technologies, *Ecological Modelling*, 2010, No. 221, pp. 46–58.
5. Preisler H. K., Brillinger D. R., Burgan R. E. et al. Probability based models for estimating wildfire risk, *International Journal of Wildland Fire*, 2004, No. 13, pp. 133–142.
6. Genton M. G., Butry D. T., Prestemon M. L. et al. Spatiotemporal analysis of wildfire ignitions in the St Johns River Water Management District, Florida, *International Journal of Wildland Fire*, 2006, No. 15, pp. 87–97.
7. Baranovskiy N., Zharikova M. A web-oriented geoinformation system for forest fire danger prediction in typical forests of the Ukraine, *Thematic cartography for the society. Lecture notes in geoinformation and cartography*, Springer, 2014, pp. 13–22
8. Zharikova M., Sherstjuk V. Threat assessment method for intelligent disaster decision support system, *Advances in Int. Systems and Computing*. Springer, 2016, Vol. 512, pp. 81–99.
9. Zharikova M. V., Sherstjuk V. G. Razrabotka modeli chrezvychajnoj situacii prirodnogo haraktera v sisteme podderzhki prinjatija reshenij, *Vostochno-evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij*, 2015, No. 1/4(73), pp. 62–74.
10. Ghisy T., Arca B., Pellizaro G. et al. An improved cellular automata for wildfire spread, Procedia Computer Science: ICCS 2015 International Conference On Computational Science, Reykjavik, Iceland, 1–3 June 2015 : proceedings. Elsevier, Volume 51, 2015, pp. 2287–2296.
11. Anderson D. H., Catchpole E., De Meste N. J. et al. Modeling the spread of grass fires, *The J. Of the Australian Mathematical Society Series B Applied Mathematics*, 1082, No. 23(4), pp. 451–466.
12. Finney M. A. Fire area simulator-model development and evaluation: technical report : RMRS-RP-4. USDA, UT, Ogden, 2004, 50 p.
13. Ghisu T., Arca B., Pellizzaro G. et al. A level-set algorithm for simulating wildfire spread, *CMES Computer Modeling in Engineering & Sciences,* 2014, No. 102(1), pp. 83–102.
14. Trufino G. A., Ambrosio D. D.', Rongo R. et al. A new algorithm for simulating wildfire through cellular automata, *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*, 2011, No. 22(1), pp. 1–26.
15. Zharikova M., Sherstjik V., Baranovskiy N. The plausible wildfire model in geoinformation decision support system for wildfire response, *Water resources, Forest, marine and ocean ecosystems: 15th international conference SGEM, 18–24 June 2015: proceeding*s. Albena, Bulgaria, 2015, pp. 575–583. DOI: 10.5593/sgem2015B32,
16. Zharikova M., Sherstjik V. Development of the model of natural emergencies in decision support system, *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2015, Vol 1, No. 4(73), pp. 62–69.
17. Slowinski R. Salvatore G., Benedetto M. Rough set and rule-based multicriteria decision aiding, *Pesquisa operacional*, 2012, Vol. 32(2), pp. 213–269.
18. Pawlak Z. Rough Sets, Jerzy W., Slowinski R. et al., *Comm. of ACM*, 1995, Vol. 38, No. 11, pp. 88–95.
19. Pawlak Z. Vagueness – a Rough Set View, *Structures in Logic and Computer Science*, 1997, pp. 106–117.
20. Abd El-Monsef M. E., El-Cayar M. A., Aqeel R. M. On relationships between revised rough fuzzy approximation operators and fuzzy topological spaces, *International Journal of Granular Computing, Rough Sets and Intelligent Systems*, 2014, Volume 3, No. 4, pp. 257–269.

УДК 519.86

Маляр М. М.[1], Поліщук В. В.[2], Шаркаді М. М.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна
[2]Канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення систем Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна
[3]Канд. екон. наук, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна

МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ФІНАНСУВАННЯ ПРОЕКТІВ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

Актуальність. Проведено дослідження актуальної задачі розроблення математичної моделі інформаційної технології оцінювання ризику проектів відносно рівня безпеки їх фінансування, з використанням нечіткої математики, для різних інвестиційних суб'єктів. Розробка такої технології дасть можливість адекватно підійти до розгляду проектів, підвищити ступінь обґрунтованості прийняття рішень щодо інвестування і основне підвищити економічну та управлінську безпеку.

Метою даної роботи є розроблення нечіткої математичної моделі інформаційної технології для оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування.

Методи. Розроблено дворівневу нечітку математичну модель отримання агрегованої оцінки ризику проекту для об'єднання думок експертів за групами критеріїв у остаточну оцінку та ступінь ризику проекту. Сформовано множину критеріїв для оцінювання ризику проектів різного походження, які розбито на групи. Сформульовано правила належності результуючої терм-оцінки за групами критеріїв ризику для побудови її бази знань. Представлено модель оцінювання ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту, що використовує системний підхід на основі: нечітких моделей оцінювання проекту в залежності від його походження; нечіткої моделі оцінювання галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект та агрегованої оцінки ризику проекту.

Результат. Отриманим результатом дослідження є модель оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування, виходом якої є лінгвістична оцінка по розглядуваному проекту. Раціональність такої оцінки доводять переваги розробленої моделі.

Висновки. У роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення математичної моделі інформаційної технології для оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування. Розроблено модель оцінювання проектів різного походження за умов нечітких експертних оцінок на основі апарату нечітких множин і нечіткої логіки.

Практичне значення одержаних результатів, а саме розробленої моделі оцінювання ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту, може бути втілена у роботу інвестиційних і венчурних фондів. Розроблена модель буде корисним інструментом при підвищені рівня безпеки та обґрунтованості прийняття рішень інвестиційними суб'єктами, які бажають фінансувати комерційні проекти різного походження.

Ключові слова: проекти, ризики, лінгвістичні оцінки, група критеріїв, безпека фінансування, венчурні фонди.

НОМЕНКЛАТУРА

I – номер показника критерію ризику групи;

K^F – група критеріїв «фінансові ризики»;

K_1^F – ризик неефективного використання капіталу;

K_2^F – ризик збитковості;

K_3^F – ризик втрати інвестора;

K_4^F – ризик втрати платоспроможності;

K_5^F – ризик неоптимальної ціни капіталу;

K^I – група критеріїв «інвестиційні ризики»;

K_1^I – ризик неефективності інвестицій;

K_2^I – ризик недосягнення цілей по віддачі на інвестований капітал;

K_3^I – ризик зриву термінів створення виробничих фондів;

K_4^I – ризик перевищення обсягу стартових інвестицій;

K_5^I – ризик браку інвестиційного капіталу;

K^O – група критеріїв «операційні ризики»;

K_1^O – ризик втрати клієнтської бази;

K_2^O – ризик втрати постачальника;

K_3^O – ризик втрати ринкової долі;

K_4^O – ризик зниження рівня управління;

K_5^O – ризик виробничого конфлікту і неефективної мотивації;

K_6^O – ризик зниження якості процесів;

K_7^O – ризик зниження продуктивності праці;

K_8^O – ризик незабезпеченості ресурсами;

K_9^O – ризики персоналу;

K^S – група критеріїв «ризики інноваційної діяльності»;

K_1^S – ризик неефективних інноваційних інвестицій;

K_2^S – ризик неефективного просування інновацій;

K_3^S – ризики зриву термінів розробки інновацій;

K_4^S – ризики порушення технологій інновацій;

K_5^S – ризики ресурсної недостатності при проектуванні інновацій;

K_i^α – i-тий показник критерію ризику групи α;

© Маляр М. М., Поліщук В. В., Шаркаді М. М., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-5

l – кількість проектів;

L – терм-множина рівнів ризику;

L^{α} – результуюча терм-оцінка груп критеріїв ризику;

L_i^{α} – змінна з терм-множини L для i-го показника групи α;

m – кількість критеріїв;

$M(S)$ – вихідна оцінка;

n – кількість тих лінгвістичних змінних, що співпадають з результуючою терм-оцінкою;

O – оператор, що ставить у відповідність вихідну змінну SI;

O_G – оцінка галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект;

O_R – агрегована оцінка ризику реалізації проекту;

O_S – оцінка розглядуваного проекту в залежності від його походження;

p_{δ} – ваговий коефіцієнт;

R – вихідне лінгвістичне трактування агрегованої оцінку ризику за групами критеріїв;

r_1 – незначний ступінь ризику проекту;

r_2 – низький ступінь ризику проекту;

r_3 – середній ступінь ризику проекту;

r_4 – високий ступінь ризику проекту;

r_5 – граничний ступінь ризику проекту;

S – комерційний проект;

SI – вихідна оцінка та лінгвістичне трактування ризику відносно безпеки фінансування;

SI_1 – дуже низький рівень безпеки фінансування проекту;

SI_2 – низький рівень безпеки фінансування проекту;

SI_3 – середній рівень безпеки фінансування проекту;

SI_4 – рівень безпеки фінансування проекту вище середнього;

SI_5 – високий рівень безпеки фінансування проекту;

V – оператор, що ставить у відповідність вихідну змінну R;

$x(L^{\alpha})$ – значення функції, що дорівнює числовій інтерпретації результуючим терм-оцінкам;

z^{α} – оцінка ризику проекту за кожною групою критеріїв;

α – одна із груп критеріїв ризику;

α_{δ} – нормований ваговий коефіцієнт;

δ – множина значень для проекту, галузі і ризику проекту;

$\mu(L)$ – достовірність експертних міркувань;

$\mu(L^{\alpha})$ – агрегована оцінка достовірності міркувань експерта;

$\mu(L_i^{\alpha})$ – достовірність міркувань експерта щодо присвоєння значення змінній L_i^{α};

В – терм-оцінка високий рівень ризику;

ВС – терм-оцінка рівень ризику вище середнього;

Н – терм-оцінка низький рівень ризику;

НС – терм-оцінка рівень ризику нижче середнього;

ОПР – особа, що приймає рішення;

С – терм-оцінка середній рівень ризику.

ВСТУП

Фінансування проектів будь-якої природи (стартап проекту чи класичного інвестиційного) – це ризикова діяльність. В залежності від походження проекту існують різні варіанти його фінансування, наприклад: бізнес ангели, венчурні та інвестиційні фонди, банки. Кожна із даних установ має власну політику керування ризиками. Але всіх їх об'єднує одне: знайти і профінансувати успішний проект при мінімальних ризиках.

З ризиком тісно пов'язується поняття економічної безпеки проекту, причому як безпека суб'єкта, що представляє проект, так і безпека інвестора. Безпека суб'єкта полягає у тому, що ризиковий і неуспішний проект призведе до збитків підприємства. Безпека інвестора прямо залежить від адекватної оцінки проекту і суб'єкта, що представляє проект. Підвищення безпеки інвестиційних проектів забезпечує стійкість регіональної економіки [1].

Актуальність роботи полягає у розроблені математичної моделі інформаційної технології оцінювання ризику проектів відносно рівня безпеки їх фінансування, з використанням нечіткої математики, для різних інвестиційних суб'єктів (інвестиційні фонди, венчурні фонди, бізнес-ангели, банківські установи та ін.). Розробка такої технології дасть можливість адекватно підійти до розгляду проектів, підвищити ступінь обґрунтованості прийняття рішень щодо інвестування і основне підвищити економічну та управлінську безпеку.

Метою даної роботи є розроблення нечіткої математичної моделі інформаційної технології для оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення мети наукового дослідження необхідно вирішити такі завдання:

– сформувати множину критеріїв для оцінювання проектних ризиків та класифікувати їх по групам;

– сформулювати правила належності результуючої терм-оцінки за групами критеріїв ризику для побудови бази знань;

– на основі запропонованих критеріїв розробити дворівневу нечітку математичну модель отримання агрегованої оцінки ризику проекту;

– розробити модель оцінювання ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту, на основі: нечітких моделей оцінювання проекту в залежності від його походження; нечіткої моделі оцінювання галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект та агрегованої оцінки ризику проекту.

В залежності від походження комерційні проекти будемо розглядати двох видів: класичні – інвестиційні проекти під які чітко сформульований бізнес-план, виникають у працюючій на ринку компанії і потребують часткового залучення коштів ззовні; стартап проекти – «ідея», що виникає у компаніях бізнес яких ґрунтується на інноваційних технологіях, такі компанії не вийшли на ринок або щойно почали на нього виходити і мають потребу у залученні зовнішніх ресурсів.

Сформулюємо задачу оцінювання наступним чином. Нехай маємо на вході деякі комерційні проекти

$S_1, S_2, ..., S_l$, для яких потрібно оцінити їх ризик відносно рівня безпеки фінансування. Проекти можуть бути різної перспективності, природи та безпеки реалізації. Не зменшуючи загальності, надалі будемо розглядати один комерційний проект. У випадку множини проектів їх можна упорядковувати за отриманими вихідними оцінками. Модель задачі представимо у наступному вигляді:

$$SI = O(O_S, O_G, O_R), \quad (1)$$

де O_S – оцінка розглядуваного проекту в залежності від його походження (класичний інвестиційний проект або стартап проект), O_G – оцінка галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект, O_R – агрегована оцінка ризику реалізації проекту. SI – вихідна оцінка та лінгвістичне трактування ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту. O – оператор, що ставить у відповідність вихідну змінну SI, при вхідних оцінках O_S, O_G, O_R.

Для отримання агрегованої оцінки ризику проекту запропонуємо, наприклад [11], наступну множину критеріїв оцінювання ризику та спробуємо класифікувати їх за чотирма групами критеріїв: K^O – «операційні ризики»; K^I – «інвестиційні ризики»; K^F – «фінансові ризики»; K^S – «ризики інноваційної діяльності». ОПР по кожній групі критеріїв ризику вибирає ті критерії, за якими може оцінити розглядуваний проект. Представимо кожну групу критеріїв у вигляді множини показників. Тоді

$$K^O = \{K_1^O, K_2^O, ..., K_9^O\}, \qquad K^I = \{K_1^I, K_2^I, ..., K_5^I\},$$

$$K^F = \{K_1^F, K_2^F, ..., K_5^F\}, \; K^S = \{K_1^S, K_2^S, ..., K_5^S\}.$$

Дана множина критеріїв ризику не може розкрити всі аспекти для будь-якого проекту (інвестиційного або стартапу) різних галузей реалізації, тому вона є відкритою і до неї ОПР може додати ті чи інші критерії в залежності від сфери інвестування.

Кожен критерій ризику оцінюється експертно за допомогою одного із термів наступної терм-множини лінгвістичних змінних $L = \{H;\ HC;\ C;\ BC;\ B\}$. Також, кожній оцінці рівня ризику експерт ставить число «достовірності» $\mu(L)$ своїх міркувань з інтервалу [0; 1]. Тоді, вхідні дані для оцінювання ризику проектів різного походження можемо представити у вигляді таблиць за групами критеріїв ризику наступним чином (табл. 1).

Вхідні дані подані у вигляді лінгвістичних змінних та значень достовірності міркувань експерта. Тому, на першому рівні необхідно побудувати правила належності та базу знань, щоб отримати результуючу терм-оцінку L^α для кожної групи критеріїв ризику. На основі отриманої результуючої терм-оцінки L^α визначити агреговану оцінку достовірності $\mu(L^\alpha)$. На другому рівні отримані оцінки L^α та $\mu(L^\alpha)$ спроектуємо на «вісь ризику» для визначення однієї оцінки ризику проекту за кожною групою критеріїв α.

Таблиця 1 – Вхідні дані за групами критеріїв ризику

Критерії групи	Лінгвістична змінна	Достовірність міркувань експерта
K_1^α	L_1^α	$\mu(L_1^\alpha)$
K_2^α	L_2^α	$\mu(L_2^\alpha)$
…	…	…
K_m^α	L_m^α	$\mu(L_m^\alpha)$

Де $\alpha = \{O; I; F; S\}$ – одна із груп критеріїв ризику.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Останні наукові дослідження свідчать про необхідність систематизації засобів мінімізації ризиків і розробки алгоритму вибору моделі оцінювання проектів різного походження. Питання кількісної оцінки ризику та ризик-менеджменту під час інвестування розкрито у багатьох працях [2–4], але досі ще не вироблено цілісної концепції визначення рівня ризику, його зниження та врахування при цьому суб'єктивних аспектів оцінювання. Наприклад, запропоновані статистичні методи [5–6] ґрунтуються на дослідженні статистики збитків у діяльності суб'єктів господарювання, визначенні конкретного рівня збитків та їх частоти виникнення, прогнозуванні ймовірності збитків. Основою статистичних методів є розрахунок коефіцієнта варіації, середньоквадратичного відхилення та дисперсії. Статистичні методи дозволяють отримати тільки кількісну оцінку ризику на множині дискретних оцінок, що не завжди є об'єктивним.

Існує достатньо систем класифікацій ризиків і різних факторів, що на них впливають. Дані системи класифікуються стосовно підмножини ризиків відносно сфери їх фінансування [7–8]. Але при створенні такої класифікації, в більшості, відбувається заміна об'єктивної системи ризиків на суб'єктивну, для спрощення побудови моделі та їх практичного вивчення і аналізу.

Опубліковано ряд робіт, що пропонують оцінювати ризики проектів, використовуючи формулу чистої приведеної вартості проекту [9–10]. Частина з них навіть використовують нечіткі множини і будують функції належності, розглядаючи різні терміни окупності проектів, але забувають про системний підхід таких оцінювань.

Звідси випливає, що застосування апарату нечітких множин, нечіткої логіки і системного підходу до оцінювання ризику фінансування проектів різного походження є нерозкритим достатнім чином. Апарат нечітких множин вимагає від ОПР зіставлення не точкових ймовірнісних оцінок, а на інтервалі, що показує коридор значень прогнозних параметрів. Зручність таких методів проявляється у підвищенні ступеня обґрунтованості рішень, оскільки тут враховуються всі можливі сценарії розвитку, зображаючи неперервний спектр, на відміну, наприклад, від метода Гурвіца, що розраховується на дискретній множині сценаріїв.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Опишемо дворівневу математичну модель оцінювання ризиків проектів, що базується на вхідних лінгвістичних змінних.

Розглянемо перший рівень – побудова правил належності результуючої терм-оцінки за групами критеріїв ризику.

Щоб отримати результуючу терм-оцінку *«H»* проект повинен задовольняти наступним вимогам. Мінімальна

кількість критеріїв із термом «низьким рівнем ризику» повинна становити не менше 60%, а решту 40% критеріїв повинні мати терми на рівні не нижче «рівня ризику нижче середнього».

Щоб отримати результуючу терм-оцінку *«НС»* проект повинен мати мінімальну кількість критеріїв із термом «рівень ризику нижче середнього» не менше 60%, а решту 40% критеріїв повинні мати терми на рівні не нижче «середній рівень ризику».

Щоб отримати результуючу терм-оцінку *«С»* проект повинен мати мінімальну кількість критеріїв із термом «середній рівень ризику» не менше 60%, а решту 40% критеріїв повинні мати терми на рівні не нижче «рівень ризику вище середнього».

Щоб отримати результуючу терм-оцінку *«ВС»* проект повинен мати мінімальну кількість критеріїв із термом «рівень ризику вище середнього» не менше 60%, а решту 40% критеріїв можуть мати «високий рівень ризику».

Результуючу терм-оцінку «*В*» проект отримає у тому випадку, якщо кількість критеріїв із термом «високий рівень ризику» буде становити 60% або більше.

На основі побудованих правил належності результуючої терм-оцінки за групами критеріїв ризику, можемо навести фрагмент бази знань, наприклад, за п'ятьма критеріями (табл. 2).

Оскільки експерт ставить кожній змінні L_i^α достовірність своїх міркувань – $\mu(L_i^\alpha)$ з інтервалу [0; 1], тоді лінгвістичні змінні можна представити, наприклад у вигляді трикутних функцій належності (рис. 1).

У такому випадку це означає, що кожна лінгвістична змінна L може бути замінена на сусідню L^* із достовірністю $\mu(L^*) = 1 - \mu(L)$. Наприклад, якщо критерій K_2^S отримав рівень ризику $L_2^S = HC$ з достовірністю $\mu(L_2^S) = 0{,}7$, тоді це еквівалентно $L_2^S = H$ з достовірністю $\mu(L_2^S) = 0{,}3$, або $L_2^S = C$ з $\mu(L_2^S) = 0{,}3$. Таким чином, це дає можливість наведеними правилами належності результуючої терм-оцінки вичерпати всі можливі варіанти оцінки ризику експертом.

Таблиця 2 – Фрагмент бази знань

№	K_1^α	K_2^α	K_3^α	K_4^α	K_5^α	Результуюча терм-оцінка
1	Н	Н	Н	НС	НС	Н
2	Н	Н	НС	НС	НС	НС
3	НС	НС	НС	С	С	
4	НС	НС	НС	Н	С	
5	С	С	С	НС	НС	С
6	С	С	С	ВС	ВС	
7	С	С	С	НС	ВС	
8	С	С	С	Н	НС	
9	ВС	ВС	ВС	С	С	ВС
10	ВС	ВС	ВС	С	В	
11	ВС	ВС	ВС	В	В	
12	ВС	ВС	ВС	НС	С	
13	В	В	В	ВС	ВС	В
14	В	В	В	ВС	С	

Агреговану оцінку достовірності $\mu(L^\alpha)$, $\alpha = \{O; I; F; S\}$ обчислимо за наступною формулою:

$$\mu(L^\alpha) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{m}\mu(L_i^\alpha), \quad \alpha = \{O; I; F; S\}, \tag{2}$$

де $\mu(L_i^\alpha)$ – оцінка достовірностей тих лінгвістичних змінних, що співпадають з результуючою терм-оцінкою для *i*-го критерію по α групі критеріїв ризику.

Таким чином, на першому рівні отримаємо результуючу терм-оцінку, на основі правил належності, для кожної групи критеріїв ризику розглядуваного проекту та агреговану оцінку її достовірності (2). Отримані дані, по першому рівню, представимо у вигляді табл. 3.

На другому рівні, отримані дані за групами критеріїв ризику спроектуємо на «вісь ризику» для визначення узагальненої оцінки ризику проекту за кожною групою критеріїв α та одержання агрегованої оцінки ризику, а також її лінгвістичне трактування.

Далі розглянемо наступну математичну модель:

$$R = V(x(L^\alpha); \mu(L^\alpha); z^\alpha; O_R). \tag{3}$$

Оскільки, результуюча терм-оцінка L^α має зміст рівня ризику, тоді її терми можемо адекватно визначити на відсотковій шкалі (0–100%), кожному з яких задається значення з проміжку [*a*; *b*]. Наприклад, *«Н»* – [0; 20], *«НС»* – [20; 40], *«С»* – [40; 60], *«ВС»* – [60; 80], *«В»* – [80; 100]. Тобто, наприклад, ризик у 90% трактується як «високий рівень ризику».

Залежність результуючої терм-оцінки L^α та її достовірності $\mu(L^\alpha)$ будемо розглядати у вигляді *s*-подібної функції належності. Так-як значення функції належності

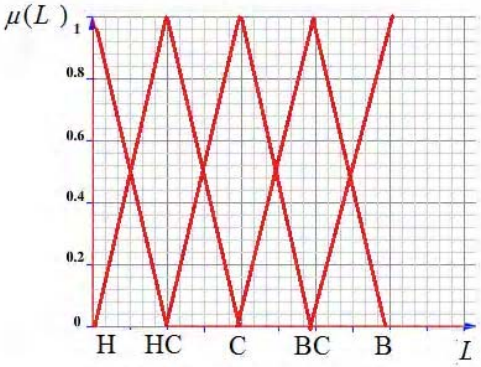


Рисунок 1 – Трикутні функції належності лінгвістичних змінних, *L* – лінгвістичні змінні, $\mu(L)$ – достовірність міркувань експерта

Таблиця 3 – Дані за групами критеріїв ризику

Група критеріїв	Результуюча терм-оцінка	Агрегована оцінка достовірності міркувань експерта
K^O	L^O	$\mu(L^O)$
K^I	L^I	$\mu(L^I)$
K^F	L^F	$\mu(L^F)$
K^S	L^S	$\mu(L^S)$

відомі (агрегована оцінка ризику) та відомі інтервали числових значень для L, тоді для кожної групи критеріїв α, виразимо x^{α} із загальної формули s-подібної функції належності:

$$x^{\alpha}=\begin{cases}\sqrt{\dfrac{\mu(L^{\alpha})}{2}}(b-a)+a, & 0\le\mu(L^{\alpha})\le 0{,}5;\\ b-\sqrt{\dfrac{1-\mu(L^{\alpha})}{2}}(b-a), & 0{,}5<\mu(L^{\alpha})\le 1.\end{cases} \quad (4)$$

Для отримання узагальненої оцінки ризику проекту для груп критеріїв α, скористаємося наступною формулою:

$$z^{\alpha}=\frac{x^{\alpha}}{100}. \quad (5)$$

Оцінка z^{α} проектується на «вісь ризику» z і є нормованою. Вона представляє собою для кожної групи критеріїв α агреговану оцінку ризику розглядуваного проекту відносно результуючої терм-оцінки і її достовірності.

Вектор $(x(L^{\alpha});\mu(L^{\alpha});z^{\alpha})$ інтерпретуємо на тривимірній системі координат, де $x=x(L^{\alpha})$, $y=\mu(L^{\alpha})$, а вісь $z=z^{\alpha}$ – «вісь ризику», рис. 2.

Далі обчислимо агреговану оцінку ризику по всіх групах критеріїв α:

$$O_R=\frac{1}{4}\sum_{\alpha}(1-z^{\alpha}). \quad (6)$$

Отримана оцінка O_R нормована та лінгвістичне трактування агрегованої оцінку ризику $R=\{r_1,r_2,r_3,r_4,r_5\}$ визначимо наступною шкалою: $O_R\in(0{,}87;\ 1]$ – r_1; $O_R\in(0{,}67;\ 0{,}87]$ – r_2; $O_R\in(0{,}36;\ 0{,}67]$ – r_3; $O_R\in(0{,}21;\ 0{,}36]$ – r_4; $O_R\in[0;\ 0{,}21]$ – r_5.

Побудована таким чином дворівнева нечітка математична модель, отримання агрегованої оцінки ризику проекту, використовує міркуваннях експерта щодо оцінок за різними критеріями ризику, достовірності його міркувань та на основі цього відбувається агрегування думок за групами критеріїв у остаточну оцінку.

Розглянемо методи отримання оцінки проекту O_S в залежності від його походження.

Перший випадок, коли для оцінювання ризику безпеки фінансування подається класичний-інвестиційний проект працюючою на ринку компанією. В цьому випадку для отримання оцінки O_S використовуємо розроблений метод оцінки та вибору інвестиційних проектів [12]. Даний метод враховує фактори невизначеності у прийнятті рішень, базується на ієрархічній структурі та зважує на побажання інвестора на заключному етапі.

Другий випадок, коли проект виникає у компаніях бізнес яких ґрунтується на інноваційних технологіях, що не вийшли на ринок або щойно почали на нього виходити і мають потребу у залученні зовнішніх ресурсів. До таких проектів відносимо стартап проекти. Тоді для отримання оцінки O_S використовуємо модель оцінювання стартапів в умовах інформаційної невизначеності [13]. Розроблена модель зменшує суб'єктивізм експертних оцінок, показує місце стартапу серед інших, дозволяє встановити рівень успішності та враховує побажання ОПР.

Оцінку галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект – O_G, можемо отримати розробленим методом ранжування альтернативних варіантів довільної природи [14]. Запропонований метод дозволяє адекватно розв'язати таку складну задачу, як оцінювання перспективності функціонування галузі економіки для можливості капіталовкладень. Він працює з даними різної природи, а на виході отримаємо нормовані оцінки альтернатив.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо експериментальне дослідження розробленої моделі. Для прикладу, розглянемо наступну задачу. Необхідно побудувати вихідну оцінку SI та лінгвістичне трактування ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту. На цьому етапі ми маємо оцінку проекту в залежності від його походження – O_S, оцінку галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект – O_G, агреговану оцінку ризику реалізації проекту – O_R.

Нехай ОПР по кожній оцінці може задати вагові коефіцієнти $\{p_S,p_G,p_R\}$ з деякого інтервалу. Тоді визначимо нормовані вагові коефіцієнти відповідно:

$$\alpha_{\delta}=\frac{p_{\delta}}{\sum_{\delta}p_{\delta}},\ \delta=\{S,G,R\},\sum_{\delta}p_{\delta}=1. \quad (7)$$

Оскільки всі отримані оцінки є нормовані з інтервалу [0; 1], тоді для отримання остаточної оцінки визначення рівня безпеки фінансування проекту використаємо наступний підхід. В залежності від психологічного сприйняття ситуації ОПР може вибрати одну із згорток [15]:

$$M_1(S)=\frac{1}{\sum_{\delta}\dfrac{\alpha_{\delta}}{O_{\delta}}}\ \text{– песимістична;} \quad (8)$$

$$M_2(S)=\prod_{\delta}(O_{\delta})^{\alpha_{\delta}}\ \text{– обережна;} \quad (9)$$

$$M_3(S)=\sum_{\delta}\alpha_{\delta}O_{\delta}\ \text{– середня;} \quad (10)$$

$$M_4(S)=\sqrt{\sum_{\delta}\alpha_{\delta}(O_{\delta})^2}\ \text{– оптимістична.} \quad (11)$$

Таким чином, отримаємо вихідну оцінку $M(S)$ з інтервалу [0; 1]. Для лінгвістичного трактування ризику отримане значення по формулам (8)–(11) зіставимо до одної з терм-множин $SI=\{SI_1,SI_2,SI_3,SI_4,SI_5\}$. Шкалу оцінок можемо визначити наступним чином: $M(S)\in$ (0,77; 1] – SI_5; $M(S)\in(0{,}57;0{,}77]-SI_4$; $M(S)\in(0{,}36;0{,}57]-SI_3$; $M(S)\in(0{,}21;0{,}36]-SI_2$; $M(S)\in[0;0{,}21]-SI_1$.

В залежності від різних періодів реалізації проекту можемо переглядати вихідну оцінку та агреговану оцінку ризику реалізації проекту.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Розроблену математичну модель застосуємо для оцінювання стартапу S – «Багатоцільовий моніторинг розумного будинку» [13]. Даний стартап пройшов експертне опитування і отримав наступну терм-множину вхідних даних (табл. 3).

На першому рівні отримаємо результуючу терм-оцінку та агреговану оцінку її достовірності з (2). Отримані дані, представимо у вигляді табл. 4.

На другому рівні, отримані дані за групами критеріїв ризику спроектуємо на «вісь ризику» для визначення узагальненої оцінки ризику проекту. Використовуючи формули (4)–(5) одержимо: $z^O = 0{,}14; z^I = 0{,}34;\ z^F = 0{,}31;$ $z^S = 0{,}3$. Далі обчислимо агреговану оцінку ризику за (6):

$$O_R = \frac{1}{4}((1-0{,}14)+(1-0{,}34)+(1-0{,}31)+(1-0{,}3)) = 0{,}7275.$$

Лінгвістичне трактування агрегованої оцінку ризику $O_R \in (0{,}67;\ 0{,}87]$ – r_2 = «низький ступінь ризику проекту».

Нехай ОПР визначив вагові коефіцієнти наступним чином: для оцінки проекту в залежності від його походження – 10, для оцінки галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект – 6, для агрегованої оцінки ризику реалізації проекту – 8. Визначаємо нормовані вагові коефіцієнти згідно (7) – {0,42; 0,25; 0,33}.

Припустимо, що використовуючи моделі і методи описані в [12–15], отримано наступні значення оцінок: $O_S = 0{,}4795$ та $O_G = 0{,}56$. Далі, застосуємо, наприклад, згортку (10) для побудови вихідної оцінки: $M_3(S) = 0{,}42 \cdot 0{,}4795 + 0{,}25 \cdot 0{,}56 + 0{,}33 \cdot 0{,}7275 = 0{,}58.$

Спроектувавши отримане значення на терм-множину лінгвістичних змінних одержимо, що оцінюваний стартап відноситься до класу SI_4 – «рівень безпеки фінансування проекту вище середнього».

Таблиця 4 – Дані за групами критеріїв ризику

Група критеріїв	Результуюча терм-оцінка	Агрегована оцінка достовірності міркувань експерта
K^O	Н	$\mu(L^O) = \frac{1}{6}(0{,}8+0{,}7+0{,}6 +0{,}7+0{,}8+0{,}9) \approx 0{,}8$
K^I	НС	$\mu(L^I) = \frac{1}{3}(0{,}7+0{,}8+0{,}9) \approx 0{,}8$
K^F	НС	$\mu(L^F) = \frac{1}{3}(0{,}3+0{,}6+0{,}2) \approx 0{,}6$
K^S	НС	$\mu(L^S) = \frac{1}{3}(0{,}1+0{,}7+0{,}6) \approx 0{,}5$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отриманим результатом дослідження є модель оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування, виходом якої є лінгвістична оцінка по розглядуваному проекту. Раціональність такої оцінки доводять переваги розробленої моделі. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням апарату нечіткої логіки та нечітких множин, що підтверджується результатами досліджень.

Побудована математична модель інформаційної технології оцінювання ризику проектів відносно рівня безпеки їх фінансування має ряд переваг, а саме: підвищує об'єктивність експертних оцінок у оцінюванні ризиків проекту використовуючи вхідні лінгвістичні змінні та достовірності міркувань експерта щодо їх присвоєння; уможливлює змінювати рівні прийняття рішень у базі знань в залежності від ліквідності інвестиційної установи; розроблена база знань не залежить від кількості критеріїв по групах, тому їх можна збільшувати в залежності від походження проекту; об'єднує думки за групами критеріїв у остаточну оцінку та ступінь ризику проекту, на основі побудованої дворівневої нечіткої математичної

Таблиця 3 – Вхідні дані по проекту

Група критеріїв	Критерії	Лінгвістична змінна	Достовірність міркувань експерта	Група критеріїв	Критерії	Лінгвістична змінна	Достовірність міркувань експерта
Операційні ризики	K_1^O	Н	0,8		K_4^I	НС	0,8
	K_2^O	Н	0,7		K_5^I	НС	0,9
	K_3^O	НС	0,9	Фінансові ризики	K_1^F	С	0,7
	K_4^O	Н	0,6		K_2^F	НС	0,6
	K_5^O	НС	0,7		K_3^F	С	0,8
	K_6^O	С	0,5		K_4^F	Н	0,7
	K_7^O	Н	0,7		K_5^F	Н	0,6
	K_8^O	Н	0,8	Ризики інноваційної діяльності	K_1^S	Н	0,8
	K_9^O	Н	0,9		K_2^S	Н	0,9
Інвестиційні ризики	K_1^I	НС	0,7		K_3^S	С	0,9
	K_2^I	Н	0,5		K_4^S	НС	0,7
	K_3^I	С	0,6		K_5^S	НС	0,6

моделі; використовує системний підхід у оцінюванні рівня безпеки фінансування проекту на основі оцінки проекту в залежності від його походження, оцінки галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект та агрегованої оцінки ризику реалізації проекту.

До недоліків даного підходу можна віднести використання різних моделей функцій належності, що може приводити до неоднозначності кінцевих результатів.

Подальше дослідження проблематики вбачаємо у апробації розробленої моделі для широкої вибірки проектів різного походження, розробки програмного забезпечення і нарощенням бази критеріїв ризику та порівняння з існуючими моделями.

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення математичної моделі інформаційної технології для оцінювання ризику комерційних проектів відносно рівня безпеки їх фінансування. Розроблено модель оцінювання проектів різного походження за умов нечітких експертних оцінок на основі апарату нечітких множин і нечіткої логіки. При цьому отримано такі результати:

– сформовано множину з 24-ма критеріями для оцінювання ризику проектів різного походження, які розбито на чотири групи, що розкривають загальні аспекти оцінювання ризику;

– сформульовано правила належності результуючої терм-оцінки за групами критеріїв ризику для побудови її бази знань, в якій можна змінювати рівні прийняття рішень і вона не залежить від кількості критеріїв по групах;

– удосконалено дворівневу нечітку математичну модель отримання агрегованої оцінки ризику проекту для об'єднання думок експертів за групами критеріїв у остаточну оцінку та ступінь ризику проекту;

– вперше запропоновано модель оцінювання ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту, що використовує системний підхід на основі: нечітких моделей оцінювання проекту в залежності від його походження; нечіткої моделі оцінювання галузі економіки в якій буде реалізований комерційний проект та агрегованої оцінки ризику проекту.

Практичне значення одержаних результатів, а саме розробленої моделі оцінювання ризику відносно рівня безпеки фінансування проекту, може бути втілена у роботу інвестиційних і венчурних фондів. Розроблена модель буде корисним інструментом при підвищені рівня безпеки та обґрунтованості прийняття рішень інвестиційними суб'єктами, які бажають фінансувати комерційні проекти різного походження.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Ужгородського національного університету «Розробка математичних моделей і методів для оброблення інформації та інтелектуального аналізу даних» (номер державної реєстрації 0115U004630).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kelemen M. Problems of Protected Interests in the Security Sectors [Text] / M. Kelemen // Warszaw: Wydawnictwo Wyzszej szkoly menedzerskiej w Warszawie im. Prof. Leszka J. Krzyzanowskiego, 2015. – 114 p. ISBN 978-83-7520-203-8.
2. Вербіцька І. І. Ризик-менеджмент як сучасна система управління ризиками підприємницьких структур / І. І. Вербіцька // Сталий розвиток економіки. – 2013. – № 5. – С. 282–291.
3. Kelemen M. Využitie technolygie LVA (vrstvená analýza hlasu) v bezpečnostnej praxi, na prevenciu proti podvodom u poist'ovacích a finančý nch spoločností / M. Kelemen, S. Križovský, Š. Kočan, 1. vyd. – Košice: Vysoká škola bezpečnostného manažérstva v Košiciach, 2012. – 100 p. ISBN 9788089282807.
4. Crouhy M. Risk Management [Text] / M. Crouhy, D. Galai, R. Mark. – New York : McG-H, 2012. – 390 p.
5. Вітлінський В. В. Ризикологія в економіці та підприємництві: монографія [Текст] / В. В. Вітлінський, Г. І. Великоіваненко. – К. : КНЕУ, 2004. – 480 с.
6. Кузьмін О. Є. Управління та зниження рівня ризиків енергозабезпечення підприємств: монографія / О. Є. Кузьмін, Н. Ю. Подольчак, В. Є. Матвіїшин ; Нац. ун-т «Львів. політехніка». – Львів : Міські інформаційні системи, 2011. – 235 с.
7. Балабанова Н. В. К вопросу о сущности рисков [Текст] / Н. В. Балабанова, Ю. А. Соколов // Современные наукоемкие технологии. – 2005. – № 23. – С. 56–63.
8. Чернов В. Г. Модели поддержки принятия решений в инвестиционной деятельности на основе апарата нечетких множеств [Текст] / В. Г. Чернов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2007. – 312 с. – ISBN 978-5-93517-353-0
9. Онікієнко, С. Облікові методи оцінки інвестиційної привабливості / С. Онікієнко // Вісник Нацбанку України. – 2001. – № 7. – С. 49–51.
10. Управление рисками и шансами корпорации [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www. ifel. ru/docs/RC_AN_ZA.pdf .
11. Абдулаева З. И. Стратегический анализ инновационных рисков / З. И. Абдулаева, А. О. Недосекин. – СПб: Изд-во Политехн. университета, 2013. – 150 с.
12. Malyar M. Choice and evaluation methodics of investment projects / M. Malyar, V. Polishchuk // Košická bezpečnostná revue, Košice. – 2013. – №1. – P. 117–126. ISSN 1338-4880.
13. Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty / [M. Malyar, V. Polishchuk, M. Sharkadi, I. Liakh] // EEJET, Mathematics and cybernetics – applied aspects. – 2016. – 3/4 (81). – P. 43–49. ISSN 1729-3774. DOI: http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71222.
14. Malyar M. Ranking method of alternative options of inhomogeneous nature / M. Malyar, V. Polishchuk // Košická bezpečnostná revue, Košice. – 2016. – № 1. – P. 60–67. ISSN 1338-4880.
15. Маляр М. М. Моделі і методи багатокритеріального обмежено-раціонального вибору : монографія / М. М. Маляр. – Ужгород : РА «АУТДОР-ШАРК», 2016. – 222 с.

Стаття надійшла до редакції 28.11.2016.
Після доробки 09.12.2016.

Маляр Н. Н.[1], Полищук В. В.[2], Шаркади М. Н.[3]

[1]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина

[2]Канд. техн. наук, доцент кафедры программного обеспечения систем Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина

[3]Канд. экон. наук, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНКИ РИСКА ФИНАНСИРОВАНИЕ ПРОЕКТОВ

Актуальность. Проведено исследование актуальной задачи разработки математической модели информационной технологии оценки риска проектов относительно уровня безопасности их финансирования, с использованием нечеткой математики, для различных инвестиционных субъектов. Разработка такой технологии позволит адекватно подойти к рассмотрению проектов, повысить степень обоснованности принятия решений по инвестированию и основное повысить экономическую и управленческую безопасность.

Целью данной работы является разработка нечеткой математической модели информационной технологии для оценки риска коммерческих проектов относительно уровня безопасности их финансирования.

Методы. Разработано двухуровневую нечеткую математическую модель получения агрегированной оценки риска проекта для объединения мнений экспертов по группам критериев в окончательную оценку и степень риска проекта. Сформировано множество критериев для оценки риска проектов различного происхождения, разбиты на группы. Сформулированы правила принадлежности результирующей терм-оценки по группам критериев риска для построения базы знаний. Представленная модель оценки риска относительно уровня безопасности финансирования проекта, использует системный подход на основе: нечетких моделей оценки проекта в зависимости от его происхождения; нечеткой модели оценивания отрасли экономики в которой будет реализован коммерческий проект и агрегированной оценки риска проекта.

Результат. Полученным результатом исследования является модель оценки риска коммерческих проектов относительно уровня безопасности их финансирования, выходом которой является лингвистическая оценка по рассматриваемым проектам. Рациональность такой оценки доказывают преимущества разработанной модели.

Выводы. В работе решено научно-прикладную задачу разработки математической модели информационной технологии для оценки риска коммерческих проектов относительно уровня безопасности их финансирования. Разработана модель оценки проектов различного происхождения в условиях нечетких экспертных оценок на основе аппарата нечетких множеств и нечеткой логики.

Практическое значение полученных результатов, а именно разработанной модели оценки риска относительно уровня безопасности финансирования проекта, может быть воплощена в работу инвестиционных и венчурных фондов. Предложенная модель будет полезным инструментом при повышении уровня безопасности и обоснованности принятия решений инвестиционными субъектами, которые готовы финансировать коммерческие проекты различного происхождения.

Ключевые слова: проекты, риски, лингвистические оценки, информационные технологии, многокритериальность, безопасность финансирования, венчурные фонды.

Malyar N. N.[1], Polishchuk V. V.[2], Sharkadi M. N.[3]

[1]PhD, Associate professor, Aassociate Professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

[2]PhD, Aassociate Professor of Department of Software Systems, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

[3]PhD, Aassociate Professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

MODEL OF INFORMATION TECHNOLOGY PROJECT FINANCING RISK ASSESSMENT

Context. The investigation of the actual problem of information technology mathematical models of risk assessment projects regarding the security of their financing, using fuzzy math to various investment entities is done. Development of this technology will allow adequately review the projects; increase the degree of decisions making validity in case of investments and increase economic security and management.

Objective of this work is to develop a mathematical model of fuzzy information technology risk assessment for commercial projects regarding the security of their financing.

Method. The two-level fuzzy mathematical model to obtain aggregate risk assessment of the project to combine expert opinions in groups criteria in the final assessment and risk project is designed. The set of criteria for risk assessment projects of different origin, which is divided into groups, is formed.

The rules of belonging of the resulting term-evaluation for risk criteria groups for the knowledge base building are formulated. The presented model for risk assessment regarding the security of financing for the project, using a systematic approach based on: fuzzy models of the project evaluation, depending on its origin; fuzzy evaluation model of the industries in which commercial project will be implemented and aggregate risk assessment project valuation.

Result. The resulting study is the result of the risk assessment model commercial projects regarding the security of their financing, the release of which is linguistic assessment on the proposed project. The rationality of this assessment show the advantages of the model.

Conclusions. The paper solved scientific-practical task of development of a mathematical model of information technology for commercial projects risk assessment regarding the security of their financing. The model project evaluation of different origin in conditions of fuzzy expert evaluations based system of fuzzy sets and fuzzy logic.

The practical significance of the results, in particular the developed model for risk assessment regarding the security of funding for the project could be implemented in the work of investment and venture funds. The proposed model is a useful tool for increased safety and validity of investment decision-making entities which wish to finance commercial projects of various origins.

Keywords: projects, risks, linguistic evaluation, information technology, multicriteria, security financing, venture capital funds.

REFERENCES

1. Kelemen M. Problems of Protected Interests in the Security Sectors. Warszaw: *Wyzszej szkoly menedzerskiej w Warszawie im. Prof. Leszka J. Krzyzanowskiego*, 2015, P. 114.
2. Verbitska I. I. Ryzyk-menedzhment yak suchasna systema upravlinnya ryzykamy pidpryyemnytskykh struktur, *Stalyy rozvytok ekonomiky*, 2013, No. 5, pp. 282–291.
3. Kelemen M., Krizovsky S., Kocan S. Vyuzitie technologie LVA (vrstvena analyza hlasu) v bezpecnostnej praxi, na prevenciu proti podvodom u poisovacich a financnych spolocnosti. 1. vyd. Kosice: Vysoka skola bezpecnostneho manazerstva v Kosiciach, 2012, 100 p.
4. Crouhy M., Galai D., Mark R. Risk Management. New York, Mc G-H, 2012, 390 p.
5. Vitlinskyy V. V., Velykoivanenko H. I. Ryzykolohiya v ekonomitsi ta pidpryyemnytstvi: monohrafiya. Kiev, KNEU, 2004, 480 p.
6. Kuzmin O. YE., Podolchak N. YU., Matviyishyn, V. YE. Upravlinnya ta znyzhennya rivnya ryzykiv enerhozabezpechennya pidpryyemstv: monohrafiya. Lviv, politekhnika, Miski informatsiyni systemy, 2011, 235 p.
7. Balabanova N. V., Sokolov YU. A. K voprosu o sushchnosty ryskov, *Sovremennye naukoemkye tekhnolohyy*, 2005, No. 23, pp. 56–63.
8. Chernov V. H. Modely podderzhky prynyatyya reshenyy v ynvestytsyonnoy deyatelnosty na osnove aparata nechetkykh mnozhestv. Moscow, Horyachaya lynyya, Telekom, 2007, 312 p.
9. Onikiyenko S. Oblikovi metody otsinky investytsiynoyi pryvablyvosti, *Visnyk Natsbanku Ukrayiny*, 2001, No. 7, pp. 49–51.
10. Upravlenye ryskamy y shansamy korporatsyy. *ifel.ru.* Retrieved from http://www. ifel.ru/docs/RC_AN_ZA.pdf.
11. Abdulaeva, Z. Y., Nedosekyn, A.O. Stratehycheskyy analyz ynnovatsyonnykh ryskov. Sankt-Peterburg, Yzd-vo Polytekhn. unyversyteta, 2013, 150 p.
12. Malyar M., Polishchuk V. Choice and evaluation methodics of investment projects, *Kosicka bezpecnostna revue.* Kosice, 2013, No. 1, pp. 117–126.
13. Malyar M., Polishchuk V., Sharkadi M., Liakh I. Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty, *EEJET, Mathematics and cybernetics – applied aspects*, 2016, No. 3/4 (81), pp. 43–49. DOI: http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2016.71222
14. Malyar M., Polishchuk V. Ranking method of alternative options of inhomogeneous nature, *Kosicka bezpecnostna revue*, Kosice, 2016, No. 1, pp. 60–67.
15. Malyar M. M. Models and methods for multi-rational choice is limited: Monograph. Uzhgorod: RA «AUTDOR-Sharq», 2016, 222 p.

УДК 621.039:004.056:004.7

Погосов А. Ю.[1], Деревянко О. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры атомных электрических станций Института энергетики и компьютерно-интегрированных систем управления Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

[2]Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры атомных электрических станций Института энергетики и компьютерно-интегрированных систем управления Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

МОДЕЛИ ПРИКЛАДНОЙ ИНФОРМАТИКИ УЧЕТА КИНЕТИКИ КИБЕРНЕТИЧЕСКИХ УГРОЗ В СИСТЕМЕ ФИЗИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ АЭС

Актуальность. Рассмотрены актуальные подходы к превентивным оценкам и математическому моделированию процессов кибернетических атак и поступления внешних техногенных информационных угроз, которые могут быть направленны на систему физической защиты энергоблоков современных атомных электрических станций.

Цель работы – адаптация известных математических моделей кинетики кибератак для использования в системе информационной безопасности и физической защиты АЭС к современным и прогнозируемым условиям.

Метод. Предложен метод адаптации модельных зависимостей, отражающих кинетику кибератак условиям эксплуатации защищаемых объектов атомной энергетики. Для совершенствования модельных зависимостей предложено модифицировать классическую функцию Ферхюльста и при математическом моделировании кибернетических атак на объекты атомной энергетики использовать соответствующую трансформацию логистической кривой, которая имеет характерную особенность в виде четко выраженного максимума.

Результаты. Предсказано, что модельная зависимость потока внешних по отношению к АЭС кибернетических угроз может характеризоваться чередованием минимумов и максимумов, что указывает на возможность колебательного характера развивающегося процесса. Также выдвинута и обоснована гипотеза о том, что система физической, и в частности, кибернетической, защиты АЭС может характеризоваться временным запаздыванием, что с учетом возможного колебательного характера процесса поступления информационных угроз создает предпосылки для развития колебательной неустойчивости. Результаты, полученные в ходе исследований, носят прикладной характер, могут быть использованы для проведения широкомасштабных экспериментов и прогнозирования параметров направленных на АЭС возможных кибернетических угроз с целью их упреждения и превентивного обеспечения информационной безопасности современных ядерных энерготехнологий.

Выводы. Рекомендуемые к использованию модельные зависимости впервые адаптированы к условиям эксплуатации объектов атомной энергетики, учитывают факторы противодействия угрозам и обстоятельства, связанные со специфическим временным запаздыванием.

Впервые показано, что существует возможность как экстремального, так и колебательного характера зависимости интенсивности кибернетических атак, направленных на систему программно-технических средств информационной безопасности АЭС. Новый подход позволяет предположить реальность развития неустойчивого колебательного процесса в системе «нападение – защита» и дает возможность превентивной оценки соответствующих запасов устойчивости.

Практическая значимость состоит в том, что полученные результаты позволяют реалистично оценивать время наступления ожидаемых изменений текущей зависимости кибератак и использовать эти знания для организационно-технической подготовки средств защиты и заблаговременного упреждения IT-угроз.

Ключевые слова: прикладная информатика, информационная безопасность, физическая защита АЭС, математическое моделирование кибернетических атак на объекты атомной энергетики.

НОМЕНКЛАТУРА

IT – Information Technology (информационные технологии);

АЭС – Атомная электрическая станция;

K_i – уровень насыщения интенсивности кибератак;

r_i^m – параметр крутизны начального возрастания интенсивности кибератак;

t_0 – начальный момент времени;

t – текущее время;

$x_i(t)$ – интенсивность кибератак;

x_i^0 – начальное значение интенсивности кибератак;

γ – коэффициент пропорциональности, определяемый путем статистической верификации модели.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с международными рекомендациями [1] и требованиями законодательных актов Украины [2, 3 и др.] система физической защиты атомных электростанций (АЭС) предусматривает инженерно-технические мероприятия, которые проводятся с целью создания условий, направленных на минимизацию возможности совершения диверсий, краж или каких-либо других неправомерных изъятий радиоактивных материалов, снижения вероятности осуществления иных противоправных действий в отношении объектов атомной энергетики. Ранее считалось, что инженерно-технические сооружения, препятствующие проникновению посторонних лиц на территорию АЭС, являются надежным средством защиты этих объектов. Однако, с расширением применения информационных технологий [4] на объектах атомной энергетики, стало понятно, что к числу угроз для АЭС объективно могут быть отнесены и попытки кибернетических атак [5, 6] – компьютерно-интегрированных покушений на информационную безопасность систем, обеспечивающих нормальные условия

© Погосов А. Ю., Деревянко О. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-6

работы штатного оборудования и выполняющих функции управления и защиты.

Исходя из этого, в соответствии с Законом [2], к первоочередным требованиям, предъявляемым к системе физической защиты АЭС, теперь относится, в частности, создание условий для защиты информации с ограниченным доступом [7, 8], поскольку информационная безопасность таких объектов является необходимым условием обеспечения их физической защиты. Такого рода защита сигнальной (компьютерно-интегрированной) информации, как один из аспектов прикладной информатики, становится все более актуальной для атомной энергетики.

Математические модели, используемые в экспертных системах обеспечения информационной безопасности и физической защиты АЭС относятся к важным информационным ресурсам упреждения нежелательных IT-воздействий (кибернетических атак) и одним из факторов эффективности, надежности и безаварийности атомных электростанций. Анализ кинетики IT-угроз, направленных на АЭС, выявляет необходимость использования постоянно совершенствуемых математических моделей для адекватного обновления соответствующих экспертных систем компьютеризированной защиты атомных электростанций.

Объектом данного исследования является процесс отражения кибернетических атак на АЭС. Предметом исследования являются математические подходы и модели, описывающие кинетику кибератак на объекты атомной энергетики.

Целью работы является адаптация известных математических моделей кинетики кибератак для использования в системе информационной безопасности и физической защиты АЭС к современным и прогнозируемым условиям.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для достижения цели в работе ставится и решается следующая двуединая задача: во-первых, – проанализировать возможность повышения адекватности моделирования кинетики направленных на АЭС выявленных и (или) блокированных внешних IT-угроз, во-вторых – определить пути совершенствования базовых математических моделей для оценки информационной безопасности АЭС.

Формальная постановка задачи заключается в следующем. Требуется проведение анализа существующих математических зависимостей, используемых в теории и практике аналитического моделирования сигнальных потоков, направленных на системы информационной безопасности охраняемых объектов для описания интенсивности $x_i(t)$ следования событий, каждое из которых в общем случае представляет собой некоторый акт направленного действия, имеющего нежелательный характер или нежелательные последствия и поэтому предусматривающий технически организованное противодействие или упреждение со стороны системы безопасности. Анализ должен выявить недостатки используемых аналитических зависимостей, не позволяющие адекватно оценивать поток информационно-технологических угроз для таких специфических объектов как атомные электростанции. По результатам анализа должен быть предложен подход к усовершенствованному аналитическому моделированию и предложена приемлемая математическая зависимость для описания интенсивности кибератак на АЭС, использование которой при моделировании нежелательных актов воздействия в рамках сигнально-информационного процесса позволит адекватно учитывать особенности информационных угроз для объектов атомной энергетики. При постановке задачи как исходное положение принимается, что информация – это какие-либо сведения и (или) данные, которые могут быть сохранены на материальных носителях (в том числе в форме сигналов) либо тем или иным образом отображены в электронном (компьютерно-адаптированном) виде. При решении поставленной задачи необходимо исходить из того, что под доступом к информации понимается возможность получения, обработки и преобразования информации, ее блокирование и (или) нарушение ее целостности. Соответственно, как условие должно быть принято положение, что ограничение доступа к информации может достигаться путем пресечения или предотвращения несанкционированных операций с компьютерными данными, если это имеет место или даже если существует риск (потенциальная опасность) проведения таких кибернетических операций.

В качестве результата исследования должны быть найдены новые возможности дальнейшего усовершенствования известных базовых математических моделей кинетики отражаемых угроз и предложены варианты адаптации известных в области прикладной информатики подходов к оценке информационной безопасности объектов атомной энергетики.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Обзор опубликованных источников информации, на которые опираются наши исследования, показывает, что моделирование изменений во времени количества кибернетических инцидентов при рассмотрении классических задач информационной безопасности существенным образом зависит от специфики объекта, информационное пространство которого окружается системой защиты [1–9]. Однако, в большинстве случав, в области прикладной информатики для моделирования кинетики компьютерных угроз типа «программных вирусов» (во многом подобной кинетике размножения биологических вирусов, ферментативной кинетике и фармакокинетике), до недавнего времени – по крайней мере, к началу XXI века – апробированной и приемлемой являлась неспецифическая математическая модель, описывающая процесс изменения *x(t)* на основе аналитической зависимости Ферхюльста [7]:

$$x_i(t) = \frac{K_i}{1 + \frac{K_i - x_i^0}{x_i^0} e^{-r_i^m (t - t_0)}}, \qquad (1)$$

которая, с учетом соответствующих характерных параметров, определяет форму логистической кривой, графически представленной на рис. 1. Такая зависимость свойственна процесам в системе с неразвитой системой

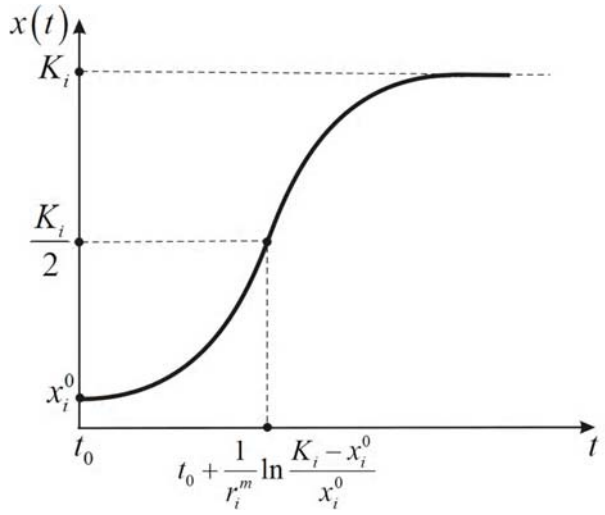


Рисунок 1 – Формообразующие параметры логистической кривой, отражающей кинетику организованных кибернетических атак в неспецифических задачах прикладной информатики для незащищенных объектов

защиты того или иного объекта от возможных внешних угроз и атак, в том числе – кибернетических атак, условия моделирования процесса поступления которых, начиная с первых основополагающих публикаций, подробно рассмотрены в [4].

Известно, что для полуограниченного интервала времени, ориентировочно относящегося к прошлому, на котором $x(t) \le K_i$ /2, участок графика, приведенный на рис. 1, в общих чертах отвечает экспоненциальной зависимости, характерной для процесса репликации биологических вирусов при отсутствии противодействующих факторов (противовирусных препаратов) или для процесса размножения компьютерных «вирусов» при отсутствии обезвреживающих программных средств (антивирусного программного обеспечения). Соответственно, начальный участок кривой, используемый при моделировании во многих задачах, практически совпадает с графической интерпретацией зависимости Мальтуса-Фибоначчи, ранее применявшейся для прогнозирования роста численности биологических популяций и предумышленных технических угроз незащищенным компьютерным программным ресурсам на начальном этапе развития кибернетики, как это было показано в [10].

Исходя из работ, опубликованных в последние годы, которые подробно рассмотрены и обобщены в [9], можно заключить, что интенсивность оперативных ограничений и противодействий, реализуемых программно-техническим (программно-компьютерным) комплексом системы физической безопасности АЭС, безусловно должна отвечать интенсивности организованных кибератак $x(t)$, а этого можно добиться лишь учитывая специфику защищаемого объекта и условия его функционирования. Исходя из этого, следует признать, что наиболее значимой в методическом плане, из числа работ, опубликованных в последние годы, представляется парадигма моделирования И. В. Кононович [9], трансцендентно устраняющая недостатки известных ранее подходов и методов благодаря продвижению прогрессивной идеологии пересмотра модели изменения $x(t)$ в новых специфических условиях формирования системы глобальной кибернетической безопасности.

Можно заключить, что анализ известных разработок в целом показывает, что известные подходы, апробированные в области прикладной информатики по отношению к широкому перечню объектов, ранее пригодные для решения широкого класса задач моделирования процессов возникновения инцидентов нарушения информационной безопасности объектов и успешно применявшиеся прежде в неспецифических задачах, нельзя признать удовлетворительными с учетом специфики эксплуатации АЭС в современных условиях. Исходя из этого положения, должны быть найдены возможности для математического моделирования процесса кибератак на АЭС, которые бы обеспечили учет как специфики защищаемых объектов атомной энергетики, так и изменение условий поступления информационных угроз по сравнению с предшествующим периодом.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для преодоления недостатков известных подходов к моделированию в современных условиях процесса следования кибератак на объекты атомной энергетики используем информационные материалы, относящиеся к промежутку времени после реперной точки с ординатой K_i / 2, отмеченной на кривой, приведенной на рис. 2.

Для открытого интервала времени, ориентировочно обращенного в будущее, на котором $x(t) \ge K_i$ / 2, соответствующий сегмент графика отвечает зависимости, связанной с актуальным представлением о развитии процесса внешних кибернетических атак на физически (и кибернетически в том числе) защищаемые объекты. Исходя из имеющихся информационных материалов, методически важно обратить внимание на то, что рассматриваемый участок приведенного графика в общих чертах совпадает с графической интерпретацией уравнения ферментативной кинетики Михаэлиса-Ментен для биологических систем, обладающих способностью к внутренним противодействиям внешней активности [11].

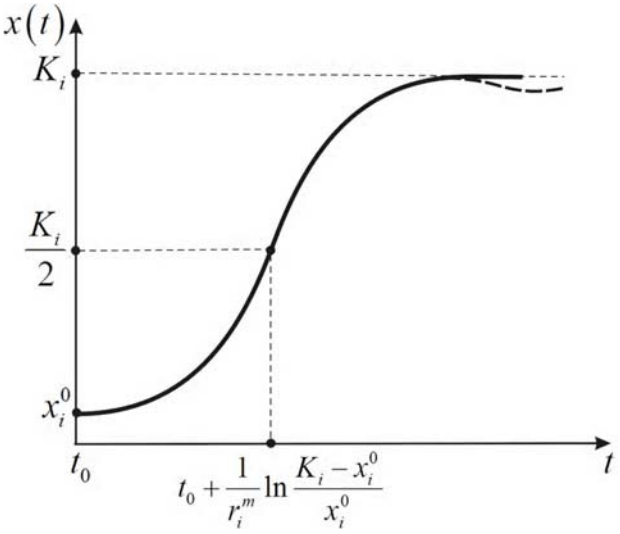


Рисунок 2 – Прогнозируемое изменение формы кривой, отражающей кинетику кибератак для случая объектов с ограниченным противодействием внешним угрозам (отклонение обозначено пунктирной линией)

Применение метода обобщения статистических данных и метода прямого сравнения позволяет обнаружить, что динамика поведения логистической функциональной зависимости (1), сочетано обладающей свойствами зависимости Мальтуса (Фибоначчи-Мальтуса) и зависимости Михаэлиса-Ментен, определяется тремя параметрами: x_i^0, K_i и r_i^m. Этим параметрам придается соответствующий физический смысл: первый из указанных параметров (x_i^0) определяет начальное значение численности кибератак на i-й (программный) объект защиты x_i при $t = t_0$, второй из указанных параметров указывает на уровень насыщения, к которому стремится $x_i(t)$, иначе – на граничную для данного объекта численность попыток воздействия, а параметр r_i^m задает крутизну начального возрастания рассматриваемой функциональной зависимости.

Формальный подход к обработке имеющегося информационного материала на основе дедуктивной логики позволяют также выяснить математический, а затем и технический смысл величин r_i^m и K_i (важный для понимания организации информационной безопасности конкретного технологического модуля защиты в пределах промплощадки АЭС). В этой связи необходимо отметить, что зависимость удельной скорости прироста информационных атак на защищаемый объект от плотности активно реализуемых программно-технических возможностей защиты объекта, которая имеет вид $r_i\left(x_i\right) = r_i^m - \gamma x_i$, является разложением в ряд Тейлора удельной скорости прироста атак на объект по степеням, зависящим от плотности активизации программно-технических возможностей конкретных защитных средств x_i, которое представлено членами ряда с нулевой и первой степенью. Компонента этого разложения, которая отвечает нулевой степени ($r_{i_0} = r_i^m$), не зависит от x_i, а компонента, которая отвечает первой степени ($r_{i_1} = -\gamma x_i$) зависит от x_i, причем $r_{i_0} \to 0$ при $x_i \to 0$. Поэтому при малой начальной плотности x_{i_0} первичное возрастание возможностей защиты будет почти экспоненциальным с показателем степени r_i^m (как это полагалось в начальный период развития атомной энергетики), так что этот параметр является, по сути, оценкой защитного потенциала объекта, который оснащен средствами противодействия внешним угрозам. Параметр K_i, согласно формальной логике, характеризует емкость потенциала защищаемого объекта, и может быть выражен соответствующей предельной численностью отражаемых атак.

Как показывает проведенный анализ, адекватно (соответственно условиям текущего времени) выбирая величины x_i^0, K_i и r_i^m, можно более или менее удовлетворительно описывать кинетику изменений программно-аппаратных возможностей кибератак и защиты от них конкретного объекта. Однако описанную зависимость логистического характера следует рассматривать лишь как одну из возможных математических моделей кинетики в системе «злоумышленник – защитник», относящейся к АЭС. На наш взгляд, такая модель может рассматриваться как базовая – она, при решении поставленной задачи верна в первом приближении, но не учитывает некоторые дополнительные (специфические) условия функционирования таких сложных (многокомпонентных и многопараметрических) нестационарных объектов как энергоблоки АЭС, которые характеризуются нелинейной динамикой реагирования на внешние воздействия [12].

Для усовершенствования базовой модели и повышения степени ее адекватности реальным условиям эксплуатации АЭС, на основе информационных материалов, являющихся частью современного уровня техники и используемых нами в данной работе, было проведено предварительное экспериментальное исследование, результаты которого привели к пониманию возможностей разработки усовершенствованной модели.

Установлено, что в первую очередь запаздывание может быть связано с переподготовкой контингента специалистов и обновлением «антивирусного» программного обеспечения, то есть с организационно-техническими обстоятельствами. Анализируя различные математические модели из числа рассмотренных, можно констатировать, что накладываемые при моделировании граничные условия ранее должным образом не учитывали фактор запаздывания в кинетике поступления и отражения угроз информационной безопасности в системе физической защиты АЭС, но для повышения адекватности моделирования должны в полной мере учитываться.

Кроме того, были выполнены опытные аналитические исследования, в которых – как еще один модифицирующий фактор зависимости (1) – рассматривалось временное запаздывание [14] в системе «угроза – противодействие» (или, в техническом аспекте прикладной информатики, «ресурс нападения – ресурс защиты»). Действительно, подразделения физической защиты энергоблоков АЭС, укомплектование специалистами по системному и оперативному управлению и эксплуатации комплекса инженерно-технических средств, происходит заблаговременно до начала монтажа и наладки автоматизированной информационно-управляющей системы, и соответствующий персонал проходит обучение и проверку профессиональной пригодности еще до введения такой системы в эксплуатацию [3]. Такие меры, отвечающие замыслу комплексного обеспечения защиты, являются целесообразными и необходимыми, так как могут исключить злоумышленное использование закладных устройств – то есть скрытно установленных технических средств, которые способны создать угрозу для важной сигнальной информации. Подобные меры позволяют в значительной мере избежать установки также программных закладок – то есть тайно внедренных программ, которые создают угрозу информации, содержащейся в компьютерах. Во многих случаях такой подход позволяет избежать инсталляции «компьютерных вирусов» – программных продуктов, которые могут неконтролируемо размножаться и распространяться, и обладают способностями к нарушению целостности информации, повреждению программного обеспечения

и (или) изменению режима работы вычислительной техники в составе информационно-управляющей системы. Описанные организационные меры неизбежно концептуально предусматривает определенное запаздывание в системе «угроза – противодействие». При этом, и фактор запаздывания, и другие модифицирующие факторы могут учитываться в комплексе для повышения адекватности (достоверности) моделирования.

Указанные обстоятельства приводят, на наш взгляд, к необходимости в задачах прикладной информатики при моделировании процессов кинетики информационных угроз, направленных на АЭС, использовать уравнение Хатчисона – как модификацию ранее использовавшихся моделей. Исходя из изложенного, с учетом времени запаздывания τ числа воздействий $x(t)$ на защищаемый объект, может быть предложено использование такой зависимости:

$$\frac{dx}{dt} = r_i^m \left(1 - \frac{x(t-\tau)}{K_i}\right) x(t). \qquad (2)$$

Модель, представленная зависимостью (2), может быть использована при оценке эффективности системы физической защиты объектов атомной энергетики, поскольку она учитывает реальные условия их эксплуатации, связанные с фактором запаздывания технологически важных информационных событий.

Как с научной, так и с практической точки зрения небезынтересно отметить, что колебательный процесс, если он развивается при наличии действия фактора запаздывания защитной реакции на создающее угрозу внешнее воздействие, может, при определенных обстоятельствах, привести к неустойчивому колебательному процессу. Колебательная неустойчивость может сопровождаться запредельно ожидаемым ростом кибератак. Прогнозирование такого риска является при моделировании интенсивности кибератак стратегически важным [15]. Очевидно, что возникновение колебаний возможно лишь после точки перегиба кривой, где вторая производная функциональной зависимости $x(t)$ меняет знак. Поэтому в рамках рассматриваемого моделирования методически необходимой является регулярная проверка изменения знака зависимости:

$$\ddot{x} = r^m \dot{x} - 2\gamma x\dot{x} = \gamma\dot{x}\left(\frac{r^m}{\gamma} - 2x\right) = \gamma\dot{x}\left(K - 2x\right). \qquad (3)$$

Данное положение учитывалось в ходе экспериментирования, методически дополнившего теоретические разработки.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

План проведения экспериментов включал качественный и поэтапный количественный анализ предложенных модельных зависимостей. При этом в ходе экспериментальной проверки теоретических положений использовалась заимствованная нами модификация программы расчетов, разработанная в [9] на основе блок-схемы Simulink для модели Лотки-Вольтерры [13].

С учетом ограниченной фактической базы данных по статистике кибератак на объекты атомной энергетики (поскольку моделирование процесса организованных угроз относится не к прошедшему времени, а к настоящему и будущему) нами в рамках качественной оцени модельных зависимостей сначала был предпринят пилотный (объектно-ориентированный, на основе ограниченной выборки событий) эксперимент, в котором организованное усиление противодействия информационно защищаемого объекта, как и ожидалось, сопровождалось спадом интенсивности поступления информационных атак. Акты противодействия поступавшим атакам формировались в классическом формате «хищник–жертва» на основе процедур, апробированных в области социальной динамики взаимодействия противостоящих объектов, разделенных дистанционно (но не информационно).

На следующем этапе был проведен дополнительный анализ предложенных модельных зависимостей с привлечением пилотных экспериментальных исследований. Этот этап эмпирического анализа был связан с изучением изменений интенсивности $x(t)$ на расширенном (открытом) временном интервале. Сопоставление с известными численными данными, полученными ранее в области нелинейной динамики [9], позволили в ходе экспериментов проверить предположение о возможности переноса закономерностей кинетики отражения угроз в экосистеме «популяция хищников – популяция жертв», описываемых моделью Лотки-Вольтерры в рамках теории борьбы за существование, на технические объекты, исследуемые в данной работе. Этому способствовала формализация, которую обеспечивает подход, основанный на компьютерном (численном) моделировании.

В ходе экспериментирования учитывалось запаздывание, которое может быть связано с «человеческим фактором» и процедурой принятия решений, имеющими отношение к защите информации на АЭС. В ходе экспериментов проверка (знаковая оценка) выражения (3) позволяла установить значения времени для первой точки перегиба $x(t)=K_i/2$, и подготовиться к возможности упреждения более активного (ускоренного) повышения интенсивности информационных угроз в ожидании последующих точек перегиба модельной кривой [16] или к достижению значениями $x(t)$ экстремального изменения.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты качественной и количественной экспериментальной проверки показали, что спад интенсивности кибернетических угроз является закономерным. Опытным путем было установлено, что он может быть связан с сокращением «информационного ареала» субъектов, заинтересованных в организации угроз (например, – вследствие изменения и перераспределения сил влияния) и с изменением мотивации «агрессора», что нами учитывалось при моделировании. Результаты исследования показали, что эти обстоятельства имеют прямое отношение к информационному пространству, в котором функционирует атомная энергетика с учетом временных циклов работы энергоблоков АЭС. Характерной особенностью экспериментально полученных результатов, отображенных точками, определяющими кривую, которая показана на рис. 3 (наряду с аналитическими зависимостями, показанными сплошными линиями), является экстремум – максимум интенсивности информационных атак на защищаемый объект.

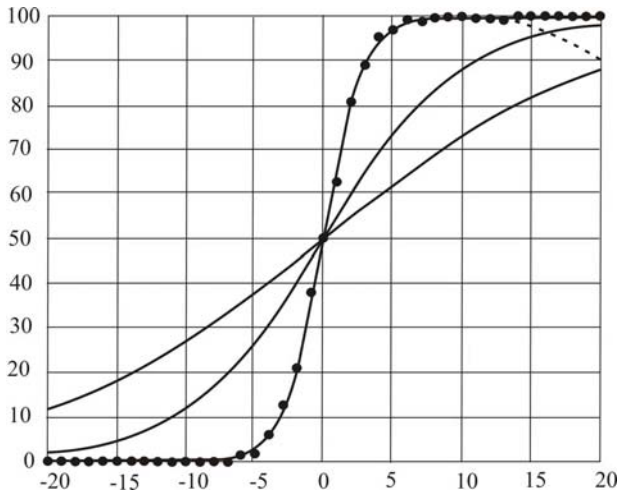


Рисунок 3 – Варианты функциональных зависимостей интенсивности кибератак на объекты атомной энергетики (ось абсцисс – время в годах, ось ординат – доля максимальной интенсивности в процентах)

Экстремальный характер модельной зависимости, связанный с трансформацией логистической кривой не только учитывает реальные условия осуществления угроз, направленных на защищаемый (противодействующий) объект, но и указывает на то, что имеется возможность прогнозировать значение времени (например, на основе тривиальной теоремы Ферма об исследовании функции на экстремум), после которого интенсивность кибератак должна начать снижаться. Это важно в связи с тем, что можно заблаговременно выяснить – когда появляется дополнительный ресурс времени на усовершенствование и обновление информационно-технических возможностей в системе физической защиты объекта для противодействия внешним угрозам и наращивания емкости защитного потенциала.

Результаты пилотных экспериментов и результаты последующего сопоставительного анализа, подтвердившие адекватность предложенного подхода к моделированию, позволяют выполнить перенос полученных закономерностей на техническую систему в области информационной безопасности «ресурс нападения – ресурс защиты» в условиях работы различных объектов атомной энергетики. Результатом экспериментов стало также понимание значимости колебаний параметра $x(t)$, для адекватного прогнозирования процесса поступления кибератак на АЭС и соответствующего противодействия информационным угрозам. То, что, согласно результатам экспериментов, колебательный процесс может действовать как модифицирующий фактор формы логистической кривой, отвечающей зависимости (1) в прикладных задачах информатики и в области задач физической защиты АЭС, создает предпосылки для правильной организации информационной защиты энергоблоков АЭС на протяжении всего времени их функционирования, с учетом продления проектного срока службы до 60 лет.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В порядке обсуждения результатов выполненной работы, следует отметить, что анализ результатов проведенных теоретических и экспериментальных исследований показывает, что предложенные модельные зависимости при анализе кинетики кибератак и соответствующего их блокирования или активного отражения в системе информационной безопасности энергоблоков АЭС представляются наиболее адекватными из числа аналогов, известных в прикладной информатике.

Предложенный подход, целесообразность которого нашла подтверждение в ходе теоретических и экспериментальных исследований, позволяет распространить примененную математическую идеологию на область действия других факторов влияния на интенсивность кибератак, направленных на АЭС.

Так, к факторам информационной безопасности АЭС, особенности влияния которых являются менее зачимыми и требуют отдельных дополнительных (уточняющих) исследований, относится то, что каждый из фигурирующих в модельных зависимостях операндов в общем случае является нестационарным и зависит от многих, зависящих от времени показателей, специфичных для объектов атомной энергетики (срок ввода в эксплуатацию, срок службы, коэффициент использования установленной мощности, стоимостные показатели и др.). Это обстоятельство может быть учтено в ходе дальнейших исследований.

Необходимо также заметить, что анализ устойчивости колебательных процессов $x(t)$ и запасов устойчивости этих процессов представляется отдельной задачей, интересной как с научной, так и с практической точки зрения. Эта задача рассматривается авторами в других публикациях [17, 18] и не является предметом данной работы, но, на наш взгляд, должна быть здесь упомянута в порядке обсуждения.

ВЫВОДЫ

Предложен поход к решению научной проблемы прикладной информатики, относящейся к выбору адекватной модельной зависимости для анализа кинетики кибернетических атак на программно-технический комплекс информационной безопасности в составе системы физической защиты АЭС. Установлена возможность повышения достоверности моделирования. Рекомендуемые к использованию модельные зависимости впервые адаптированы к условиям эксплуатации объектов атомной энергетики, учитывают факторы противодействия угрозам и обстоятельства, связанные со специфическим временным запаздыванием. Определены новые пути совершенствования базовых математических моделей для их практического применения в технологиях обеспечения физической защиты АЭС.

Научная новизна заключается в развитии и уточнении ранее не принятых во внимание положений в области прикладной информатики, в порядке применения их к системам физической защиты АЭС, а именно: существует возможность как экстремального, так и колебательного характера зависимости интенсивности кибернетических атак, направленных на систему программно-технических средств информационной безопасности АЭС; адекватно адаптированное моделирование позволяет предположить реальность развития неустойчивого колебательного процесса в системе «нападение – защита» и дает возможность превентивной оценки соответствующих запасов устойчивости.

Полученные научные и практические результаты могут позволить при моделировании кинетики возникновения и отражения внешних кибернетических атак, направленных на систему физической безопасности АЭС, оценивать время наступления ожидаемых изменений текущей зависимости кибератак и использовать эти знания для организационно-технической подготовки средств защиты и заблаговременного упреждения IT-угроз.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках тематики этапа «Підвищення ефективності, надійності та безпеки роботи, в тому числі радіаційної, основного та допоміжного обладнання АЕС» в рамках госбюджетной работы «Дослідження можливостей удосконалення сучасних енерготехнологій і подальшої модернізації основного та допоміжного обладнання АЕС» (№ гос.регистрации 0116U004924), выполняемой на кафедре «Атомные электростанции» Одесского национального политехнического университета.

Авторы выражают благодарность коллегам – доценту кафедры информатики и управления защитой информационных систем В. Г. Кононовичу и начальнику службы физической защиты ВП «Рівненська АЕС» И. Я. Дерлюку – за предоставленную нам возможность ознакомления с опубликованными материалами, которые были использованы в наших исследованиях и учтены в процессе работы над данной статьей, а также за обсуждение вопросов, имеющих отношение к физической безопасности АЭС и общим аспектам информационной безопасности технических объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рекомендации по физической ядерной безопасности, касающиеся физической защиты ядерных материалов и ядерных установок (INFCIRC/225/REVISION 5) / Серия изданий МАГАТЭ по физической ядерной безопасности, № 13. – МАГАТЭ, Вена. – 2012. – 69 с.
2. Закон України «Про фізичний захист ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання» от 19 октября 2000 р. №2064-III // Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2001. – №1, ст. 18.
3. Наказ Державної інспекції ядерного регулювання України 05.12.2011 №176 / Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 23 грудня 2011 р. за №1505/20243.
4. Советов Б. Я. Информационные технологии : учеб. для ВУЗов / Б. Я. Советов, В. В. Цехановский. – М. : Высш. шк., 2003. – 263 с.
5. Киселев В. В. Кибервойна как основа гибридной операции / В. Киселев, А. Костенко // Армейский сборник. – 2015. – Т. 257, № 11. – С. 3–6.
6. Головко В. В. Первая кибернетическая атака на объект атомной энергетики / В.В. Головко // Наука и техника. – 2016. – № 4. – С. 74–78.
7. Келети Т. Основы ферментативной кинетики / Т. Келети. – М. : Мир, 1990. – 350 с.
8. Про внесення змін до Закону України «Про інформацію» // Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2011, № 32, ст. 313.
9. Кононович І. В. Динаміка кількості інцидентів інформаційної безпеки / І. В. Кононович // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2014. – Т. 4, № 1. – С. 35–43.
10. Мышкис А. Д. Элементы теории математических моделей. Изд. 2-е, испр. / А. Д. Мышкис. – М. : Едиториал УРСС, 2004. – 191 с.
11. ДСТУ 2226-93 Автоматизовані системи. Терміни та визначення.
12. Малинецкий Г. Г. Современные проблемы нелинейной динамики / Г. Г. Малинецкий, А. Б. Потапов. – М. : Эдиториал УРСС, 2000. – 326 с.
13. Трубецков Д. И. Феномен математической модели Лотки-Вольтерры и сходных с ней / Д. И. Трубецков // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. – 2011. – Вып. 2, Т. 19. – С. 69–88.
14. Долгий Ю. Ф. Математические модели динамических систем с запаздыванием : учеб. пос. / Ю. Ф. Долгий, П. Г. Сурков. – Екатеринбург : Изд-во Урал ун-та, 2012. – 122 с.
15. Гайворонський М. В. Безпека інформаційно-комунікаційних систем / М. В. Гайворонський, О. М. Новіков. – К. : Видавнича група ВНУ, 2009. – 608 с.
16. Богуш В. М. Теоретичні основи захищених інформаційних технологій : навч. посіб. / В. М. Богуш, О. А. Довидьков, В. Г. Кривуца. – К. : ДУІКТ, 2010. – 454 с.
17. Деревянко О. В. Предаварийные физические процессы и надежный теплоотвод в ядерных энергоустановках : монография / О. В. Деревянко, А. В. Королев, А. Ю. Погосов. – Одесса : Наука и техника, 2014. – 268 с.
18. Погосов О. Ю. Додаткові технічні можливості для удосконалення систем безпеки АЕС і зниження ризику негативного впливу об'єктів ядерної енергетики на довкілля / О. Ю. Погосов, О. В. Дерев'янко // Ядерна енергетика та довкілля. – 2016. – №1 (7). – С. 13–16.

Статья поступила в редакцию 16.01.2017.
После доработки 06.02.2017.

Погосов О. Ю.[1], Дерев'янко О. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, професор, професор кафедри атомних електричних станцій Інституту енергетики і компьютерно-інтегрованих систем управління Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

[2]Канд. техн. наук, старший викладач кафедри атомних електричних станцій Інституту енергетики і компьютерно-інтегрованих систем управління Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

МОДЕЛІ ПРИКЛАДНОЇ ІНФОРМАТИКИ ВРАХУВАННЯ КІНЕТИКИ КІБЕРНЕТИЧНИХ ЗАГРОЗ В СИСТЕМІ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ АЕС

Актуальність. Розглянуто актуальні підходи до превентивних оцінок і математичного моделювання процесів кібернетичних атак і надходження зовнішніх техногенних інформаційних загроз, які можуть бути спрямовані на систему фізичного захисту енергоблоків сучасних атомних електричних станцій.

Мета роботи – адаптація відомих математичних моделей кінетики кібератак для використання в системі інформаційної безпеки та фізичного захисту АЕС до сучасних і прогнозованих умов.

Метод. Запропоновано метод адаптації модельних залежностей, що відображають кінетику кібератак умов експлуатації об'єктів атомної енергетики, що захищаються. Для вдосконалення модельних залежностей запропоновано модифікувати класичну функцію Ферхюльста і при математичному моделюванні кібернетичних атак на об'єкти атомної енергетики використовувати відповідну трансформацію логістичної кривої, яка має характерну особливість у вигляді чітко вираженого максимуму.

Результати. Передбачено, що модельна залежність потоку зовнішніх по відношенню до АЕС кібернетичних загроз може характеризуватися чергуванням мінімумів і максимумів, що вказує на можливість коливального характеру процесу, що розвивається. Також висунута і обґрунтована гіпотеза про те, що система фізичного, і зокрема, кібернетичного, захисту АЕС може характеризуватися тимчасовим запізненням, що з урахуванням можливого коливального характеру процесу надходження інформаційних загроз створює передумови для розвитку коливальної нестійкості. Результати, отримані в ході досліджень, носять прикладний характер, можуть бути

використані для проведення широкомасштабних експериментів і прогнозування параметрів спрямованих на АЕС можливих кібернетичних загроз з метою їх попередження та превентивного забезпечення інформаційної безпеки сучасних ядерних енерготехнологій.

Висновки. Рекомендовані до використання модельні залежності вперше адаптовані до умов експлуатації об'єктів атомної енергетики, враховують фактори протидії загрозам і обставини, пов'язані зі специфічним тимчасовим запізненням.

Вперше показано, що існує можливість як екстремального, так і коливального характеру залежності інтенсивності кібернетичних атак, спрямованих на систему програмно-технічних засобів інформаційної безпеки АЕС. Новий підхід дозволяє припустити реальність розвитку нестійкого коливального процесу в системі «напад - захист» і дає можливість превентивної оцінки відповідних запасів стійкості.

Практична значущість полягає в тому, що отримані результати дозволяють реалістично оцінювати час настання очікуваних змін поточної залежності кібератак і використовувати ці знання для організаційно-технічної підготовки засобів захисту і завчасного попередження ІТ-загроз.

Ключові слова: прикладна інформатика, інформаційна безпека, фізичний захист АЕС, математичне моделювання кібернетичних атак на об'єкти атомної енергетики.

Pogosov A. Yu.[1], Derevianko O. V.[2]

[1]Dr.Sc., Professor, Professor of Nuclear Power Plants Department, Odessa National Polytechnical University, Odessa, Ukraine

[2]Ph.D., Senior Lecturer of Nuclear Power Plants Department, Odessa National Polytechnical University, Odessa, Ukraine

APPLIED INFORMATICS MODEL OF KINETICS ACCOUNTING OF CYBERNETIC THREATS IN NPP PHYSICAL PROTECTION SYSTEM

Context. The topical approaches to preventive estimations and mathematical modeling of cyber attacks processes and supply of external technological informational threats were considered, which may be directed on the physical security system of modern nuclear power plant units.

Objective – is an adaptation of known mathematical models of cyber attacks kinetics for use in the system of information security and physical protection of nuclear power plants to modern and foreseeable conditions.

Method. The method of model dependencies adaptation was proposed, which reflects the kinetics of cyberattacks to the modern operating conditions of protected nuclear facilities was proposed. To improve the model dependencies it was proposed to modify the classic Ferhulst function and, in mathematical modeling of cyber attacks on nuclear power facilities, to use the appropriate transformation of the logistic curve, which has distinctive feature of a well-defined maximum.

Results. It was predicted that the model dependence of flow external to NPP cyber threats can be characterized by the alternation of maxima and minima, which indicates the possibility of an oscillatory character of the developing process. Also was put forward and substantiated the hypothesis that the system of physical and, in particular, cybernetic, NPP protection can be characterized by a time lag that in view of possible oscillatory character of information threats admissions process creates the preconditions for the development of oscillatory instability. The results obtained in the research are of applied nature, they can be used to carry out large-scale experiments and forecasting parameters of possible cyber threats aimed at the NPP for the purpose of pre-emption and preventive maintenance of information safety of modern nuclear energy technologies.

Conclusions. Recommended for use model dependences were first adapted to the conditions of operating conditions of nuclear power facilities, take into account the factors to counter threats and circumstances associated with a specific time delay.

It was shown for the first time that there is an opportunity both extreme and oscillatory dependence nature of the cyber attacks intensity, which are focused on software and hardware system of NPP information safety. The new approach allows to assume the reality of the unstable oscillation process in the "attack – defense" system and provides an opportunity of preventive assessment of the stability stocks.

The practical significance lies in the fact that the results allow to realistically assess the time of onset of expected cyber attacks current dependence changes and to use this knowledge for organizational and technical preparation of remedies and early anticipation of IT-threats.

Keywords: applied computer science, information security, NPP physical security, mathematical simulation of cyber attacks on nuclear power facilities.

REFERENCES

1. Recommendations on Nuclear Security, on the physical protection of nuclear materials and nuclear facilities (INFCIRC/225/ REVISION 5) / IAEA Nuclear Security Series, № 13, IAEA, Viena, 2012, 69 p.
2. The Law of Ukraine "On the physical protection of nuclear facilities, nuclear materials, radioactive waste and other sources of ionizing radiation" on October 19, 2000. №2064-III, *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR),* 2001, No. 1, st. 1).
3. Order of the State Nuclear Regulatory Inspectorate of Ukraine 05.12.2011 №176 / Registered with the Ministry of Justice of Ukraine 23.12.2011, №1505/20243.
4. Sovetov B. Ya., Cekhanovsky V. V. Informacionnye tekhnologii : Ucheb. Dlia VUZov. Moscow, Vyssh. Shk., 2003, 263 p.
5. Kiseliov V., Kostenko A. Kibervojna kak osnova gibridnoj operacii, *Armejskij sbornik,* 2015, Vol. 257, No. 11, pp. 3–6.
6. Golovko V. V. Pervaia kiberneticheskaia atatka na ob'ekt atomnoj energetiki, *Nauka I tekhnika*, 2016, No. 4, pp. 74–78.
7. Keleti T. Osnovy fermentativnoj kinetiki. Moscow, Mir, 1990, 191 p.
8. Pro vnesennia zmin do Zakonu Ukrainy "Pro Informaciiu", *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR),* 2011, No. 32, ст. 313.
9. Kononovych I. V. Dynamilka kil'kosti incydentiv informacijnoi bezpeky, *Informatyka ta matematychni metody v modeliuvanni.* Odesa, 2014. Vol. 3, No. 3, pp. 35–43.
10. Myshkis A. D. Elementy teorii matematicheskikh modelej. Izd. 2-e, ispr. Moscow, Editorial URSS, 2004, 191 p.
11. DSTU 2226-93 Avtomatyzovani systemy. Trminy ta vyznachennia.
12. Malineckij G. G., Potapov A. B. Sovremennye problem nelinejnoj dinamiki. Moscow, Editorial URSS, 2000, 326 p.
13. Trubeckov D. I. Fenomen matematicheskoj modeli Lotki-Volterry I skhodnykh s nej, *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenij, Prikladnaia nelinejnaia dinamika,* 2011, Vyp. 2, Vol. 19, pp. 69–88.
14. Dolgij Yu. F., Surcov P. G. Matematicheskie modeli denamicheskikh system s zapazdyvaniem : ucheb. posobie. Ekaterinburg: Izd-vo Uralskogo un-ta, 2012, 122 p.
15. Gajvorons'kyj M. V., Novikov O. M. Bezpeka informacijno-kommunikacijnykh system. Kiev, Vydavnycha grupa VNU, 2009, 608 p.
16. Bogush V. M., Dovyd'kov O. A., Kryvutsa V. G. Teoretychni osnovy zakhyschenykh informatsijnykh tekhnologij : navch. posibn. Kiev, DUIKT, 2010, 454 p.
17. Derevianko O. V. Koroliov A. V., Pogosov A. Yu. Predavarijnye fizicheskie protsessy i nadiozhnyj teplootvod v iadernykh energoustanovkakh : monographiia. Odessa, Nauka i tekhnika, 2014, 268 p.
18. Pogosov O. Yu., Derevianko O. V. Dodatkovi tehnichni mozhlyvosti dlia udoskonalennia system bezpeky AES i znyzhennia ryzyku negatyvnogo vplyvu ob'ektiv iadernoi energetyky na dovkillia, *Yaderna energetyka ta dovkillia,* 2016, No. 1(7), pp. 13–16.

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

УДК 681.518:004.93.1'

Москаленко В. В.[1], Коробов А. Г.[2]

[1]Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна
[2]Аспірант кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету, Суми, Україна

ІНФОРМАЦІЙНО-ЕКСТРЕМАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА МІСЦЕВОСТІ З ОПТИМІЗАЦІЄЮ ПАРАМЕТРІВ ЕКСТРАКТОРА ОЗНАК

Актуальність теми статті полягає в тому, що питання вибору параметрів екстрактора ознак та алгоритму класифікаційного аналізу за умов апріорної невизначеності, ресурсних та інформаційних обмежень є недостатньо дослідженим і в повній мірі досі не вирішене.

Мета статті – підвищити в інформаційному та вартісному сенсі ефективність функціонування автономної системи розпізнавання об'єктів на місцевості, що функціонує в режимах навчання та екзамену за умов обмежених обсягів навчальної вибірки шляхом оптимізації параметрів екстрактора ознак та класифікатора спостережень.

Методи дослідження базуються алгоритмах цифрової обробки та аналізу зображень для формування дескрипторів об'єктів інтересу, на принципах математичної статистики та теорії інформації для оцінки функціональної ефективності вирішальних правил, положеннях теорії популяційних алгоритмів для оптимізації параметрів системи та сканування зображень.

Результати – розроблений алгоритм машинного навчання з грубим двійковим кодуванням спостережень та модифікація ройового алгоритму оптимізації параметрів функціонування системи розпізнавання дозволяє отримати за вибірками малого обсягу вирішальні правила з достовірністю, що наближається до граничного максимального значення. При цьому експериментально показано перевагу використання ройового алгоритму сканування зображень, яка полягає у трикратному підвищенні швидкодії порівняно з відомими алгоритмами RASW та ESS.

Висновки. Запропоновано метод синтезу інформаційно-екстремального класифікатора зображень з грубим двійковим кодуванням розріджених гістограм частоти появи візуальних слів, що дозволяє одержати обчислювально ефективні вирішальні правила. Удосконалено метод популяційного пошуку для настроювання параметрів екстрактора ознак, що дозволяє отримати оптимальні в інформаційному та вартісному сенсі параметри функціонування системи розпізнавання за декілька ітерацій роботи алгоритму. Практична цінність результатів полягає в отриманні робочих алгоритмів проектування здатної навчатися системи розпізнавання зображень, що функціонує за умов ресурсних та інформаційних обмежень.

Ключові слова: словник ознак розпізнавання, алфавіт класів розпізнавання, інформаційний критерій, оптимізація, машинне навчання, рій частинок.

НОМЕНКЛАТУРА

C – трудомісткість вирішальних правил;

$C_{\min}$ – стартова трудомісткість вирішальних правил;

c_1 – перша константа прискорення частинки ройового пошуку оптимуму;

c_2 – друга константа прискорення частинки ройового пошуку оптимуму;

d_m – кодовий радіус гіперсферичного контейнера класу X_m^o;

$d(x_m^* \oplus x)$ – кодова відстань від центру контейнера класу X_m^o до вектора x;

$E_{\max}$ – граничне значення інформаційного машинного навчання;

$\overline{E}$ – усереднений за алфавітом класів КФЕ машинного навчання;

$< e_1,...,e_{\xi_1},...,e_{\Xi_1} >$ – генотипні параметри функціонування, які впливають на параметри алгоритмів екстракції ознак розпізнавання;

$< f_1,...,f_{\xi_3},...,f_{\Xi_3} >$ – фенотипні параметри функціонування, які впливають на геометрію контейнерів класів розпізнавання;

$< g_1,...,g_{\xi_2},...,g_{\Xi_2} >$ – генотипні параметри функціонування, які впливають на параметри розподілу векторів-реалізацій образу в бінарному просторі ознак;

© Москаленко В. В., Коробов А. Г., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-7

G – область допустимих значень параметрів функціонування системи;

$G_{x,y}$ – область допустимих значень координат скануючого вікна;

G_{μ} – область допустимих значень функції належності об'єкта інтересу;

J_m – критерій ефективності машинного навчання;

K – коефіцієнт крутизни (за замовчуванням K=4).

m – номер поточного класу розпізнавання;

M – потужність алфавіту (кількість класів) системи розпізнавання об'єктів;

N – кількість ознак у векторах- реалізаціях навчальної вибірки;

n – кількість векторів – реалізацій у навчальній вибірці;

$N_W^{\min}$, $N_W^{\max}$ – мінімальна та максимальна потужність алфавіту візуальних слів відповідно;

P_j, $Pbest_j$ – поточна та найкраща персональна позиції j-го агента відповідно;

$\Delta_H(P_j)$, $\Delta_H(Pbest_j)$ – параметр порогу відкидання локальних ознак поточної та найкращої персональної позицій j-го агента відповідно;

$\Delta_W(P_j)$, $\Delta_W(Pbest_j)$ – параметр потужності словника візуальних слів поточної та найкращої персональної позицій j-го агента відповідно;

$T_H^{\min}$, $T_H^{\max}$ – мінімальний та максимальний поріг відкидання локальних ознак відповідно.

w – константа інерції частинки ройового алгоритму оптимізації;

x_m – геометричний центр його гіперсферичного контейнера класу X_m^o;

$y_{i,\max}$ – максимальне значення i-ї ознаки в навчальній вибірці;

α_m – помилка першого роду;

β_m – помилка другого роду;

$\delta_{\max}$ – граничне значення ширини поля контрольних допусків;

δ_i – ширина поля контрольних допусків для i-ї ознаки розпізнавання;

ε – будь-яке мале, наближене до нуля, додатне число.

$\mu_m(x,y)$ – значення функції належності вектора-реалізації, обчислена у вікні з координатами (x,y) до m-го класу із алфавіту $\{X_m^o\}$;

ІЕІ-технологія – інформаційно-екстремальна інтелектуальна технологія;

КФЕ – критерій функціональної ефективності;

СКД – система контрольних допусків.

ВСТУП

Відомі алгоритми глибинного машинного навчання для ідентифікації об'єктів інтересу у відеопотоці даних є мало придатними для використання в автономних системах аеро моніторингу території, охоронних системах відеоспостереження та роботехнічних системах різного призначення, оскільки потребують використання значного обсягу обчислювальних ресурсів та навчальних даних. У задачах співставлення орієнтирів, прив'язки зображень до ортофотопланів, детектування та супроводження об'єктів набуло поширення використання локальних ознак і дійсночислових (з комою) або бінарних дескрипторів для їх опису, які характеризуються стійкістю до геометричних та фотометричних перетворень [1, 2]. При цьому сформовані на їх основі глобальні дескриптори характеризуються відносно невисокою обчислювальною складністю та достатньою узагальнюючою здатністю для забезпечення репрезентативності навчальних вибірок малого обсягу [2, 3]. Проте питання визначення оптимальних параметрів локальних та глобальних дескрипторів досі є малодослідженим і на практиці його вирішення зводиться до ручного налаштування.

Одним із шляхів одночасного забезпечення максимальних достовірності розпізнавання та оперативності функціонування системи в режимах навчання та пошуку об'єктів інтересу у відеопотоці даних є розробка інтегральних критеріїв ефективності системи та застосування алгоритмів пошукової оптимізації. При цьому найбільший інтерес представляють ройові алгоритми, які характеризуються високою оперативністю і низькою ймовірністю застрягання в локальних екстремумах фітнес-функції. Проте загальна оперативність функціонування залежить як від структури та параметрів екстрактора ознак так і від обраного алгоритму класифікаційного аналізу.

У статті розглядається задача інформаційного синтезу системи розпізнавання об'єктів на місцевості з оптимізацією параметрів екстрактора ознак, основаного на локальних та глобальних дескрипторах зображень. При цьому для оптимізації в інформаційному та вартісному розумінні параметрів вирішальних правил системи розпізнавання та для знаходження координат об'єкта інтересу на кадрі зображення запропоновано використовувати алгоритм рою частинок.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай сформовано алфавіт класів розпізнавання $\{X_m^o \mid m=\overline{1,M}\}$, що характеризують об'єкти інтересу та фонову місцевість, і навчальна матриця у вигляді двовимірного масиву кольорових зображень $\{y_m^j \mid j=\overline{1,n_m}, m=\overline{1,M}\}$, де n_m – кількість зображень класу X_m^o.

Дано структурований вектор просторово-часових параметрів функціонування системи ідентифікації об'єктів інтересу на місцевості, який у загальному випадку має структуру

$$g=< e_1,...,e_{\xi_1},...,e_{\Xi_1}, g_1,...,g_{\xi_2},...,g_{\Xi_2}, f_1,...,f_{\xi_3},...,f_{\Xi_3} >,$$

$$\Xi_1+\Xi_2+\Xi_3=\Xi. \quad (1)$$

При цьому відомі обмеження на відповідні параметри функціонування:

$$R_{\xi_1}(e_1,...,e_{\xi_1},...,e_{\Xi_1})\le 0;\ R_{\xi_2}(g_1,...,g_{\xi_2},...,g_{\Xi_2})\le 0;$$

$$R_{\xi_3}(f_1,...,f_{\xi_3},...,f_{\Xi_3})\le 0.$$

Необхідно в процесі машинного навчання визначити оптимальні значення координат вектора (1), які забезпечують максимум усередненого за алфавітом класів розпізнавання інформаційного критерію функціональної ефективності (КФЕ) навчання системи та мінімальну обчислювальну трудомісткість вирішальних правил

$$g^* = \arg\max_G \left\{ \frac{\overline{E}}{E_{\max}} \cdot \frac{C_{\min}}{C} \right\}.$$

При функціонуванні системи розпізнавання безпосередньо в робочому режимі необхідно за максимумом функції належності вектора-реалізації, обчисленим у вікні пошуку, до одного з класів із заданого алфавіту $\{X_m^o\}$ визначити координати об'єкта інтересу в кадрі відепотоку

$$< x^*, y^*, m^* >= \arg \max_{G_{xy} \cap G_\mu} \{\mu_m(x, y)\}, \; m = \overline{1, M}.$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

При розробці здатних до навчання автономних мобільних систем розпізнавання візуальних образів високої розмірності набуває важливого значення розробка невибагливих до обчислювальних ресурсів алгоритмів аналізу даних з адаптацією до умов спостереження. У працях [1–3] було запропоновано підходи, основані на застосуванні принципів лінгвістики до аналізу зображення за його найбільш помітними фрагментами, які асоціюють з візуальними словами. При цьому визначення координат таких фрагментів відбувається за результатами роботи детекторів ключових точок, таких як Harris-Laplace, Hessian-Laplace, Fast Hessian, SUSAN та DoG, а їх векторний опис здійснюється за допомогою дійсночислових чи бінарних дескрипторів, набільш популярними серед яких є SIFT, SURF, MSER, BRIEF та FREAK [4, 5]. Проте досі не існує формалізованих правил щодо вибору значень порогових параметрів, що відповідають за врахування чи відкидання локальних ознак, та параметрів, що впливають на розмірність кожного рівня подання ознак в глобальних дескрипторах.

Формування глобальних дескрипторів зображення у вікні пошуку згідно принципів лінгвістики полягає у використанні мішка візуальних слів (Bag of Visual Words, BoW) та фраз (Bag of Visual Phrase, BoP), де словник візуальних слів формується за результатами кластер-аналізу дескрипторів знайдених ключових точок [6, 7]. При цьому багаторівневе представлення ознакового опису в екстраторі, основаному на BoP, може бути побудоване за принципами *n*-грамм, де фрази формуються шляхом об'єднання *k*-найближчих ключових точок, або на основі локальних графів, які формуються за допомогою тріенгуляції Delaunay [7–9].

Ефективність застосування екстратора ознак визначається обраним алгоритмом класифікаційного аналізу. У працях [8, 10] досліджується використання методу класифікації результатів екстракції ознак на основі опорних векторів, однак даний метод потребує ручного настроювання параметрів алгоритму, є чутливим до шуму і йому характерне уповільнення навчання та зниження точності вирішальних правил у випадку перетину класів в просторі ознак. У працях [11, 12] показано, що перспективним напрямком синтезу здатних навчатися класифікаторів є застосування грубого двійкового кодування ознак на основі системи контрольних допусків (СКД), та логарифмічних інформаційних мір ефективності вирішальних правил. Це пов'язано з можливістю побудови в рамках геометричного підходу простих вирішальних правил в бінарному просторі ознак, перехід до якого відбувається за допомогою простих операцій порівняння. При цьому згладжуючий ефект логарифмічної інформаційної міри підвищує ймовірність знаходження глобального максимуму її функції.

Для визначення координат об'єкта інтересу на кадрі відеопотоку можуть бути використані різноманітні алгоритми сканування, серед яких найбільш простим у реалізації є алгоритм ковзного вікна, що полягає у послідовному скануванні кадру з заданим кроком по координатах *x* та *y* [13]. При цьому за умов апріорної невизначеності щодо масштабу зображення високої розмірності алгоритм ковзного вікна є трудомістким і не придатним для практичного використання у системах реального часу. У праці [14] було запропоновано алгоритм адаптивного ковзного вікна (RASW), де крок переміщення скануючого вікна пошуку змінюється залежно від значення функції належності класифікатора, що дозволяє дещо підвищити оперативність алгоритму за рахунок збільшення кроку сканування на фонових ділянках зображення. У праці [15] для локалізації об'єкта інтересу на кадрі було запропоновано алгоритм ефективного пошуку підвікна (ESS), оснований на алгоритмі гілок та границь, що є придатним для використання у багатьох практичних застосуваннях реального часу. Проте ускладнення екстрактора ознак обумовлює актуальність дослідження нових підходів до підвищення оперативності сканування зображення. Одним з перспективних підходів до сканування зображень є популяційні алгоритми пошуку, однак їх реалізація потребує розробки фітнес-функції на основі функції належності використаного класифікатора та визначення настройок пошукового алгоритму [16].

Таким чином, для підвищення оперативності та точності алгоритмів розпізнавання об'єктів на місцевості актуальними є розробка і дослідження популяційних алгоритмів оптимізації параметрів функціонування екстрактора ознак, класифікатора та сканера зображень як в інформаційному так і вартісному сенсах. При цьому перспективним напрямком синтезу системи класифікаційного аналізу зображень є застосування двійкового кодування ознак на основі контрольних допусків в процесі максимізації інформаційної міри ефективності вирішальних правил.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для формування вхідного математичного опису системи розпізнавання, основаного на пошуці візуальних слів та фраз, пропонується використовувати SURF алгоритм екстракції локальних ознак [4, 5]. В цьому методі ключові точки шукаються за допомогою матриці частинних похідних – матриці Гессе. Детермінант матриці Гессе досягає екстремуму в точках максимальної зміни градієнту яскравості, що дозволяє успішно детектувати

плями, кути і краї ліній. При цьому інваріантність до масштабу досягається шляхом використання різномасштабних фільтрів. Після кластер-аналізу дескрипторів ключових точок, що описують поведінку градієнтів навколо точок, для кожного зображення може бути сформована гістограма частот як візуальних слів так і фраз. Візуальні фрази довжиною k+1 пропонується формувати шляхом пошуку для кожної точки найближчих в системі координат (x, y) k-візуальних слів. Для скорочення розмірності алфавіту візуальних фраз у роботі пропонується виконати видалення фраз, що з'являються більше ніж в одному класі розпізнавання.

Алгоритм грубого двійкового кодування векторів спостережень полягає у порівнянні значення i-ї ознаки з відповідним нижнім $A_{L,i}$ та верхнім $A_{U,i}$ межами несиметричного поля контрольних допусків класу розпізнавання, які розраховуються за формулами

$$A_{L,i} = y_{i,\max}\left[1-\frac{\delta_i}{\delta_{\max}}\right],$$

$$A_{U,i} = y_{i,\max}.$$

Формування бінарної навчальної матриці $\{x_{m,i}^{(j)} \mid i=\overline{1,N};\ j=\overline{1,n_m};\ m=\overline{1,M}\}$ здійснюється за правилом

$$x_{m,i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & if \quad A_{L,i} \le y_{m,i}^{(j)} \le A_{U,i}; \\ 0, & else. \end{cases}$$

Обчислення значень координат двійкового еталонного вектора x_m, відносно якого відбувається побудова в радіальному базисі контейнерів класів, здійснюється за правилом

$$x_{m,i} = \begin{cases} 1, \text{ if } & \dfrac{1}{n_m}\sum_{j=1}^{n_m} x_{m,i}^{(j)} > \dfrac{1}{n}\sum_{m=1}^{M}\sum_{j=1}^{n_m} x_{m,i}^{(j)}; \\ 0, \text{ if } & \text{else.} \end{cases}, \quad i=\overline{1,N\cdot M}$$

Як критерій ефективності машинного навчання класифікатора розглядається модифікація інформаційної міри Кульбака [11, 12]:

$$J_m = \frac{1-(\alpha_m^{(k)}+\beta_m^{(k)})}{\log_2(2+\varepsilon)+r\log_2 10} * \log_2\left[\frac{2-(\alpha_m^{(k)}+\beta_m^{(k)})+\varepsilon}{(\alpha_m^{(k)}+\beta_m^{(k)})+\varepsilon}\right]. \quad (2)$$

Оптимізація параметрів поля контрольних допусків $\{\delta_{m,i}\}$ та інших генотипних параметрів полягає в пошуку екстремуму функції КФЕ (2) в гіперпросторі рішень. При цьому як пошуковий алгоритм в даній роботі пропонується використати рій частинок (Particle Swarm Optimization, PSO), який характеризується простотою реалізації та інтерпретабельністю [16]. Оптимізація словника ключових фрагментів та фенотипних параметрів вирішальних правил (радіуси контейнерів класів) може здійснюватися методом прямого перебору з заданим кроком, оскільки кількість кроків такого пошуку є відносно малою.

У режимі екзамену рішення про належність вектора-реалізації x одному з класів алфавіту $\{X_m^o\}$ приймається шляхом обчислення геометричної функції належності:

$$\mu_m^*(x) = \max_{\{m\}}\{\mu_m(x)\},$$

в якій $\mu_m(x)$ являє собою функцію належності вектора x до контейнера класу X_m^o, яка обчислюється за правилом:

$$\mu_m(x) = 1-\frac{d(x_m^* \oplus x)}{d_m^*}.$$

Трудомісткість інформаційно-екстремального машинного навчання збільшується швидше квадрату кількості навчальних векторів, тому для підвищення оперативності навчання використовується зведення багатокласової класифікації до серії двохкласових за принципом «кожен проти кожного», де будується M*(M–1)/2 двохкласових класифікаторів [10]. Результат класифікації класифікатором, що розрізняє m-й та k-й класи подається у вигляді значення дискримінантної функції μ_{mk}, використовуючи рівність $\mu_{mk} = -\mu_{km}$ для скорочення обчислень. При цьому дискримінантна функція двохкласового інформаційно-екстремального класифікатора має вигляд:

$$\mu_{mk}(x) := \begin{cases} \mu'_m(x) & \textit{якщо} \quad \mu'_m(x) > \mu'_k(x), \\ -\mu'_k(x) & \textit{якщо} \quad \textit{інакше}. \end{cases}$$

в якій $\mu'_m(x)$ є нормалізованим значення функції належності та обчислене за формулою:

$$\mu'_m(x) = \frac{\exp(\mu_m(x)-\mu_{\max}(x))}{\sum_{k=1}^{M}\exp(\mu_k(x)-\mu_{\max}(x))},$$

при цьому $\mu_{\max}$ визначає максимальне значення функції належності та розраховується за правилом

$$\mu_{\max}(x) = \max_m\{\mu_m(x)\}.$$

Віднесення екзаменаційного вектора ознак x до одного з класів алфавіту $\{X_m^o\}$ відбувається шляхом голосування відповідних двохкласових класифікаторів. Результуючу функцію належності до m-го класу можна подати у вигляді

$$\mu''_m(x) = \sum_{k\ne m}\frac{1}{1+\exp(-K*\mu_{mk}(x))}.$$

Таким чином, алгоритм навчання системи ідентифікації об'єктів на місцевості полягає в оптимізації параметрів формування вхідного математичного опису та параметрів вирішальних правил шляхом пошуку глобального максимуму інформаційного КФЕ (2). При цьому для підвищення оперативності навчання використовується зведення багатокласової класифікації до серії двохкласових.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо процедуру настроювання потужності алфавіту візуальних слів N_W та порогу відкидання ло-

кальних ознак T_H зображення як процедуру популяційного пошуку максимуму фітнес-функції в двовимірному просторі рішень. При цьому агент популяції містить параметри Δ_W та Δ_H для розрахунку параметрів алгоритму екстракції ознак за правилами

$$N_W = N_W^{\min} + \frac{\Delta_W}{\Delta_{MAX}}\left(N_W^{\max} - N_W^{\min}\right);$$

$$T_H = T_H^{\max} - \frac{\Delta_H}{\Delta_{MAX}}\left(T_H^{\max} - T_H^{\min}\right).$$

Ефективність кожної частинки популяційного алгоритму, тобто її близькість до глобального оптимуму, вимірюється за допомогою наперед визначеної фітнес-функції, роль якої в даному випадку виконує функція КФЕ. Кожна j-та частинка крім її позиції P_j зберігає наступну інформацію: V_j – поточна швидкість частинки, $Pbest_j$ – краща персональна позиція частинки. Краща персональна позиція j-ї частинки – це позиція j-ї частинки, в якій значення фітнес функції для частинки було максимальним на поточний момент часу. Крім цього, з метою пошуку глобального екстремуму фітнес-функції найкраща частинка шукається в усьому рої, а її позиція позначається як $Gbest$.

Проте розглянутий вище ройовий алгоритм пошуку спрямований переважно на видалення заважаючих ознак розпізнавання і відповідно на підвищення усередненого за алфавітом класів КФЕ навчання. З метою додаткового скорочення потужності словника ознак шляхом видалення решти неінформативних ознак потрібно виконати деяку модифікацію ройового алгоритму пошуку. Для цього слід модифікувати процедуру оновлення значень найкращої персональної $Pbest_j$ позиції агентів пошуку за правилом (3), в якому цільова функція $E(...)$ є усередненим значенням функції КФЕ:

$$if \left| E(P_j) - E(Pbest_j) \right| < \varepsilon,$$

$$if \sqrt{\Delta_H^2(P_j) + \Delta_W^2(P_j)} < \sqrt{\Delta_H^2(Pbest_j) + \Delta_W^2(Pbest_j)},$$

$$Pbest_j := P_j. \quad (3)$$

Аналогічно потрібно модифікувати процедуру оновлення значень найкращої глобальної $Gbest_j$ позиції агентів пошуку

$$if \left| E(Pbest_j) - E(Gbest) \right| < \varepsilon,$$

$$if \sqrt{\Delta_H^2(Pbest_j) + \Delta_W^2(Pbest_j)} < \sqrt{\Delta_H^2(Gbest) + \Delta_W^2(Gbest)},$$

$$Gbest := Pbest_j. \quad (4)$$

Для оптимізації параметрів екстрактора ознак, СКД та пошукового сканування зображення необхідно задати параметри настройки популяційного алгоритму. Запропоновані настройки алгоритму рою частинок приведені у табл. 1.

Пошук максимуму інформаційного критерію функціональної ефективності машинного навчання повинен здійснюватися в робочій області визначення його функції, обмежена нерівностями $\alpha_m < 0{,}5$, $\beta_m < 0{,}5$ та $d_m < d(x_m \oplus x_c)$, де d_m – радіус гіперсферичного контейнера класу X_m^o, $d(x_m \oplus x_c)$ – кодова відстань між усередненим вектором класу X_m^o та найближчого до нього усередненим вектором класу X_c^o. На графіках оптимізації радіусу контейнерів класів розпізнавання робоча область заштриховується.

Оцінку ефективності алгоритму сканування зображення пропонується здійснювати шляхом вимірювання середнього часу пошуку об'єкта інтересу та підрахунку відсотку правильних спрацювань. Порівняння розробленого алгоритму сканування з відомими алгоритмами RAWS та ESS буде здійснюватися за цими оцінками.

Як вхідні дані для алгоритму навчання розглядаються фотографії розміром 100x100 пікселів для 3-х об'єктів інтересу та фонової місцевості без об'єктів інтересу. Для алгоритму сканування використовуються фотографії місцевості формату Full HD (1920 x 1080 пікселів) із зображенням об'єктів інтересу, отримані на тій же висоті, на якій робилися навчальні зображення. Опис локальних особливостей зображень пропонується здійснювати дескрипторами SURF [4].

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Відповідно до параметрів пошуквого алгоритму, заданих у табл. 1, було виконано настроювання екстрактора ознак за вибірковими даними 4-х класів розпізнавання з обсягом вибірки $n_m = 100$. На рис. 1 показано кращі рішення, отримані за ройовим алгоритмом з урахуванням модифікацій (3) та (4) протягом 5-ти ітерацій настроювання екстрактора.

Таблиця 1 – Параметри ройового алгоритму оптимізації для різних контурів системи

Контур	Максимальна швидкість частинок, $V_{\max,i}$	Перша константа прискорення, c_1	Друга константа прискорення, c_2	Кількість агентів, n_a	Вага інерції, w	Кількість ітерацій, K_{ITER}
Настроювання екстрактора	2	1	1	5	0,95	5
Оптимізація СКД	2	1	1	100	0,95	50
Сканування зображення	2	1	1	10	0,95	5

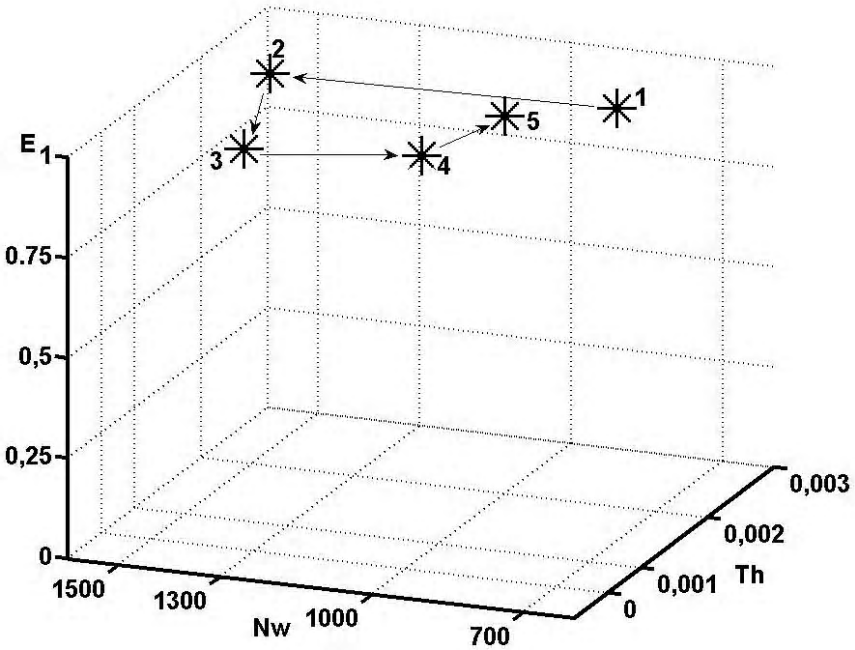


Рисунок 1 – Тривимірний графік залежності інформаційного критерію (8) від кращих позицій агентів рою протягом 5-ти ітерацій ройового алгоритму настроювання параметрів екстрактора ознак

Аналіз рис. 1 показує, що кращі позиції частинок протягом 5-ти ітерацій спочатку розміщувалися в області з більшою кількістю кластерів і високим порогом відкидання локальних ознак, але остаточно алгоритм збігся до більш компромісного варіанту, який забезпечує граничне значення інформаційного критерію і характеризується середніми значеннями параметрів настройки екстрактора. При цьому оптимальна кількість кластерів становить $N_W^* = 1000$, а оптимальний поріг відкидання локальних ознак рівний $T_H^* = 0{,}002$.

В табл. 2 показано динаміку зміни інформаційного критерію та точністних характеристик вирішальних правил при оптимальних настройках екстрактора ознак в процесі ройової оптимізації полів контрольних допусків на значення ознак.

Аналіз табл. 2 показує, що практично з першої ітерації ройового пошуку було отримано високодостовірні вирішальні правила, однак граничне значення інформаційного критерію було отримано на третій ітерації.

Результати сканування 100 тестових зображень за відомими та запропонованим алгоритмами показано в табл. 3. При цьому ройовий та RAWS алгоритми використовують незмінне значення розміру скануючого вікна (100x100 пікселів), розраховане на основі матриці внутрішніх калібровочних параметрів камери та відомої висоти спостереження [12].

Таблиця 2 – Результати популяційного алгоритму оптимізації полів контрольних допусків

Номер ітерації	Значення критерію (8)	Помилка першого роду	Помилка другого роду
1	0,750	0	0,009
2	0,898	0	0,002
3	1,000	0,000	0,000
4	1,000	0,000	0,000
5	1,000	0,000	0,000

Таблиця 3 – Результати сканування тестових зображень

Алгоритм сканування	Середній час обробки одного зображення, с	Відсоток хибних спрацювань, %	Відсоток пропусків,%
RAWS	0,687	0	5
ESS	0,811	0	0
Ройовий алгоритм	0,208	0	1

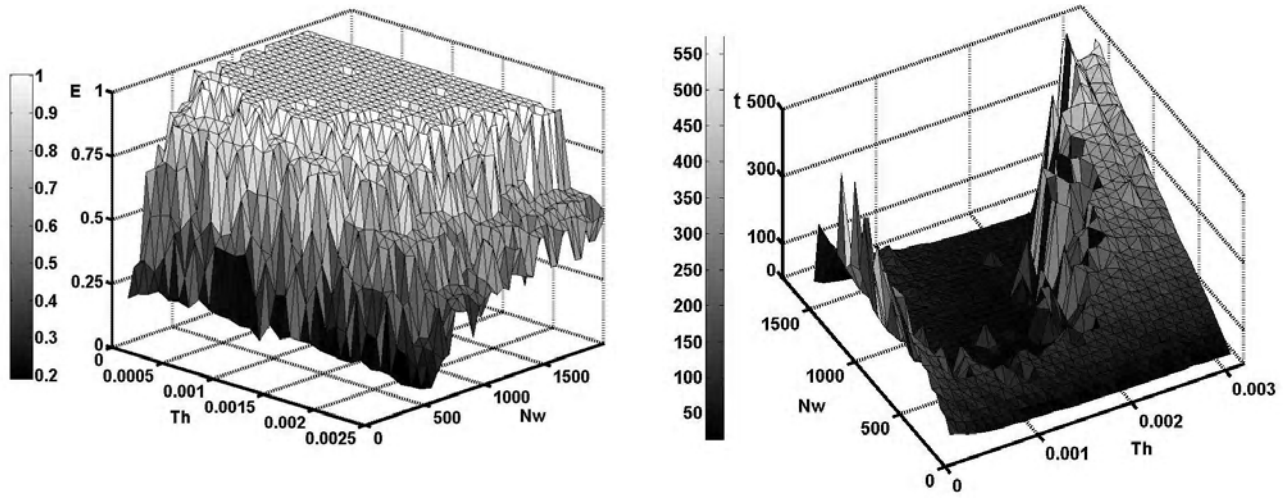
Аналіз табл. 3 показує, що використання апріорної інформації про умови спостереження за об'єктом інтересу та ройового алгоритму сканування зображення дозволяє з прийнятною для практичного використання точністю детектувати об'єкти інтересу. При цьому ройовий алгоритм більше ніж втричі швидше за інші алгоритми здійснює пошук, забезпечуючи швидкість сканування Full HD відеопотоку до 5 кадрів/с.

Таким чином, запропонована модифікація алгоритму пошуку роєм частинок дозволяє за невелику кількість кроків знайти оптимальні у вартісному та інформаційному сенсах вирашальні правила. При цьому застосування ройової оптимізації контрольних допусків на значення ознак та ройового сканування зображення дозволяє здійснювати обробку відопотоку у форматі Full HD з прийнятною для практичного використання точністю та швидкістю.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Оцінка ефективності процедури настроювання в процесі машинного навчання потребує більш детального аналізу складових цієї ефективності. Для цього розглянемо область значень параметрів настройки екстрактора ознак та відповідні оцінки функціональної ефективності і часу навчання системи розпізнавання (рис. 2).

Аналіз рис. 1 та рис. 2 показує, що оптимальні значення параметрів екстрактора ознак, що визначаються на кожному кроці настроювання, знаходяться біля межі, вихід за яку супроводжується зниженням оперативності



а б

Рисунок 2 – Тривимірні графіки залежності мір продуктивності навчання від параметрів настройки екстрактора ознак: *а* – інформаційний критерій функціональної ефективності вирішальних правил (8); *б* – час машинного навчання в секундах

та функціональної ефективності машинного навчання системи розпізнавання об'єктів на місцевості. При цьому вирішальні правила мають геометричний зміст і відновлюються у бінарному просторі Хеммінга в процесі максимізації інформаційного критерію (2).

Таким чином, запропоновані алгоритми оптимізації параметрів функціонування системи ідентифікації об'єктів на місцевості дозволяють підвищити ефективність системи як в інформаційному так і вартісному сенсах, що важливо за умов обмежених обчислювальних ресурсів та навчальних даних.

ВИСНОВКИ

Наукова новизна одержаних результатів:

– вперше запропоновано метод синтезу інформаційно-екстремального класифікатора з грубим двійковим кодуванням розріджених гістограм частоти появи візуальних слів на вхідному зображенні, що дозволяє одержати обчислювально ефективні вирішальні правила;

– удосконалено метод популяційного пошуку методом рою частинок для настроювання параметрів екстрактора ознак шляхом модифікації процедур оновлення персональної на глобальної кращих позицій агентів рою, що дозволяє отримати оптимальні в інформаційному та вартісному сенсі параметри функціонування системи розпізнавання за декілька ітерацій роботи алгоритму.

Практична цінність отриманих результатів для безпілотної авіації полягає у формуванні сучасної науково-методологічної основи проектування здатних навчатися автономних систем розпізнавання образів, що функціонують за умов ресурсних та інформаційних обмежень. При цьому результати імітаційного моделювання підтверджують високу ефективність отриманих вирішальних правил при розпізнаванні об'єктів інтересу на кадрах відеопотоку.

ПОДЯКИ

Робота виконана на базі лабораторії інтелектуальних систем кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету при частковій фінансовій підтримці держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України ДР № 0109U006555 та ДР № 52.17.02-01.15/16 ЗП.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. 3D Object Recognition Based on Image Features / [K. Alhamzi, A Survey, M. Elmogy, S. Barakat] // International Journal of Computer and Information Technology. Faizabad, India: Research and Publication Unit. – 2014. – Vol. 3, Issue 3. – P. 651–660.
2. Хуршудов А. А. Обнаружение локальных пространственных структур для распознавания изображений / А. А. Хуршудов // Научно-технические ведомости СпбГУ. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2014. – № 5(205). – С. 72–82.
3. Siddhartha C. Learning Hierarchical Bag of Words using NaiveBayes Clustering / C. Siddhartha, K Shailesh, C. V. Jawahar // 11th Asian Conference on Computer Vision, Daejeon, Korea, November 5–9, 2012: proceedings. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – P. 382–395. DOI: 10.1007/978-3-642-37331-2_29.
4. SURF: Speeded Up Robust Features / [H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. V. Gool] // Computer Vision and Image Understanding (CVIU). – 2008. – Vol. 110, No. 3. – P. 346–359.
5. Kachikian S. A Review of detector descriptors' on Object Tracking / S. Kachikian, M. Emadi // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. – 2016. – Vol. 5, Issue 7. DOI: 10.15662/IJAREEIE.2016.0507002.
6. Shiliang Z. Descriptive Visual Words and Visual Phrases for Image Applications / Z. Shiliang, Q. Tian, G. Hua, Q. Huang, S. Li // 17th ACM international conference on Multimedia, Beijing, China October 19–24, 2009: proceedings. – ACM New York, NY, USA, 2009. – P. 75–84. DOI: 10.1145/1631272.1631285.
7. Yongtao Y. Bag-of-visual-phrases and hierarchical deep models for traffic sign detection and recognition in mobile laser scanning data / [Y. Yongtao, L. Jonathan, W. Chenglu and other] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 113. – P. 106–123. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.005.
8. Glauco V. P. From Bag-of-Visual-Words to Bag-of-Visual-Phrases using *n*-Grams / V. P Glauco, J Agma, M. Traina // SIBGRAPI '13 Proceedings of the 2013 XXVI Conference on Graphics, Patterns and Images, Arequipa, Peru, August 05–08, 2013 : proceedings. – IEEE Washington, DC, USA, 2013. – P. 304–311. DOI: 10.1109/SIBGRAPI.2013.49.
9. Multi-Layer Local Graph Words for Object Recognition / [S. Karaman, J. Benois-Pineau, R. Mé gret, A. Bugeau] // Advances in Multimedia Modeling: 18th International Conference on MultiMedia Modeling, Klagenfurt, Austria. January 2012: proceedings. – Springer Berlin Heidelberg, 2012. – P. 29–39. DOI: 10.1007/978-3-642-27355-1_6.

10. Nadhir B. H. Bag of Words Based Surveillance System Using Support Vector Machines / B. H. Nadhir, H. Osama // International Journal of Security and Its Applications – 2016. – Vol. 10, № 4. – P. 331–346. DOI: 10.14257/ijsia.2016.10.4.30.
11 Москаленко В. В. Інформаційно-екстремальне машинне навчання системи ідентифікації об'єктів на місцевості / В. В. Москаленко, А. Г. Коробов // Журнал інженерних наук. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. H1–H7.
12. Москаленко В. В. Оптимізація параметрів функціонування інтелектуальної системи ідентифікації об'єктів на місцевості / В. В. Москаленко, А. Г. Коробов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016. – № 2. – С. 32–39.
13. Zoran S. S. Sliding window object detection without spatial clustering of raw detection responses / S. S. Zoran, K. I. Kova č ek // 10th IFAC Symposium on Robot Control International Federation of Automatic Control Dubrovnik, Croatia September 5–7: proceedings. – IFAC. Elsevier Ltd,2012 – Vol. 45, Issue 22. – P. 114–119. DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00192.
14. RASW: A run-time adaptive sliding window to improve Viola-Jones object detection / [F. Comaschi, S Stuijk, T. Basten, H. Corporaal] // Seventh International Conference on Distributed Smart Cameras, Palm Springs, California, USA, October 29. – November 1, 2013: proceedings. – IEEE Washington DC, USA, 2013. DOI: 10.1109/ICDSC.2013.6778224
15. Efficient algorithms for subwindow search in object detection and localization / [A. Senjian, P. Peursum, L. Wanquan, S. Venkatesh] // IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, Florida, USA, June 20–25, 2009 : proceeding, IEEE, Washington, D. C.,USA, P. 264–271. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206822.
16. Москаленко В. В. Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень для функціонального діагностування на гамма-камері / В. В. Москаленко, А. С. Рижова, А. С. Довбиш // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2015. – № 4. – С. 52–58. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-4-8

Стаття надійшла на редакції 02.01.2017.
Після доробки 17.01.2017.

Москаленко В. В.[1], Коробов А. Г.[2]
[1]Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета, Сумы, Украина
[2]Аспирант кафедры компьютерных наук Сумского государственного университета, Сумы, Украина

ИНФОМАЦИОННО-ЕКСТРЕМАЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ НА МЕСТНОСТИ С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ПАРАМЕТРОВ ЕКСТРАКЦИИ ПРИЗНАКОВ

Актуальность темы статьи состоит в том, что вопрос выбора параметров экстрактора признаков и алгоритма классификационного анализа в условиях априорной неопределенности, ресурсных и информационных ограничений недостаточно исследовано и в полном объеме не решено до сих пор.

Цель статьи – повысить в информационном и стоимостном смысле эффективность функционирования автономной системы распознавания объектов на местности, которая функционирует в режимах обучения и экзамена в условиях ограниченных объемов обучающей выборки путем оптимизации параметров экстрактора признаков и классификатора наблюдений.

Методы исследования базируются на алгоритмах цифровой обработки и анализа изображений для формирования дескрипторов объектов интереса, на принципах математической статистики, теории информации для оценки функциональной эффективности решающих правил, положениях теории популяционных алгоритмов для оптимизации параметров системы сканирования изображений.

Результаты – разработанный алгоритм машинного обучения с грубым двоичным кодированием наблюдений и модификация роевого алгоритма оптимизации параметров функционирования системы распознавания позволяют получить по выборкам малого объема решающие правила с достоверностью, которая приближается к граничному максимальному значению. При этом экспериментально показано преимущество использование роевого алгоритма сканирования изображений, которое состоит в троекратном повышении быстродействия в сравнении с известными алгоритмами RASW и ESS.

Выводы. Предложено метод синтеза информационно-экстремального классификатора изображений с грубым двоичным кодирование разреженных гистограмм частоты появления визуальных слов, что позволяет получить вычислительно эффективные решающие правила. Улучшено метод популяционного поиска для настройки параметров экстрактора признаков, что позволяет получить оптимальные в информационном и стоимостном смысле параметры функционирования системы распознавания изображений в несколько итераций роботы алгоритма. Практическая ценность результатов состоит в получении рабочих алгоритмов проектирования обучающейся системы распознавания изображений, которая функционирует в условиях ресурсных и информационных ограничений.

Ключевые слова: словарь признаков распознавания, алфавит классов распознавания, информационный критерий, оптимизация, машинное обучение, рой частиц.

Moskalenko V. V.[1], Korobov A. G.[2]
[1]Ph.D., Senior Lecturer of Computer Science Department of Sumy State University, Sumy, Ukraine
[2]Post-graduate Student of Computer Science Department of Sumy State University, Sumy, Ukraine

INFORMATION-EXTREME ALGORITHM OF THE SYSTEM FOR RECOGNITION OF OBJECTS ON THE TERRAIN WITH OPTIMIZATION PARAMETER FEATURE EXTRACTOR

Context of this article topics is that the issue of the choice of parameters of the extractor features and classification analysis algorithm in conditions of a priori uncertainty, resource constraints, and information is not enough studied and in full has not been decided so far.

Objective: to increase efficiency of functioning autonomous system of recognition in information and cost sense which functions in the modes of training and examination in the conditions of limited volumes of the training dataset by optimization of parameters feature extractor and classifiers.

Methods of a research are based on algorithms of digital processing and analysis of images for formation descriptors of interest objects, on the principles of mathematical statistics, the theory of information for assessment of functional efficiency of decision rules, provisions on the theory based on population search algorithms for optimization parameters of scanning images system.

Results: the developed machine learning algorithm with rough observations binary coding and modification swarm optimization algorithm recognition system operating parameters allow to obtain for small volume dataset decision rules with reliability which approaches boundary maximum value. This experiment shows the advantage of the use swarm algorithm for scanning images, which is three-fold increase in performance compared to known algorithms RASW and ESS.

Conclusions. Proposed method for the synthesis of information extreme classifier of images with rough binary encoding of sparse histogram of frequency of occurrence of visual words, to provide a computationally efficient decision rules**.** Improved method based on population search to adjust parameters of the extractor features that allows you to get the best value in the information and cost meaning of

the parameters functioning system recognition of images in a few iterations of the algorithm work. The practical value of the results is to obtain well-functioning designing algorithms capable of learning image recognition, which operates under conditions of resource limitations and information.

Keywords: Dictionary features recognition, alphabet recognition class, information criterion, optimization, machine learning, particle swarm.

REFERENCES

1. Alhamzi K. Survey A., Elmogy M., Barakat S. 3D Object Recognition Based on Image Features, *International Journal of Computer and Information Technology. Faizabad, India: Research and Publication Unit*, 2014, Vol. 3, Issue 3, pp. 651–660.
2. Hurshudov A. A. Obnaruzhenie lokal'nyh prostranstvennyh struktur dlja raspoznavanija izobrazhenij, *Nauchno-tehnicheskie vedomosti SpbGU. Informatika. Telekommunikacii. Upravlenie*, 2014, № 5(205), pp. 72–82.
3. Siddhartha C., Shailesh K., Jawahar C. V. Learning Hierarchical Bag of Words using NaiveBayes Clustering, *11th Asian Conference on Computer Vision, Daejeon, Korea, November 5–9, 2012: proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 382–395. DOI: 10.1007/978-3-642-37331-2_29.
4. Bay H., Ess A., Tuytelaars T, Gool L. V. SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision and Image Understanding (CVIU),* 2008, Vol. 110, No. 3, pp. 346–359.
5. Kachikian S. Emadi M. A Review of detector descriptors' on Object Tracking, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 2016, Vol. 5, Issue 7. DOI: 10.15662/IJAREEIE.2016.0507002.
6. Shiliang Z., Tian Q., Hua G., Huang Q., Li S. Descriptive Visual Words and Visual Phrases for Image Applications, 17th ACM international conference on Multimedia, Beijing, China October 19–24, 2009: proceedings. ACM New York, NY, USA, 2009, pp. 75–84. DOI: 10.1145/1631272.1631285.
7. Yongtao Y., Jonathan L., Chenglu W., Haiyan G., Huan L., Cheng W. Bag-of-visual-phrases and hierarchical deep models for traffic sign detection and recognition in mobile laser scanning data, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 113, pp. 106–123. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.005.
8. Glauco V. P., Agma J., Traina M. From Bag-of-Visual-Words to Bag-of-Visual-Phrases using n-Grams, *SIBGRAPI '13 Proceedings of the 2013 XXVI Conference on Graphics, Patterns and Images*, Arequipa, Peru, August 05–08, 2013: proceedings. IEEE Washington, DC, USA, 2013, – pp. 304–311. DOI: 10.1109/SIBGRAPI.2013.49.
9. Karaman S., Benois-Pineau J., Mégret R., Bugeau A. Multi-Layer Local Graph Words for Object Recognition, *Advances in Multimedia Modeling: 18th International Conference on MultiMedia Modeling*. Klagenfurt, Austria, January 2012: proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2012, pp. 29–39. DOI: 10.1007/978-3-642-27355-1_6.
10. Nadhir B. H., Osama H. Bag of Words Based Surveillance System Using Support Vector Machines, *International Journal of Security and Its Applications*, 2016,Vol. 10, No. 4, pp. 331–346. DOI: 10.14257/ijsia.2016.10.4.30.
11. Moskalenko V. V., Korobov A. G. Informacijno-ekstremal'ne mashynne navchannja systemy identyfikacii' ob'jektiv na miscevosti, *Zhurnal inzhenernyh nauk*, 2016, Vol. 3, No. 1, pp. H1–H7.
12. Moskalenko V. V., Korobov A. G. Optymizacija parametriv funkcionuvannja intelektual'noi' systemy identyfikacii' ob'jektiv na miscevosti, *Radioelektronni i komp'juterni systemy*, 2016, No. 2, pp. 32–39.
13. Zoran S. S., Kovaček K. I. Sliding window object detection without spatial clustering of raw detection responses, 10th IFAC Symposium on Robot Control International Federation of Automatic Control Dubrovnik, Croatia September 5–7: proceedings. IFAC. Elsevier Ltd,2012, Vol. 45, Issue 22. pp. 114–119. DOI: 10.3182/20120905-3-HR-2030.00192.
14. Comaschi F., Stuijk S., Basten T., Corporaal H. RASW: A run-time adaptive sliding window to improve Viola-Jones object detection, *Seventh International Conference on Distributed Smart Cameras, Palm Springs, California, USA, October 29–November 1.* 2013: proceedings. IEEE Washington DC, USA, 2013. DOI: 10.1109/ICDSC.2013.6778224.
15. Senjian A., Peursum P., Wanquan L., Venkatesh S. Efficient algorithms for subwindow search in object detection and localization, *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami, Florida, USA,* June 20–25, 2009: proceeding, IEEE, Washington, D. C, USA, pp. 264–271. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206822.
16. Moskalenko V. V., Ryzhova A. S., Dovbysh A. S. Intelektual'na systema pidtrymky pryjnjattja rishen' dlja funkcional'nogo diagnostuvannja na gamma-kameri, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2015, No. 4, pp. 52–58. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-4-8.

УДК 004.93

Субботин С. А.

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

МЕТРИКИ КАЧЕСТВА ВЫБОРОК ДАННЫХ И МОДЕЛЕЙ ЗАВИСИМОСТЕЙ, ОСНОВАННЫЕ НА ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ

Актуальность. Рассмотрена задача автоматизации формирования выборок из исходных выборок большого объема для построения моделей по прецедентам. Объектом исследования являлась модель качества выборки для построения моделей по прецедентам.

Цель работы – создание набора показателей для оценки качества выборок, имеющих единую природу, на основе принципов фрактального анализа.

Метод. Предложен комплекс показателей, позволяющих характеризовать качество подвыборок относительно исходной выборки с единых позиций на основе принципов фрактального анализа. Предложены методы определения фрактальной размерности выборки, оперирующие прямоугольными блоками одинакового размера, покрывая ними пространство признаков: не учитывающий характеристики синтезируемой модели, учитывающий ошибку (точность), синтезируемой модели, а также учитывающий точность и сложность синтезируемой модели. Наряду с фрактальной размерностью также предложен метод определения показателей качества выборки на основе принципа массовой размерности применительно к анализу данных. Предложенный метод разбивает пространство признаков на кластеры одинакового размера и формы. Варьируя размер кластера, метод позволяет получать различные уровни детализации выборки. Метод позволяет определить центр масс класса в выборке, среднее расстояние между экземплярами кластера, нормированное среднее отклонение расстояний между экземплярами от их среднего, массу и плотность экземпляров кластера, объем и площадь поверхности прямоугольного кластера, отношение объема к площади поверхности кластера, средневзвешенную равномерность расположения экземпляров в кластерах класса, массу и плотность экземпляров класса, средневзвешенную равномерность расположения экземпляров выборки.

Результаты. Разработанные показатели реализованы программно и исследованы при решении задачи классификации ирисов Фишера.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач диагностирования и автоматической классификации по признакам. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в создании параллельных методов расчета комплекса предложенных показателей, оптимизации их программных реализаций, а также экспериментальном исследовании предложенных показателей на большем комплексе практических задач разной природы и размерности.

Ключевые слова: выборка, фрактальная размерность, метрика качества, кластер, формирование выборок.

НОМЕНКЛАТУРА

$\Gamma(x)$ – гамма-функция;

ε – граничное значение ошибки модели;

κ – определяемый пользователем параметр;

ξ^k – средневзвешенная равномерность расположения экземпляров в кластерах k-го класса;

ξ – средневзвешенная равномерность расположения экземпляров выборки;

ρ^k – плотность экземпляров k-го класса;

$\rho^{k,q}$ – плотность экземпляров q-го кластера k-го класса;

ρ_E – отношение, показывающее ожидание сложности отображения;

$\sigma^{k,q}$ – нормированное среднее отклонение расстояний между экземплярами q-го кластера k-го класса от их среднего;

$\upsilon_S^{k,q}$ – отношение объема шара, ограниченного гиперсферой, к площади поверхности гиперсферы q-го кластера k-го класса;

Ω_E – ожидание сложности нейронной сети прямого распространения;

Ω_i – сложность связей каждой субструктуры сети;

ω – множество настраиваемых параметров модели;

C^k – центр масс k-го класса в выборке;

C_j^k – j-я координата центра масс k-го класса в выборке;

D – фрактальная размерность выборки;

$D_{net(w)}$ – фрактальная размерность данных относительно точности (ошибки) E синтезированной модели net при текущем w;

D_{net} – фрактальная размерность данных относительно точности (ошибки) синтезированной модели;

D_{net*} – фрактальная размерность модели net;

D_E – фрактальная размерность ожидания сложности двухслойной сети прямого распространения;

$D^{(k)}$ – фрактальная размерность k-го класса;

$\langle Dc \rangle$ – корреляционная размерность;

D_C – фрактальная размерность сложности связей многослойной нейросети прямого распространения;

E – критерий качества обучения модели (функция ошибки);

e – число структурных элементов распознающей модели;

f – критерий качества модели;

$F()$ – структура модели;

h – число скрытых слоев сети;

H_i – i-й скрытый слой сети;

© Субботин С. А., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-8

j – номер признака

K – число классов;

L – число интервалов, на которые разбиваются диапазоны значений признаков;

l – длина интервала признака или размер гиперкуба;

M – число выходов сети;

M^k – масса экземпляров k-го класса относительно центров масс его кластеров;

$M^{k,q}$ – масса экземпляров q-го кластера k-го класса;

N – число входных признаков или число входов сети;

$n_{(k)}$ – число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих k-й класс выборки в пространстве N признаков;

$n(l)$ – число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих выборку;

$net(w)$ распознающая модель;

$n_{i,q}$ – число экземпляров, попавших в прямоугольный гиперблок, образованный q-м интервалом i-го признака;

$n_{i,q,k}$ – число экземпляров k-го класса, попавших в прямоугольный гиперблок, образованный q-м интервалом i-го признака;

opt – условное обозначение оптимума;

$P_s^{k,q}$ – площадь поверхности гиперсферы, ограничивающей q-й кластер k-го класса;

q – номер кластера;

Q – число кластеров всех классов;

Q^k – число кластеров в k-м классе;

r – единичный радиус кластера;

R – множество расстояний, меньших r;

$|R|$ – мощность множества R;

$R^{k,q}(s,p)$ – расстояния между s-м и p-м экземплярами k-го класса в зоне q-го кластера, отстоящей от центра k-го класса не более чем на r;

$\overline{R}$ – среднее расстояние;

r – радиус отсечения (cut-off radius);

r_k – евклидово расстояние между парой точек;

S – число прецедентов;

S_E – размер входного и выходного слоев, определяющий структурную сложность модели;

S_M – размер выходного слоя нейронной сети прямого распространения;

S_N – размер входного слоя нейронной сети прямого распространения;

$S_{(H_i,H_{i+1})}$ – суммарное число нейронов в i-м и (i+1)-м слоях сети;

$V_s^{k,q}$ – объем шага, ограниченного гиперсферой q-го кластера k-го класса;

w – число параметров модели;

X – исходная выборка;

$<x^s, y^s>$ – s-й прецедент;

x_j – j-й признак;

x_j^s – значение j-го входного признака для s-го прецедента (экземпляра) выборки;

$x_{j,\max}^{k,q}$ – максимальное значение j-го признака для экземпляров принадлежащих к q-му кластеру k-го класса;

$x_j^{\max}, x_j^{\min}$ – соответственно, максимальное и минимальное значения признака x_j;

$x_{j,\min}^{k,q}$ – минимальное значение j-го признака для экземпляров принадлежащих к q-му кластеру k-го класса;

y^s – значение выходного признака для s-го прецедента (экземпляра) выборки.

ВВЕДЕНИЕ

При построении моделей принятия решений по прецедентам весьма важной задачей является формирование выборок данных, поскольку оно позволяет существенно ускорить процесс обучения модели путем выделения репрезентативной обучающей выборки малого объема.

Известные методы формирования выборок [1–5], как правило, представляют собой переборные стратегии и требуют задания в качестве целевой функции некоторого критерия, характеризующего качество формируемой подвыборки относительно исходной выборки большого объема.

Объектом исследования являлась модель качества выборки для построения моделей по прецедентам.

Ранее автором в [4, 6–9] был предложен комплекс показателей, образующий модель качества выборки. Данная модель позволяет характеризовать такие свойства выборки, как компактность, монотонность, нелинейность, отделимость классов, повторяемость, полнота, противоречивость, равномерность и неравномерность, размерность, разнообразие, репрезентативность, связанность переменных, сложность, эластичность и др.

Предметом исследования являлись показатели качества выборок.

Показатели качества выборок, входящие в модель [4, 6–9] имеют разную природу и не позволяют в едином ключе сравнивать качество выборок. С одной стороны, это влечет большие затраты времени и памяти на расчет всего комплекса показателей, а, с другой стороны, это вызывает сложности в объединении и совместном использовании комплекса показателей разной природы.

Поэтому актуальной является задача разработки показателей, позволяющих оценивать качество выборок с единой позиции.

Одним из перспективных направлений анализа данных является фрактальный анализ [10–15], ключевым понятием которого является фрактальная размерность – коэффициент, описывающий фрактальные структуры или множества на основе количественной оценки их сложности как коэффициент изменения в деталях с изменением масштаба.

Целью данной работы было создание набора показателей для оценки качества выборок, имеющих единую природу, на основе принципов фрактального анализа.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

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

Тогда задача синтеза модели зависимости $y(x)$ будет заключаться в определении таких структуры $F()$ и значений параметров w модели, при которых будет удовлетворен критерий качества модели $f(F(), \omega, <x, y>)\to opt$. Обычно критерий качества обучения нейросетей определяют как функцию ошибки модели:

$$E = \frac{1}{2}\sum_{s=1}^{S}(y^s - F(\omega, x^s))^2 \to \min.$$

Для задач с дискретным выходом ошибку обученной модели можно характеризовать также формулой:

$$E = \frac{100\%}{S}\sum_{s=1}^{S}\left|y^s - F(\omega, x^s)\right| \to \min.$$

В случае, когда исходная выборка имеет большую размерность, перед построением нейромодели необходимо решить задачу выделения обучающей выборки меньшего объема: дано: $<x, y>$, надо: $<x', y'>$, $x' \in \{x^s\}$, $y'=\{y^s | x^s \in x'\}$, $S'=|y'|$, $S'<S, f(<x', y'>, <x, y>)\to opt$.

Приведенная задача требует определения критерия f, позволяющего отображать соответствие свойств формируемой подвыборки свойствам исходной выборки.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Согласно [16] размерность Хаусдорфа-Бесиковича (Hausdorff – Besicovich dimension) определяется как

$$D \approx \frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)},$$

где $n(l)$ – минимальное число гиперкубов размером l, необходимых для покрытия образа.

Одним из наиболее доступным способов определения размерности Хаусдорфа-Бесиковича является метод подсчета (box-counting method) [14, 15], заключающийся в повторяющемся покрытии фрактального объекта гиперкубами равного размера и подсчетом каждый раз минимального числа гиперкубов, которые содержат точки образа.

Последовательно уменьшая размер гиперкубов l, получают набор точек с координатами ($\log(n(l))$, $\log\left(\frac{1}{l}\right)$), задающий кривую, наклон которой, определяемый с помощью линейной регрессии, является фрактальной размерностью:

$$D = \lim_{l\to 0}\frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)}.$$

Метод Такенса (Takens' method) [17, 18] используется для определения корреляционной размерности

$$\langle Dc\rangle = -\left\{\frac{1}{|R|}\sum_{k=1}^{|R|} r_k\right\}^{-1},$$

где $R=\{r_k | r_k < r\}$, $r>0$, r задается эвристически.

Общим недостатком рассмотренных методов определения фрактальной размерности [14–18] является то, что мощность множества должна удовлетворять неравенству $N<2\log_{10}S$, показывающему, что число точек данных S, необходимых для точного оценивания размерности N-мерного множества должно быть как минимум $10^{\frac{N}{2}}$. Даже для множеств малого объема это приводит к большим значениям N.

Также фрактальную размерность в [19] предлагается характеризовать соотношениями «масса-радиус», «периметр-площадь», «площадь-объем». Однако предложенные показатели [19] определены для двумерных графических изображений и неприменимы для многомерных выборок данных.

Для нейросетевых моделей, обученных по прецедентам, в [20] предложен ряд способов определения фрактальной размерности.

Фрактальная размерность ожидания сложности двухслойной сети прямого распространения определяется как

$$D_E = \frac{\log(\Omega_E)}{\log\left(\frac{1}{\gamma_E}\right)},$$

где $\Omega_E = (1+\rho_E{}^{\kappa})S_E$, $\rho_E = \frac{\max(S_N, S_M)}{\min(S_N, S_M)}$, $S_E=S_N+S_M$, $\kappa>0$, $\frac{1}{\gamma_E} = 1+\frac{1}{\rho_E}$ – соотношение, используемое для задания собственной шкалы измерений, принимая во внимание возможность $\rho_E=1$ такую, что $\log(\gamma_E)=0$, если $\gamma_E=\rho_E$.

Фрактальная размерность сложности связей многослойной нейросети прямого распространения D_C определяется как сумма фрактальных размерностей всех субструктур сети:

$$D_C = \sum_{i=1}^{h+1}\frac{\log\Omega_i}{\log\left(\frac{1}{\gamma_i}\right)},$$

где $1\le i\le h+1$: $\Omega_i = (1+\mathrm{P}_i{}^{\kappa})S_{(H_i, H_{i+1})}$,

$\mathrm{P}_i = \frac{\sum\left\{S_{(H_j)} \mid H_j \in \Omega_i\right\}}{N+M}$, γ_i изменяется на $\frac{1}{\gamma_i} = 1+\frac{1}{\mathrm{P}_i}$ с учетом возможности $\mathrm{P}_i=1$, так, что $\log(\gamma_i)=0$, если $\gamma_i=\mathrm{P}_i$.

Для создания структуры нейросети фрактальная размерность сложности связей D_c не может быть меньше ее фрактальной размерности ожидания сложности D_E, т.е. $D_c \ge D_E$. Когда $D_c \approx D_E$ установленная структура сети может считаться оптимальной.

Особенностью рассмотренных известных методов определения фрактальной размерности является то, что

размерность выборки и размерность модели, построенной на ее основе, определяются без связи друг с другом. Это ограничивает их практическое применение. Поэтому необходимо разработать методы оценивания фрактальной размерности, позволяющие характеризовать свойства выборки и свойства обученной модели по выборке.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экземпляры выборки можно представить как точки в пространстве признаков. Тогда кластеры будут соответствовать компактным областям в пространстве признаков, которые будут объединяться в классы. Кластеры можно описывать различными геометрическими фигурами. Фрактальный анализ выборки в пространстве признаков можно осуществить, задав элементарную форму для выделения кластеров и варьируя размер кластера для разбиения выборки на фрагменты.

Для анализа фрактальной размерности выборки предлагается использовать следующий метод.

Этап инициализации. Задать обучающую выборку $<x,y>$ и L.

Этап нормирования выборки. Если значения признаков ненормированы, то их следует пронормировать, отобразив на интервал [0, 1]:

$$x_j^s = \frac{x_j^s - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}}.$$

Этап кластеризации. Разбить диапазон значений каждого признака на L интервалов длиной l:

$$l = \frac{1}{L}.$$

Сформировать кластеры как прямоугольные блоки на пересечении интервалов разных признаков.

Этап анализа данных. Определить число экземпляров, попавших в каждый прямоугольный гиперблок, образованный интервалами признаков $n_{i,q}$

Определить число экземпляров k-го класса, попавших в каждый прямоугольный гиперблок, образованный интервалами признаков $n_{i,q,k}$

Определить число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих k-й класс выборки в пространстве N признаков

$$n_{(k)} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{q=1}^{L}\left\{1 \mid n_{i,q,k} > 0\right\}.$$

Определить число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих выборку в пространстве N признаков

$$n(l) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{q=1}^{L}\left\{1 \mid n_{i,q} > 0\right\} = \sum_{i=1}^{N}\sum_{q=1}^{L}\left\{1 \left| \sum_{k=1}^{K} n_{i,q,k} > 0\right.\right\}.$$

Этап определения фрактальной размерности. Определить при заданном l фрактальную размерность k-го класса, k= 1, 2, ..., K:

$$D^{(k)} = \frac{\log(n_{(k)})}{\log\left(\frac{1}{l}\right)}.$$

Определить фрактальную размерность выборки при заданном l:

$$D = \frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)}.$$

Данный метод оперирует прямоугольными блоками одинакового размера, покрывая ними пространство признаков. Единственным управляемым параметром метода является задаваемое число интервалов L, на которые разбиваются диапазоны значений признаков. Очевидно, что число кластеров $Q \geq K$, а $Q=L^N$, причем для каждого признака $L \geq 2$. Для обеспечения обобщающих свойств кластеров введем ограничение $Q \leq NS$. Таким образом, получим: $K \leq L^N \leq NS$, $L \geq 2$. Прологарифмируем: $\log(K) \leq N\log(L) \leq \log(NS)$ и после преобразований получим: $2L$. Заметим, что минимальным шагом для варьирования значений L является 1. Если значение верхнего предела оказывается меньше 2, то его можно заменить на S. Это связано с тем, что на оси каждого признака будет не более чем S точек и разбиение их на более чем S интервалов, очевидно, будет приводить к возникновению пустых интервалов. При больших значениях N задание числа разбиений порядка S по каждому признаку приведет к выделению огромного числа блоков порядка S^N, что сделает вычисления крайне трудоемкими, а в ряде случаев и практически не реализуемыми. Поэтому рационально в этом случае ограничить значение верхнего предела значений L величиной порядка round(lg(S)), где roung – функция округления к ближайшему целому числу.

Определение показателя D при малых значениях L потребует больших затрат вычислительных ресурсов и ресурсов памяти ЭВМ, чем при больших значениях L. Однако точность анализа для малых значений L будет ниже, в то время как уровень обобщения будет выше, чем для больших значений L.

Достоинством предложенного метода и определяемого на его основе показателя качества выборки является то, что они не зависят от метода синтеза модели и результатов его работы и позволяют оценивать свойства отдельно взятой выборки.

Недостатками предложенного метода является неопределенность в выборе значения параметра L, а также отсутствие связи метода с качеством синтезируемой модели.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается использовать метод определения фрактальной размерности входного множества для обучения распознающей модели.

Этап инициализации. Задать обучающую выборку $<x,y>$, метод синтеза модели, критерий качества обучения модели как функцию ошибки E, а также максимально приемлемое значение ошибки ε.

Этап нормирования выборки. Если значения признаков ненормированы, то их следует пронормировать, отобразив на интервал [0, 1].

Этап формирования и анализа разбиения данных. Последовательно изменяя значение L = 2, ..., S:

– определить длину интервала l;

– квантовать признаки выборки, разбив диапазоны их значений на L интервалов;

– определить число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих выборку в пространстве N признаков, $n(l)$;

построить распознающую модель *net* с помощью заданного метода, минимизируя функцию ошибки E до достижения приемлемого уровня ε;

оценить ошибку E построенной распознающей модели *net*.

Этап определения фрактальной размерности. Для всех l, для которых ошибка модели является приемлемой, определить фрактальную размерность данных относительно точности (ошибки) синтезированной модели:

$$D_{net} = \left\{ \frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)} \middle| E(net) \le \varepsilon \right\}.$$

Данный метод оперирует прямоугольными блоками одинакового размера, покрывая ними пространство признаков. Единственным управляемым параметром метода является задаваемое граничное значение ошибки ε модели. Очевидно, что чем меньше будет заданное ε, тем более детальной должна быть модель, то есть потребуется выделить большее число кластеров Q, а, следовательно, и большим будет число L. Соответственно, с уменьшением заданного ε будут возрастать затраты вычислительных ресурсов и ресурсов памяти ЭВМ на анализ выборки.

Достоинством предложенного метода и определяемого на его основе показателя качества выборки является то, что они связаны с показателем качества синтезируемой модели, а также в автоматическом режиме устанавливает оптимальное значение параметра L.

Недостатками предложенного метода является неопределенность в выборе значения параметра ε, а также его зависимость от качества обучения и принципов функционирования модели, по которой он определяется. Также следует отметить, что функция ошибки, используемая в методе, является лишь одной из характеристик синтезируемой модели, но не учитывает ее размерность и обобщающие свойства.

Поэтому фрактальную размерность обученной модели предлагается определять на основе изложенного ниже метода, учитывающего размерность модели.

Размерность модели – число величин, представляющих в модели параметры и характеристики. Для распознающей модели оценим размерность числом ее параметров w и числом структурных элементов e. Для разных типов моделей эти величины могут существенно отличаться. Однако, как правило, w зависит от e, причем $w>>e$. Поэтому предлагается для оценки размерности распознающей модели ограничимся числом ее параметров w.

Определим максимальное допустимое с точки зрения обобщения значение w как размерность входа обучающего множества $w_{max} = NS$, а минимально допустимое значение $w_{min} > 0$.

Этап инициализации. Задать обучающую выборку $<x,y>$, метод синтеза модели, критерий качества обучения модели как функцию ошибки E, а также максимально приемлемое значение ошибки ε. Задать $w = w_{max.}$

Этап нормирования выборки. Если значения признаков ненормированы, то их следует пронормировать, отобразив на интервал [0, 1].

Этап формирования и анализа разбиения данных. Последовательно изменяя значение $L = 2, ..., S$:

– определить длину интервала l;

– квантовать признаки выборки, разбив диапазоны их значений на L интервалов;

– определить число гиперблоков со стороной размером l, покрывающих выборку в пространстве N признаков, $n(l)$;

построить распознающую модель $net(w)$ с помощью заданного метода, минимизируя функцию ошибки E до достижения приемлемого уровня ε;

оценить ошибку E построенной распознающей модели *net*.

Этап минимизации сложности модели. Найти минимальное l при котором точность построенной модели $net(w)$ является приемлемой. Последовательно изменяя значения $w = w_{min}, ..., w_{max}$ построить модель $net(w)$ с помощью заданного метода, минимизируя функцию ошибки E до достижения приемлемого уровня ε.

Для всех w, для которых ошибка модели является приемлемой, определить фрактальную размерность данных относительно точности (ошибки) синтезированной модели при текущем w:

$$D_{net(w)} = \left\{ \frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)} \middle| E(net(w)) \le \varepsilon \right\}.$$

Для $D_{net(w)}>0$ определить такое минимальное w, при котором при минимальном L ошибка модели E будет приемлемой:

$$D_{net*} = \left\{ \frac{D_{net(w)}}{\log\left(\frac{1}{w}\right)} \middle| E(net(w)) \le \varepsilon \right\} =$$

$$= \left\{ \frac{\log(n(l))}{\log\left(\frac{1}{l}\right)\log\left(\frac{1}{w}\right)} \middle| E(net(w)) \le \varepsilon \right\}.$$

Данный метод оперирует прямоугольными блоками одинакового размера, покрывая ними пространство признаков. Управляемыми параметрами метода является задаваемое граничное значение ошибки ε модели, а также число параметров модели w. Очевидно, что чем меньше будет значение w, тем выше может быть уровень обобщения модели, однако и тем будет сложнее построить модель с требуемой точностью ε.

Наряду с фрактальной размерностью также возможно рассмотреть принцип массовой размерности применительно к анализу данных.

Рассмотрим разбиение признакового пространства на компактные области – кластеры одинакового размера и формы. Каждый кластер будет содержать близко расположенные экземпляры, обладающие подобными характеристиками (значениями описательных признаков). Очевидно, что варьируя размер кластера, мы получим различные уровни детализации выборки. Определим допустимый диапазон варьирования числа кластеров. Поскольку каждый класс может быть представлен в пространстве признаков не менее, чем одним кластером, то нижняя граница числа кластеров не может быть меньше числа классов. С другой стороны, при числе кластеров большем, чем число экземпляров в выборке, получим большое число пустых кластеров. Таким образом, $K \le Q \le S$.

Также, очевидно, что размерность описания кластеров не должна превышать размерность исходной выборки. Размерность исходной выборки оценим как NS, а каждый кластер будет описываться центром в N-мерном пространстве признаков и радиусом по оси каждого признака. Если считать все признаки предварительно пронормированными, а кластеры – одного размера и формы, то описание кластера будет иметь размерность N+1. Следовательно, $(N+1)Q \le NS \Rightarrow Q \le NS/(N+1)$. Поскольку N>1, то $K \le Q \le S \le NS/(N+1)$.

Очевидно, что при большом числе экземпляров в исходной выборке придется рассматривать большое число кластеров, что приведет к существенным затратам времени. Поэтому предлагается метод, позволяющий выделять минимизировать число анализируемых кластеров, последовательно наращивая их по необходимости.

Этап инициализации. Задать выборку <x, y>. Задать единичный радиус r.

Этап анализа классов. Для каждого класса k=1,2,...,K:

– найти центр масс k-го класса $C^k=\{C^k_j\}$ среди всех имеющихся в выборке экземпляров данного k-го класса:

$$C_j^k = \frac{1}{S^k}\sum_{s=1}^{S}\left\{x_j^s \middle| y^s = k\right\},\ j = 1,2,...,N;$$

– установить номер текущего кластера k-го класса q=1.

– выполнить этап анализа q-го кластера.

Этап анализа q-го кластера:

– если текущий кластер оказался пустым (не содержащим экземпляров k-го класса), то принять в качестве центра текущего кластера самый удаленный от текущего центра экземпляр того же класса;

– в зоне, отстоящей от центра k-го класса не более чем на r, найти расстояния между экземплярами соответствующего класса:

$$R^{k,q}(s,p) = \sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left\{\left(x_j^s - x_j^p\right)^2 \middle| R(x^s, C^{k,q}) \le r, R(x^p, C^{k,q}) \le r, y^s = y^p = k\right\}},$$

$$R^{k,q}(p,s) = R^{k,q}(s,p),$$

$$s = 1, 2, ..., S, p = s+1, s+2, ..., S,$$

где

$$R(x^s, C^{k,q}) = \sqrt{\sum_{j=1}^{N}\left(x_j^s - C_j^{k,q}\right)^2},$$

$$C_j^{k,q} = C_j^{k,q};$$

– определить среднее расстояние:

$$\overline{R} = \frac{1}{S(S-1)}\sum_{s=1}^{S}\left\{\sum_{p=s+1}^{S}\left\{R^{k,q}(s,p) \middle| R(x^p, C^{k,q}) \le \right.\right.$$

$$\left.\left. \le r, y^p = k\right\} \middle| R(x^s, C^{k,q}) \le r, y^s = k\right\};$$

– определить нормированное среднее отклонение расстояний между экземплярами от их среднего:

$$\sigma^{k,q} = \frac{1}{r}\sqrt{\sum_{s=1}^{S}\left\{\sum_{p=1}^{S}\left\{\left(R^{k,q}(s,p) - \overline{R}\right)^2 \middle| R(x^p, C^{k,q}) \le r, y^p = k\right\} \middle| R(x^s, C^{k,q}) \le r, y^s = k\right\}}.$$

Значение показателя будет находиться в диапазоне [0, 1]. Чем меньше будет значение показателя, тем равномернее расположены экземпляры класса в кластере;

– определить массу экземпляров кластера:

$$M^{k,q} = \sum_{s=1}^{S}\left\{\frac{1}{1 + R(x^s, C^{k,q})}\right\};$$

– определить плотность экземпляров кластера:

$$\rho^{k,q} = \frac{M^{k,q}}{S^{k,q}};$$

– определить площадь поверхности гиперсферы размерности N для q-го кластера k-го класса:

$$P_s^{k,q} = NC_N\left(\frac{1}{2}\max_{j=1,2,...,N}\{x_{j,\max}^{k,q} - x_{j,\min}^{k,q}\}\right)^{N-1},$$

где

$$C_N = \frac{\pi^{\frac{N}{2}}}{\Gamma\left(\frac{N}{2}+1\right)} = \begin{cases} \dfrac{\pi^{\frac{N}{2}}}{\left(\frac{N}{2}\right)!}, \text{если } N \text{ – четное;} \\ \dfrac{2^{\frac{N-1}{2}+1}\pi^{\frac{N-1}{2}}}{N!!}, \text{если } N \text{ – нечетное,} \end{cases}$$

– определить объем N-мерного шара, ограниченного гиперсферой размерности N для q-го кластера k-го класса:

$$V_s^{k,q} = C_N \left(\frac{1}{2} \max_{j=1,2,\ldots,N} \{ x_{j,\max}^{k,q} - x_{j,\min}^{k,q} \} \right)^N ;$$

– определить отношение объема к площади поверхности кластера:

$$\upsilon_s^{k,q} = \frac{V_s^{k,q}}{P_s^{k,q}} ;$$

– удалить из рассмотрения экземпляры соответствующего q-го кластера k-го класса. Если среди оставшихся экземпляров в выборке все еще имеются экземпляры k-го класса, то положить $q=q+1$, скорректировать значение S^k, принять:

$$C_j^k = \frac{1}{S^k} \sum_{s=1}^{S} \left\{ x_j^s \middle| y^s = k \right\}, j=1, 2, \ldots, N,$$

перейти к этапу анализа q-го кластера; в противном случае – вернуть исходное значение S^k и перейти к этапу анализа выборки.

Этап анализа выборки. Для k=1, 2, ..., K определить:

– средневзвешенную равномерность расположения экземпляров в кластерах класса

$$\xi^k = \frac{1}{S^k} \sum_{q=1}^{Q^k} S^{k,q} \sigma^{k,q} .$$

Значение показателя будет находиться в диапазоне [0, 1]. Чем меньше будет значение показателя, тем равномернее расположены экземпляры класса в его кластерах;

– массу экземпляров класса относительно центров масс его кластеров:

$$M^k = \sum_q \left\{ \frac{M^{k,q}}{1 + R(C^{k,q}, C^k)} \right\},$$

где $R(C^{k,q}, C^k) = \sqrt{\sum_{j=1}^{N} \left(C_j^{k,q} - C_j^k \right)^2}$;

– плотность экземпляров класса:

$$\rho^k = \frac{M^k}{S^k} .$$

После чего определить средневзвешенную равномерность расположения экземпляров выборки:

$$\xi = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{K} S^k \rho^k = \frac{1}{S} \sum_{k=1}^{K} M^k .$$

Значение показателя будет находиться в диапазоне [0, 1]. Чем меньше будет значение показателя, тем равномернее расположены экземпляры класса в его кластерах.

Предложенный метод позволяет определить комплекс показателей, характеризующие свойства кластеров, классов и выборки в целом.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования комплекса предложенных показателей выборок и моделей, основанных на фрактальной размерности, они были программно реализованы. Разработанное программное обеспечение использовалось для проведения вычислительных экспериментов по исследованию применимости предложенных показателей на примере решения задачи автоматической классификации ирисов Фишера по признакам [21], выборка данных для которой визуализирована на рис. 1.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате проведенных экспериментов для задачи классификации ирисов Фишера оценка фрактальной размерности выборки составила D = 0,59034, а оценки фрактальных размерностей классов: $D^{(1)}$ = 0,68223, $D^{(2)}$ = 0,6212, $D^{(3)}$ = 0,53407. Графики зависимостей от l^{-1} в логарифмической системе координат для всей выборки и классов приведены на рис. 2а и 2б, соответственно. На рис. 2б разные классы кодируются маркерами разных размеров.

На рис. 3 приведены схематические графики зависимостей $n(l)$ выборки от l^{-1} в логарифмической системе координат для разных заданных значений ε и получаемых значений E (рис. 3а), а также размерностей формируемой выборки S' и N' (рис. 3б).

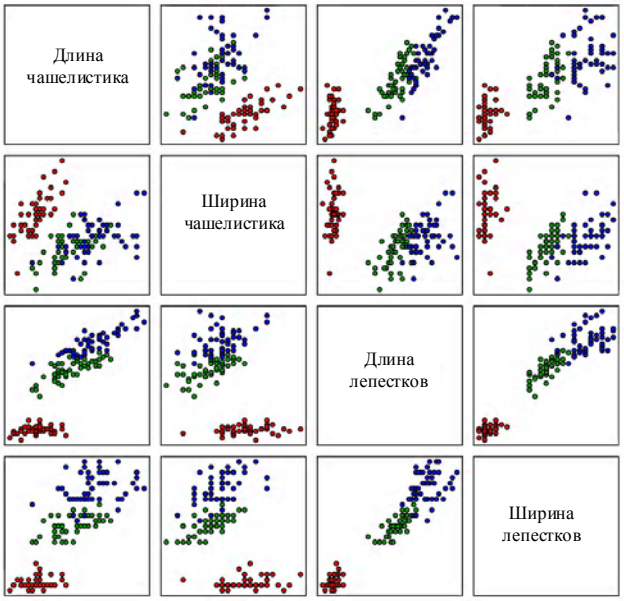
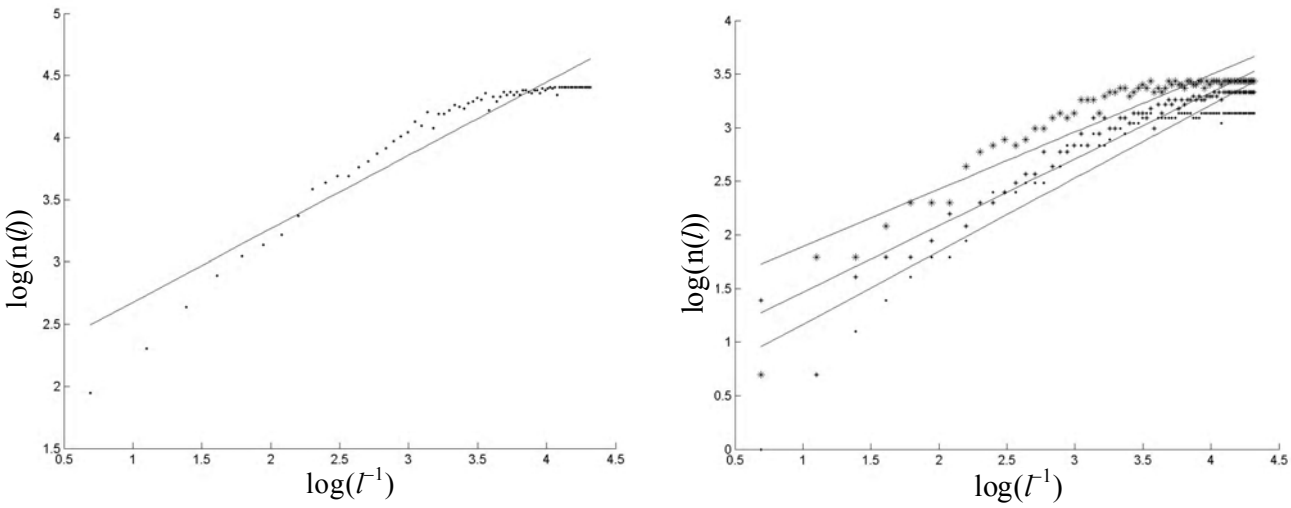
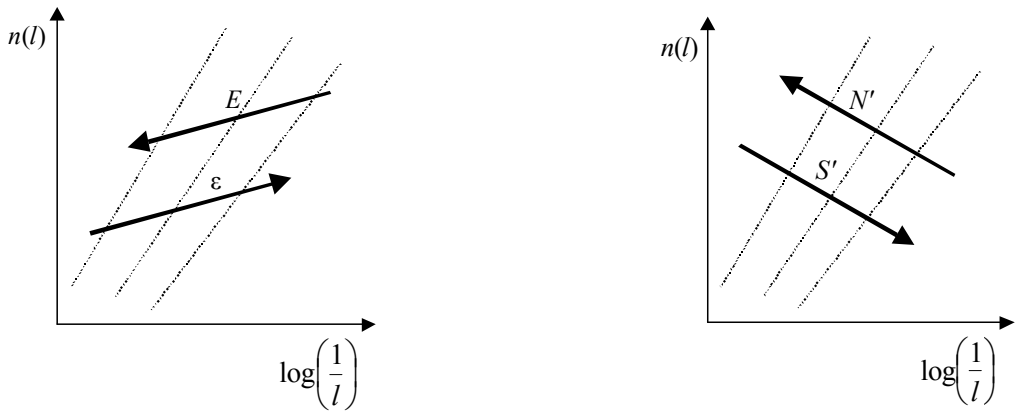


Рисунок 1 – Визуализация выборки данных ирисов Фишера для разных классов: красный – Ирис щетинистый (Iris setosa), зеленый – Ирис разноцветный (Iris versicolor), синий – Ирис виргинский (Iris virginica) (Источник – https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/56/Iris_dataset_scatterplot.svg/1024px-Iris_dataset_scatterplot.svg.png)



а б

Рисунок 2 – Графики зависимостей от l^{-1} в логарифмической системе координат:
а – $n(l)$ выборки, б – $n(l)$ классов



а б

Рисунок 3 – Схематические графики зависимостей от l^{-1} в логарифмической системе координат:
а – $n(l)$ выборки, б – $n(l)$ классов

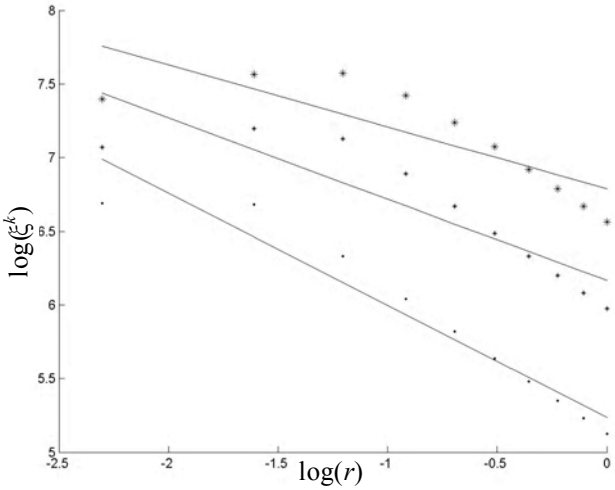
На рис. 4 изображены графики зависимостей: ξ^k от r (рис. 4а), ρ^k от r (рис. 4б), M^k от r (рис. 4в), υ^k от r (рис. 4г), ξ от r (рис. 4д) в логарифмической системе координат. На рис. 4а–рис. 4г разные классы кодируются маркерами разных размеров. В табл. 1 приведены рассчитанные фрактальные размерности классов и выборки, зависящие от r.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

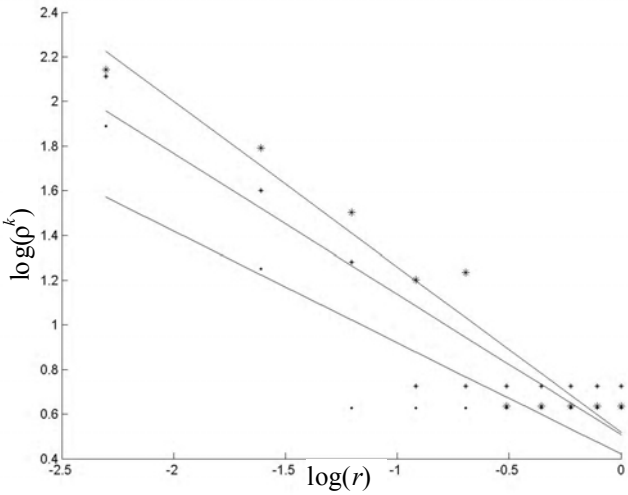
Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов и реализующих их программных средств.

Как видно из рис. 2 и рис. 4, а также табл. 1, предложенные показатели фрактальной размерности на основе подсчета попаданий в блоки и соотношений массарадиус позволяют хорошо показать различия между классами. Эти показатели можно использовать в методах формирования выборок, определяя критерии качества формируемых подвыборок на основе предложенных показателей фрактальной размерности. Если формируемая подвыборка или ее классы по показателям фрактальной размерности существенно отличаются от аналогичных показателей исходной выборки, то возможно, что полученная выборка не обладает репрезентативностью относительно исходной выборки. Также при сравнении нескольких подвыборок-кандидатов предложенные показатели могут использоваться как меры их качества: из подвыборок-кандидатов следует отдавать предпочтение той, которая будет иметь показатели фрактальной размерности, наиболее близкие по значениям к показателям исходной выборки.

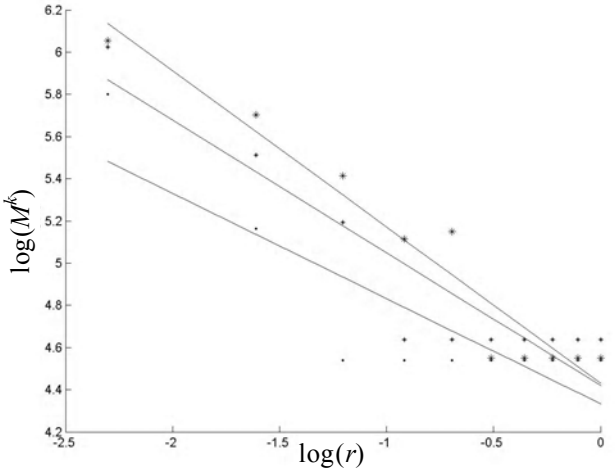
Как видно из рис. 3, изменение заданных составляющих размерности формируемой подвыборки (числа признаков N' и числа экземпляров S'), а также E и ε влияют на положение прямой, соединяющей точки зависимости $n(l)$.



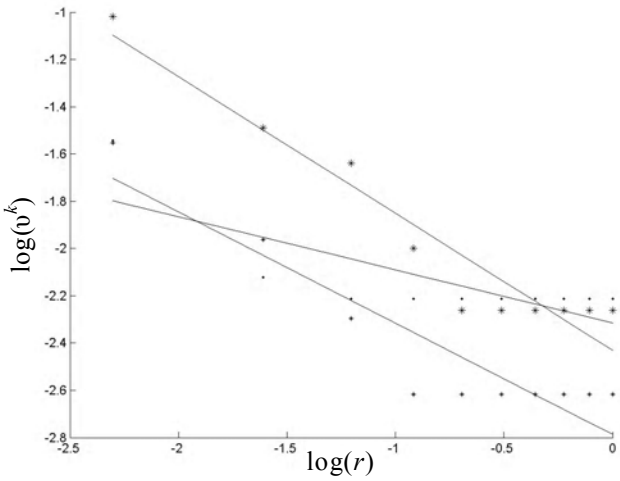
а



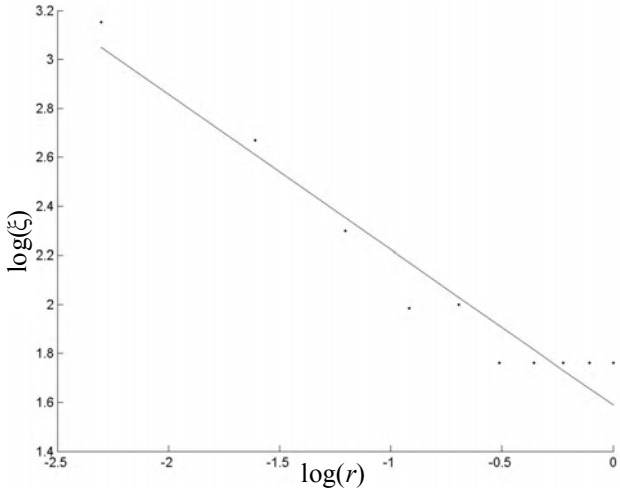
б



в



г



д

Рисунок 4 – Графики зависимостей от r в логарифмической системе координат:

а – ξ^k ; б – ρ^k ; в – M^k; г – υ^k ; д – ξ

Таблица 1 – Фрактальные размерности классов и выборки

Показатель фрактальной размерности	Метка класса			Выборка
	1	2	3	
ξ (ξ^k)	–0,7606	–0,5530	–0,4203	–0,6338
ρ^k	–0,4990	–0,6290	–0,7407	–
M^k	–0,4990	–0,6290	–0,7407	–
υ^k	–0,2243	–0,4715	–0,5789	–

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена актуальная задача автоматизации формирования выборок из исходных выборок большого объема для построения моделей по прецедентам.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые предложен комплекс показателей, позволяющих характеризовать качество подвыборок относительно исходной выборки с единых позиций на основе принципов фрактального анализа.

Предложены методы определения фрактальной размерности выборки, оперирующие прямоугольными блоками одинакового размера, покрывая ними пространство признаков: не учитывающий характеристики синтезируемой модели, учитывающий ошибку (точность), синтезируемой модели, а также учитывающий точность и сложность синтезируемой модели.

Наряду с фрактальной размерностью также предложен метод определения показателей качества выборки на основе принципа массовой размерности применительно к анализу данных. Предложенный метод разбивает пространство признаков на кластеры одинакового размера и формы. Варьируя размер кластера, метод позволяет получать различные уровни детализации выборки. Метод позволяет определить центр масс класса в выборке, среднее расстояние между экземплярами кластера, нормированное среднее отклонение расстояний между экземплярами от их среднего, массу и плотность экземпляров кластера, объем и площадь поверхности прямоугольного кластера, отношение объема к площади поверхности кластера, средневзвешенную равномерность расположения экземпляров в кластерах класса, массу и плотность экземпляров класса, средневзвешенную равномерность расположения экземпляров выборки.

Практическая ценность полученных результатов состоит в том, что разработанные показатели реализованы программно и исследованы при решении задачи классификации ирисов Фишера.

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач построения моделей по прецедентам.

Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в создании параллельных методов расчета комплекса предложенных показателей, оптимизации их программных реализаций, а также экспериментальном исследовании предложенных показателей на большем комплексе практических задач разной природы и размерности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы «Методы и средства вычислительного интеллекта и параллельного компьютинга для обработки больших объемов данных в системах диагностирования» (номер гос. регистрации 0116U007419) кафедры программных средств Запорожского национального технического университета при частичной поддержке международного образовательного проета «Центры передового опыта для молодых ученых» (Ref. No. 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES) программы «Темпус» Европейского Союза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jensen R. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches / R. Jensen, Q. Shen. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. – 339 p.
2. Chaudhuri A. Survey sampling theory and methods / A. Chaudhuri, H. Stenger. – New York : Chapman & Hall, 2005. – 416 p. DOI: 10.1201/9781420028638
3. Encyclopedia of survey research methods / ed. P. J. Lavrakas. – Thousand Oaks: Sage Publications, 2008. – Vol. 1–2. – 968 p. DOI: 10.4135/9781412963947.n159
4. Субботин С. А. Формирование выборок и анализ качества моделей на основе нейронных и нейро-нечетких сетей в задачах диагностики и распознавания образов : монография / С. А. Субботин. – Saarbrьcken : LAP Lambert academic publishing, 2012. – 232 с. – (ISBN 978-3-8473-4471-1).
5. Кокрен У. Методы выборочного исследования / У. Кокрен ; пер. с англ. И. М. Сонина ; под ред. А. Г. Волкова, Н. К. Дружинина. – М. : Статистика, 1976. – 440 с.
6. Subbotin S. A. The training set quality measures for neural network learning / S. A. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2010. – Vol. 19, № 2. – P. 126–139. DOI: 10.3103/s1060992x10020037
7. Субботин С. А. Комплекс характеристик и критериев сравнения обучающих выборок для решения задач диагностики и распознавания образов / С. А. Субботин // Математичні машини і системи. – 2010. – № 1. – С. 25–39.
8. Субботин С. А. Критерии индивидуальной информативности и методы отбора экземпляров для построения диагностических и распознающих моделей / С. А. Субботин // Біоніка інтелекту. – 2010. – № 1. – С. 38–42.
9. Субботин С. А. Методы формирования выборок для построения диагностических моделей по прецедентам / С. А Субботин // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХПІ», 2011. – № 17. – С. 149–156.
10. Roberts A. Unbiased estimation of multi-fractal dimensions of finite data sets / A. Roberts, A. Cronin // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. – 1996. – Vol. 233, № 3–4. – P. 867-878. DOI:10.1016/s0378-4371(96)00165-3

11. Evaluating the fractal dimension of profiles / [B. Dubuc, J. Quiniou, C. Roques-Carmes, C. Tricot, S. Zucker] // Physical Review. – 1989. – T. 39, № 3. – P. 1500–1512. DOI:10.1103/PhysRevA.39.1500
12. Cheng Q. Multifractal Modeling and Lacunarity Analysis / Q. Cheng // Mathematical Geology. – 1997. – Vol. 29, № 7. – P. 919–932. DOI:10.1023/A:1022355723781
13. Eftekhari A. Fractal Dimension of Electrochemical Reactions / A. Eftekhari // Journal of the Electrochemical Society. – 2004. – Vol. 151, № 9. – P. E291–E296. DOI:10.1149/1.1773583.
14. Signal attenuation and box-counting fractal analysis of optical coherence tomography images of arterial tissue / [D. P. Popescu, C. Flueraru, Y. Mao at al] // Biomedical Optics Express. – 2010. – Vol. 1, № 1. – P. 268–277. DOI:10.1364/boe.1.000268
15. Li J. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation / J. Li , Q. Du, C. Sun // Pattern Recognition. – 2009. – Vol. 42, № 11. – P. 2460–2469. DOI:10.1016/j.patcog.2009.03.001.
16. Crişan D. A. Fractal dimension spectrum as an indicator for training neural networks / D. A. Crişan, R. Dobrescu // Universitatea Politehnica Bucuresti Sci. Bull. Series C. – 2007. – Vol. 69, № 1. – P. 23–32.
17. Camastra F. Data Dimensionality Estimation Methods: A survey / F. Camastra // Pattern Recognition. – 2003. – Vol. 36, Issue 12. – P. 2945–2954. DOI: 10.1016/S0031-3203(03)00176-6
18. Takens F. On the numerical determination of the dimension of an attractor / F. Takens // Dynamical Systems and Bifurcations : Workshop, Groningen, 16–20 April 1984 : proceedings / [eds.: Braaksma B., Broer H. W., Takens F.]. – Berlin : Springer, 1985. – P. 99–106. – (Lecture Notes in Mathematics , Vol. 1125). DOI: 10.1007/bfb0075637
19. Чумак О. В. Энтропии и фракталы в анализе данных / О. В. Чумак. – М.-Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2011. – 164 с.
20. Zong-Chang Y. Establishing structure for artificial neural networks based-on fractal / Y. Zong-Chang // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – 2013. – Vol. 49, № 1. – P. 342–347.
21. Fisher Iris dataset [Electronic resource]. – Access mode: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Iris

Статья поступила в редакцию 25.01.2017.
После доработки 06.02.2017.

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

МЕТРИКИ ЯКОСТІ ВИБІРОК ДАНИХ І МОДЕЛЕЙ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ, ЗАСНОВАНІ НА ФРАКТАЛЬНІЙ РОЗМІРНОСТІ

Актуальність. Розглянуто задачу автоматизації формування вибірок з вихідних вибірок великого обсягу для побудови моделей за прецедентами. Об'єктом дослідження є модель якості вибірки для побудови моделей за прецедентами.

Мета роботи – створення набору показників для оцінки якості вибірок, що мають єдину природу, на основі принципів фрактального аналізу.

Метод. Запропоновано комплекс показників, що дозволяють характеризувати якість підвибірок відносно вихідної вибірки з єдиних позицій на основі принципів фрактального аналізу. Запропоновано методи визначення фрактальної розмірності вибірки, що оперують прямокутними блоками однакового розміру, покриваючи ними простір ознак: такий, що не враховує характеристики синтезованої моделі, такий, що враховує помилку (точність) синтезованої моделі, а також такий, що враховує точність і складність синтезованої моделі. Поряд із фрактальною розмірністю також запропоновано метод визначення показників якості вибірки на основі принципу масової розмірності стосовно до аналізу даних. Запропонований метод розбиває простір ознак на кластери однакового розміру і форми. Варіюючи розмір кластера, метод дозволяє одержувати різні рівні деталізації вибірки. Метод дозволяє визначити центр мас класу у вибірці, середню відстань між екземплярами кластера, нормоване середнє відхилення відстаней між екземплярами від їхнього середнього, масу і щільність екземплярів кластера, обсяг і площу поверхні прямокутного кластера, відношення обсягу до площі поверхні кластера, середньозважену рівномірність розташування екземплярів у кластерах класу, масу і щільність екземплярів класу, середньозважену рівномірність розташування екземплярів вибірки.

Результати. Розроблені показники реалізовані програмно і досліджені при вирішенні задачі класифікації ірисів Фішера.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач діагностування й автоматичної класифікації за ознаками. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в створенні послідовних методів розрахунку комплексу запропонованих показників, оптимізації їхніх програмних реалізацій, а також експериментальному дослідженні запропонованих показників на більшому комплексі практичних задач різної природи і розмірності.

Ключові слова: вибірка, фрактальна розмірність, метрика якості, кластер, формування вибірок.

Subbotin S. A.
Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools of Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

THE FRACTAL DIMENSION BASED QUALITY METRICS OF DATA SAMPLES AND DEPENDENCE MODELS

Context. The problem of automating the sampling of the original sample a large amount for the construction of models precedent. The object of the study was to model quality samples to build the models precedents.

Objective. The goal of the work is the creation of a set of indicators to assess the quality of samples having a single nature, based on the principles of fractal analysis.

Method. A set of indicators is proposed to characterize the quality of the subsample with respect to the original sample with one point of view on the basis of the principles of fractal analysis. The methods of sample fractal dimension evaluation are proposed. They operating with rectangular blocks of equal size and covering by them the feature space. They are method not taking into account the characteristics of the synthesized model, method taking into account the error (accuracy) of synthesized model and method taking into account accuracy and complexity of the synthesized model. Along with the fractal dimension it is also provided a method for determining the sample quality indicators based on the principle of mass dimension with regard to data analysis. The proposed method divides the feature space on clusters of the same size and shape. The method allows obtaining different levels of sampling detail varying the size of the cluster. The method allows to determine the masses of the class center in the sample, the average distance between instances of the cluster, the normalized mean deviation of the distance between instances of their average mass and density of the instances of the cluster, the volume and surface area of rectangular cluster ratio of volume to surface area of the cluster, the weighted average of evenness of instances location in the clusters of a class, the mass and density of instances of the class, the weighted average of sample instances location.

Results. The developed indicators have been implemented in software and investigated for solving the problems of Fisher's Iris classification.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the proposed software operability and allow recommending it for use in practice for solving the problems of diagnosis and automatic classification on the features. The prospects for further research may include the creation of parallel methods for calculation of set of proposed indicators, the optimization of their software implementations, as well as a experimental study of proposed indicators on more complex practical problems of different nature and dimensionality.

Keywords: sample, fractal dimension, quality metric, cluster, sample formation.

REFERENCES

1. Jensen R., Shen Q. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008, 339 p.
2. Chaudhuri A., Stenger H. Survey sampling theory and methods. New York, Chapman & Hall, 2005, 416 p. DOI: 10.1201/9781420028638
3. Ed. P. J. Lavrakas. Encyclopedia of survey research methods. Thousand Oaks, Sage Publications, 2008, Vol. 1–2, 968 p. DOI: 10.4135/9781412963947.n159
4. Subbotin S. A. Formirovaniye vyborok i analiz kachestva modeley na osnove neyronnykh i neyro-nechotkikh setey v zadachakh diagnostiki i raspoznavaniya obrazov: monografiya. Saarbrьcken, LAP Lambert academic publishing, 2012, 232 p. (ISBN 978-3-8473-4471-1).
5. Kokren U., per. s angl. Sonina I. M.; pod red. Volkova A. G., Druzhinina N. K. Metody vyborochnogo issledovaniya. Moscow, Statistika, 1976, 440 p.
6. Subbotin S. A. The training set quality measures for neural network learning, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2010, Vol. 19, No. 2, pp. 126–139. DOI: 10.3103/s1060992x10020037
7. Subbotin S. A. Kompleks kharakteristik i kriteriyev sravneniya obuchayushchikh vyborok dlya resheniya zadach diagnostiki i raspoznavaniya obrazov, *Matematychni mashyny i systemy*, 2010, No. 1, pp. 25–39.
8. Subbotin S. A. Kriterii individual'noy informativnosti i metody otbora ekzemplyarov dlya postroyeniya diagnosticheskikh i raspoznayushchikh modeley, *Bionika intelektu,* 2010, No. 1, pp. 38–42.
9. Subbotin S. A. Metody formirovaniya vyborok dlya postroyeniya diagnosticheskikh modeley po pretsedentam, Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu «Kharkivs'kyy politekhnichnyy instytut» : zb. nauk. prats. Kharkiv: NTU «KHPI», 2011, No. 17, pp. 149–156.
10. Roberts A., Cronin A. Unbiased estimation of multi-fractal dimensions of finite data sets, *Physica A: Statistical Mechanics and its Application,* 1996, Vol. 233, No. 3–4, pp. 867–878. DOI: 10.1016/s0378-4371(96)00165-3
11. Dubuc B., Quiniou J., Roques-Carmes C., Tricot C., Zucker S. Evaluating the fractal dimension of profiles, *Physical Review*, 1989, Vol. 39, No. 3, pp. 1500–1512. DOI:10.1103/PhysRevA.39.1500
12. Cheng Q. Multifractal Modeling and Lacunarity Analysis, *Mathematical Geology*, 1997, Vol. 29, No. 7, pp. 919–932. DOI:10.1023/A:1022355723781
13. Eftekhari A. Fractal Dimension of Electrochemical Reactions, *Journal of the Electrochemical Society*, 2004, Vol. 151, No. 9, pp. E291–E296. DOI:10.1149/1.1773583.
14. Popescu D. P., Flueraru C., Mao Y., Chang S., Sowa M. G. Signal attenuation and box-counting fractal analysis of optical coherence tomography images of arterial tissue, *Biomedical Optics Express*, 2010, Vol. 1, No. 1, pp. 268–277. DOI:10.1364/boe.1.000268
15. Li J., Du Q., Sun C. An improved box-counting method for image fractal dimension estimation, *Pattern Recognition*, 2009, Vol. 42, No. 11, pp. 2460–2469. DOI:10.1016/j.patcog.2009.03.001.
16. Crişan D. A., Dobrescu R. Fractal dimension spectrum as an indicator for training neural networks, *Universitatea Politehnica Bucuresti Sci. Bull. Series C*, 2007, Vol. 69, № 1, pp. 23–32.
17. Camastra F. Data Dimensionality Estimation Methods: A survey, *Pattern Recognition*, 2003, Vol. 36, Issue 12, pp. 2945–2954. DOI: 10.1016/S0031-3203(03)00176-6
18. Takens F. eds.: Braaksma B., Broer H. W., Takens F. On the numerical determination of the dimension of an attractor, *Dynamical Systems and Bifurcations*, Workshop, Groningen, 16–20 April 1984 : proceedings. Berlin, Springer, 1985, pp. 99–106. (Lecture Notes in Mathematics , Vol. 1125). DOI: 10.1007/bfb0075637
19. Chumak O. V. Entropii i fraktaly v analize dannykh. Moscow-Izhevsk, NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2011, 164 p.
20. Zong-Chang Y. Establishing structure for artificial neural networks based-on fractal, *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, Vol. 49, No. 1, pp. 342–347.
21. Fisher Iris dataset [Electronic resource]. Access mode: https://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Iris

UDC 004.272.26: 004.93

Oliinyk A. O.[1], Skrupsky S. Yu.[2], Shkarupylo V. V.[3], Blagodariov O. Yu.[4]

[1]*PhD., Associate Professor of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine*
[2]*PhD, Associate Professor of Computer Systems and Networks Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine*
[3]*PhD, Associate Professor of Computer Systems and Networks Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine*
[4]*Postgraduate Student of Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine*

PARALLEL MULTIAGENT METHOD OF BIG DATA REDUCTION FOR PATTERN RECOGNITION

Context. The problem of feature selection for big data processing based on the multi-agent approach and parallel computation has been solved. The object of research is the process of feature selection. The subject of the research are the methods of feature selection.

Objective. The purpose of the work is to create a parallel multi-agent method for reducing of big data sets.

Method. The article deals with the parallel multi-agent method for reducing of big data sets. The developed method involves splitting multiple agents into several subsets for parallel search of an informative combination of features in different areas of the search space. At the same time, it is suggested that the parallel nodes of the computer system perform the most resource-intensive operations associated with estimating the current set of agents, as well as the need to create and modify new sets of solutions based on stochastic computations. This allows to speed up the process of multi-agent search of informative combination of features, as well as to reduce the practical threshold for application of the multi-agent method with indirect communication between agents for reducing big data sets.

Results. The software which implements the proposed method and allows to select informative features based on the multi-agent approach and parallel computation has been developed.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed the proposed software operability and allow recommending it for use in practice for solving the problems of big data processing for pattern recognition. The prospects for further research may include the modification of the developed parallel method for feature selection by using different criteria for estimation of the group information of features, as well as an experimental study of proposed method on more complex practical problems of different nature and dimensionality.

Keywords: agent, data set, feature selection, parallel computing, multi-agent approach, pattern recognition.

NOMENCLATURE

A – set of agents;

CPU – Central Processing Unit;

GPU – Graphical Processing Unit;

G_k – value of objective function of k-th agent;

$J(Xe)$ – criterion for assessing the significance of a set of features Xe;

M – number of features in the sample of observations S;

N_{er} – number of incorrectly recognized (classified) observations of the sample $S = < P, T >$ on the synthesized model;

N_{pr} – number of processes, on which task is performed;

N_{χ} – total number of agents in set A;

p_{qm} – value of m-th feature (attribute) for q-th observation ($m = 1, 2, ..., M$, $q = 1, 2, ..., Q$);

Q – number of observations in the given sample of observations S;

S – sample of observations (training sample);

t_q – value of output parameter of q-th observation;

$t_{q\,\mathrm{mod}}$ – value of output parameter of q-th observation, calculated from the synthesized model;

T – set of output parameter values;

χ_k – k-th agent in set A;

XS – set of all possible combinations of features, obtained from the initial set of characteristics P.

INTRODUCTION

The development of automated systems for pattern recognition is associated with the need of big data processing [1–6]. Typically, the original samples of data describing the objects or processes under investigation may contain redundant and uninformative information [7–13]. The use of such information in the synthesis of recognition models leads to an increase of their complexity and redundancy, as well as a reduction in their generalizing abilities. Therefore, before synthesis of recognition models, it is relevant to perform preprocessing of data in order to exclude uninformative and redundant features from training samples [3, 5, 8].

Typically, well-known methods of feature selection use a greedy search strategy [6, 8], which often doesn‘t allow choosing the most informative combination of features. Stochastic methods [6, 12] are highly iterative and require substantial outlays of computing and time resources, making them difficult to use in practice. A multiagent method for feature selection that doesn‘t use greedy search strategy, based on modeling of agents movement in search space through stochastic computations, is offered in [14]. However, this method no longer adequate to handle big data sets due to the high iterative and consistent nature of the calculations.

It is therefore appropriate to parallelize the most computationally complex and resource-consuming operations of the multi-agent method of feature selection [14], which will reduce the practical threshold for applicability of such method when big data processing.

The purpose of the work is to create a parallel multi-agent method for big data sets reducing.

1 PROBLEM STATEMENT

Let there is a set of observations S (1):

$$S = < P, T > . \quad (1)$$

© Oliinyk A., Skrupsky S. Yu., Shkarupylo V. V., Blagodariov O., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-9

Then the problem of informative features selection in an idealized formulation [8, 15–17] can be represented as: find a combination of features X^* from the original data set $S = < P, T >$, at which the minimum of given criterion (2) for assessing the quality of feature set is achieved:

$$J(X^*) = \min_{Xe \in XS} J(Xe). \quad (2)$$

The error of the synthesized model, normally, is used as an criteria for assessing the significance of features set $J(Xe)$ [4–6]:

– recognition error (in problems with discrete output T) [4–6], calculated according to the formula (3):

$$E = \frac{N_{er}}{Q}; \quad (3)$$

– standard error (in the case where the output parameter T can take real values from a certain range $T \in [t_{\min}; t_{\max}]$) [6], calculated according to the formula (4):

$$E = \frac{1}{Q} \sum_{q=1}^{Q} \left(t_q - t_{q\,\mathrm{mod}}\right)^2. \quad (4)$$

In calculating criteria values (3) and (4), the model is synthesized based on the data of the training sample S, using only the features that correspond to the combination Xe.

2 LITERATURE REVIEW

Currently, there are various methods of reducing the dimension of the feature space [3–6, 15–17]: brute-force method, depth-first search, breadth-first search, branch and bound, group method of data handling, method of sequential addition of features, method of sequential removal of features, method of alternately adding and removing of features, ranking of features, features clustering, method of random search with adaptation and evolutionary search for the selection of features [15–17].

Usually, in solving the problems of recognition, there is a system of statistically dependent features, whose set informativity isn't expressed through the informativeness of individual features. Therefore, in solving practical problems, it is necessary to evaluate a set of features, rather than each attribute separately. Thus, the use of ranking criteria on the computed individual assessment is unacceptable [6].

The application of brute-force method requires the evaluation of all possible combinations of features made up of the original data, which makes it impossible to use this approach with a large number of features in the source set, since it requires huge computational costs.

Heuristic search methods [15, 17] are not effective enough, because of sub-optimal of a greedy search strategy involving the sequential addition or deletion of one feature at each iteration, therefore of which the resulting set of characteristics contains redundant features that correlate with other features in the set.

It seems expedient to use the methods of stochastic search (in particular, the multi-agent approach) [13, 14, 18], to search such combination of informative features under conditions of mutual dependence on each other. Since such methods are more suitable for finding new solutions by combining the best solutions that were obtained at different iterations and have the opportunity to exit from local optima.

The proposed multi-agent method [14] with an indirect communication between agents allows to select the most significant features. However, the method takes considerable time in processing of big data, because it is highly iterative and provides for sequential implementation of calculations. To address these drawbacks it is advisable to parallelize the multi-agent search of most meaningful combination of features in the processing of big data sets.

3 MATERIALS AND METHODS

In the developed parallel multi-agent method for big data reducing, it is proposed to split a set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, ..., \chi_{N_\chi}\}$ into several subsets for parallel search of informative combination of features in different areas of search space. Meanwhile, to speed up the process of multi-agent search for informative combination of features in the developed method, it is suggested to fulfil the most resource-intensive operations related with evaluation of the current set of agents, including the need to create and modify of new sets of solutions based on stochastic computations on the nodes of the parallel computing system.

As noted previously, in the proposed parallel multi-agent method for big data reducing after initialization phase, a set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, ..., \chi_{N_\chi}\}$ is split into several subsets $A^{(1)}, A^{(2)}, ..., A^{(Npr)}$ (5)

$$A \to \left\{A^{(1)}, A^{(2)}, ..., A^{(Npr)}\right\}. \quad (5)$$

The total number of agents N_χ in the partition $A \to \left\{A^{(1)}, A^{(2)}, ..., A^{(Npr)}\right\}$ remains unchanged (6):

$$\left|A^{(1)}\right| + \left|A^{(2)}\right| + ... + \left|A^{(Npr)}\right| = N_\chi. \quad (6)$$

The partitioning $A \to \left\{A^{(1)}, A^{(2)}, ..., A^{(Npr)}\right\}$ is done so that to ensure the separation of groups of agents $A^{(j)}$, over the search space with view to more detailed investigation of its various areas. For selected groups of compactly located agents $A^{(j)}$, it is proposed to apply cluster analysis methods [6, 9, 16].

After that, in each of the received subsets of agents $A^{(j)}$ ($j = 1, 2, ..., N_{pr}$), it is proposed to conduct a multi-agent search to select informative features from the given data samples $S = < P, T >$, periodically checking the stopping criteria and, if necessary, combining the subsets $A^{(j)}$.

In order to increase the efficiency of the multi-agent search for combination of informative features (reducing the search time), it is expedient to parallelize the most resource-intensive operations.

As noted above, the multi-agent method of feature selection with indirect link between agents, involves the implementation of initialization, chemotaxis modeling, reproduction, elimination and dispersion, checking the stopping criteria, and restarting agents.

In the initialization phase, the main parameters of method are defined, and the begin coordinates of agents χ_k ($k = 1, 2, \ldots, N_\chi$) are randomly generated, after which values of the objective function $G_k = G(\chi_k)$ are calculated. This stage doesn't involve complex iterative computational procedures, so it is proposed to perform it on the main stream. Note that with a large number of agents N_χ, as well as processing complex samples $S = < P, T >$, you can parallelize the process of assessing the initial positions of agents χ_k (calculating the values of the objective function $G_k = G(\chi_k)$, $k = 1, 2, \ldots, N_\chi$).

The stage of chemotaxis modeling is connected with iterative implementation of tumbling, moving and sliding operators for each agent, assuming the calculation of new values of the coordinates of agents $\chi_k^{(t+1)}$ in the search space. In addition, at this stage, the evaluation of new agent's positions $G_k^{(t+1)} = G\left(\chi_k^{(t+1)}\right)$, suggesting the need to data sample $S = < P, T >$ for each of the agents. The complexity of the computational procedures of this stage necessitates its parallel implementation for the possibility of performing multi-agent search for informative combination of features in subset of agents $A^{(j)}$ at the *j*-th node of the parallel system.

At the stage of reproduction, new set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_{N\chi}\}$ is created by performing stochastic calculations. At the same time, complex procedures are performed to select the most suitable agents, select the parent agent pair, and directly generate new agents (new coordinate points in the search space).

The stage of exclusion and dispersion also involves the need to process the entire current set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_{N\chi}\}$ in order to randomly change the coordinates of some agents to exit from local extremums.

Therefore, for the possibility of implement multi-agent optimization, it is suggested that the nodes of parallel computing system perform the stages of reproduction, elimination and dispersion, as well as checking the termination criteria. These stages are associated with the need to create and modify new sets of solutions based on stochastic computations and, together with the chemotaxis simulation stage, make it possible to search for a combination of informative features in each of the subsets N_{pr} of agents $A^{(j)}$ ($j = 1, 2, \ldots, N_{pr}$).

Based on the mentioned above, we present a model of the multiagent search process for a combination of informative features in the form of Fig. 1.

One iteration of the multi-agent search of an informative combination of features $MAS(A^{(j)})$ among a set of agents $A^{(j)}$ on the *j*-th node of a computer system ($j = 1, 2, \ldots, N_{pr}$) is schematically shown in Fig. 2. In so doing, the following notation is used in the Fig. 2: $Chem\left(A^{(j)}\right)$ is a chemotaxis modeling operator over multiple agents $A^{(j)}$; $Cross\left(A^{(j)}\right)$ is a reproduction operator; $Disp\left(A^{(j)}\right)$ is an exclusion and scattering operator; $Crit\left(A^{(j)}\right)$ is an operator of checking the criteria for the completion of multi-agent search $MAS(A^{(j)})$.

As can be seen from Fig. 1, computationally complex operations that are decided to parallelize, are related with operation of chemotaxis simulation, reproduction, exclusion and dispersion. The choice of these operations for parallel implementation of calculations is also due to the fact that information which is easily amenable to parallelization and associated with the current set of agents (coordinates of points χ_k in the search space and the corresponding values of the objective function $G_k = G(\chi_k)$) is iteratively processed on them. In addition, on the nodes of the parallel computer system are also offered to perform a check of the stopping criteria in order to cessation of the multi-agent optimization in case an optimal result is obtained (a set of characteristics that is acceptable for the solution of the current practical task). Sequences of initialization and restart of agents are consistently performed.

It is suggested that after performing multi-agent search at N_{it} iterations on nodes of parallel computer system, the information about the current sets of agents $A^{(j)}$ ($j = 1, 2, \ldots, N_{pr}$) and the values of their cost functions $G^{(j)}$ on the main process be transmitted. As a result of which, sets A (7) and G (8) are formed:

$$A = \bigcup_{j=1}^{N_{pr}} A^{(j)} = \{\chi_1, \chi_2, \ldots, \chi_{N\chi}\}, \tag{7}$$

$$G = \bigcup_{j=1}^{N_{pr}} G^{(j)} = \{G_1, G_2, \ldots, G_{N\chi}\}. \tag{8}$$

Then, the process of restarting agents is performed on the main process. In this case, unlike the known multi-agent method with indirect connection between agents BFO [18], a new set of agents is proposed to be formed in accordance with expressions (9) and (10):

$$A = A_{elite} \cup A_{rnd} \cup A_{cross}, \tag{9}$$

$$|A_{elite}| + |A_{rnd}| + |A_{cross}| = N_\chi, \tag{10}$$

where A_{elite} is a set of elite solutions χ_k (best agents by the value of the objective function G_k) in each of the subsets $A^{(j)}$: $A_{elite} = \{\chi_{elite1}, \chi_{elite2}, \ldots, \chi_{eliteN_{pr}}\}$, $\chi_{elite\,j} : G(\chi_{elite\,j}) = \min_{\chi_k \in A^{(j)}} (G(\chi_k))$, $|A_{elite}| = N_{pr}$;

A_{rnd} is a set of solutions χ_k, that are randomly selected in each of the subsets $A^{(j)}$:

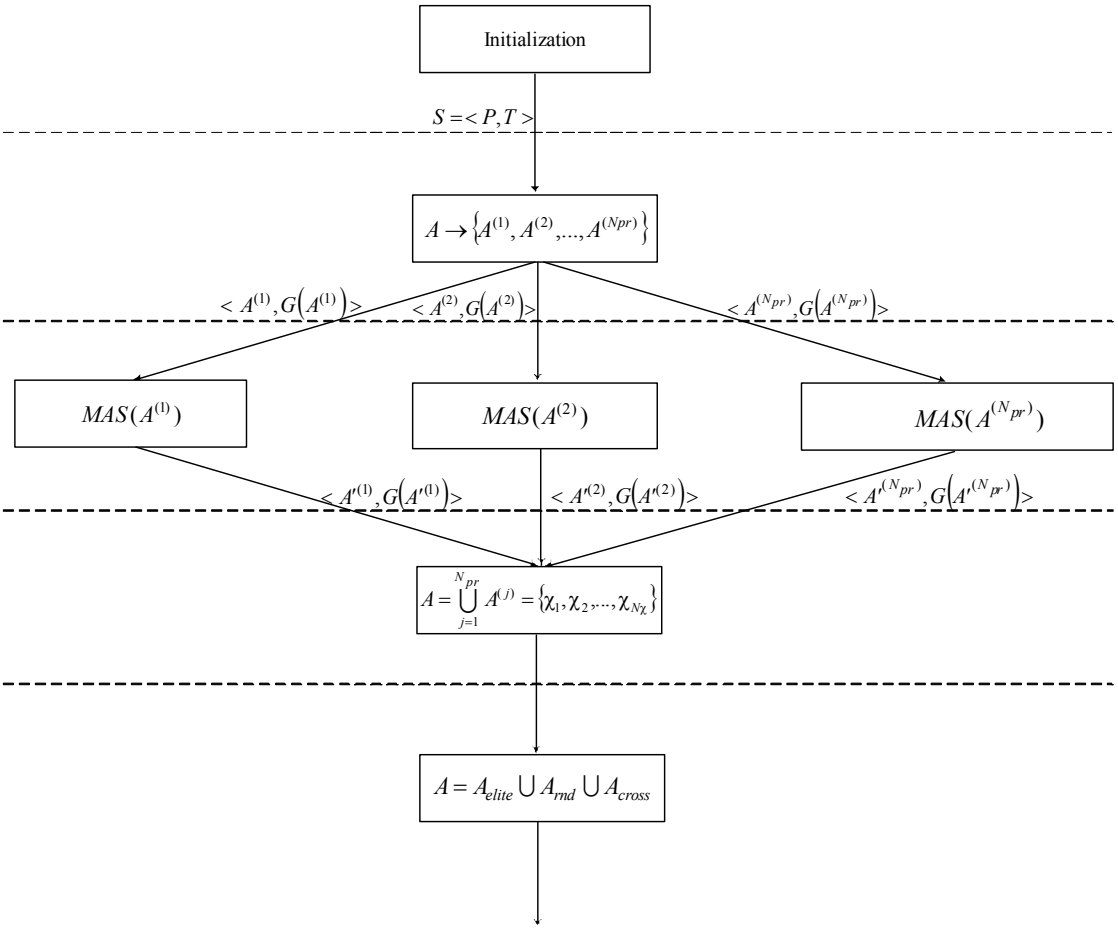


Figure 1 – The model of the multiagent search process for a feature selection

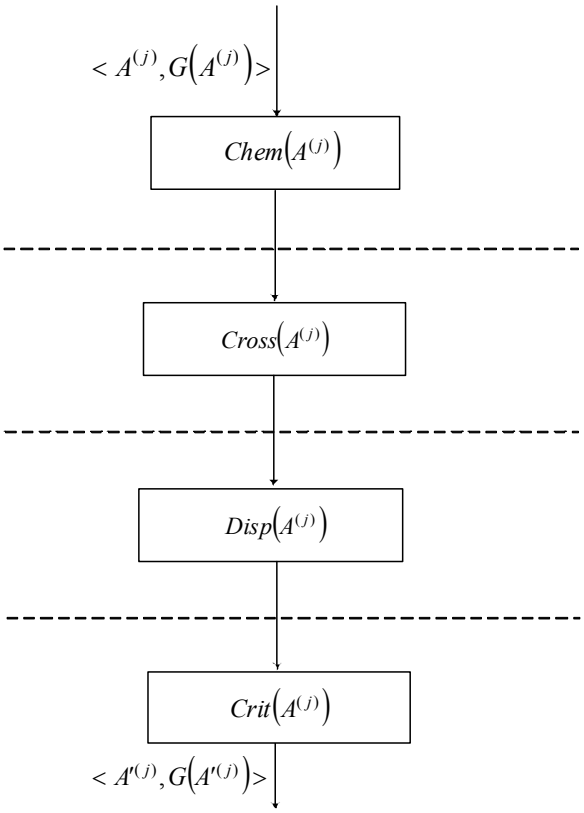


Figure 2 – One iteration of multi-agent search $MAS(A^{(j)})$ in a set of agents $A^{(j)}$

$A_{rnd} = \{\chi_{rnd1}, \chi_{rnd2}, ..., \chi_{rnd|A_{rnd}|}\}$, $\chi_{rnd\,j} = \underset{\chi_k \in A^{(j)}}{\text{rand}}(\chi_k)$, $|A_{rnd}| = \alpha_{rnd} N_\chi$, α_{rnd} is a fraction of agents in the new set $A = \{\chi_1, \chi_2, ..., \chi_{N\chi}\}$, randomly selected from the previous set of solutions. If $|A_{rnd}| > N_{pr}$ then random selection occurs successively among each of N_{pr} the subsets $A^{(j)}$, after which the process continues until the required number of solutions $|A_{rnd}|$ is reached, while the subset $A^{(j)}$ is randomly selected without repeating;

A_{cross} is a set of solutions χ_k, generated using a reproduction operator based on the current set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, ..., \chi_{N\chi}\}$. It is proposed to use a reproduction operator similar to that proposed in [14], using the evolutionary operators of proportional selection, arithmetic crossing and simple mutation [6, 8, 14];

$|A_{elite}|, |A_{rnd}|, |A_{cross}|$ are the total numbers of agents in sets A_{elite}, A_{rnd} and A_{cross}, accordingly.

Therefore, new set of agents $A = \{\chi_1, \chi_2, ..., \chi_{N\chi}\}$ in the proposed method is formed from elite agents A_{elite}, randomly selected agents from the previous set of decisions A_{rnd}, and also agents obtained by applying the reproduction operator A_{cross}. Such approach allows not only to save the current best solutions found in the search process, but also to provide a way out of local optima and the possibility of exploring different areas of search space.

The proposed parallel multiagent method of big data reduction involves splitting multiple agents into several subsets for parallel search of informative combination of features in different areas of the search space. At the nodes of parallel computing system, it is suggested to perform the most resource-intensive operations related to the evaluation of the current set of agents, as well as the need to create and modify new sets of solutions based on stochastic computations. This makes it possible to speed up the process of multi-agent search for informative combination of features, as well as to reduce the practical threshold for using a multi-agent method with indirect communication between agents to reduce big data sets.

Moreover, the proposed method fits well to SIMD (single instruction multiple data) architecture, because after the agent initialization stage the branches of algorithm perform the same actions on multiple data taking into account the stochastic component, which is data too. Hence, GPU implementation of the proposed method will probably demonstrate good computational process speedup.

4 EXPERIMENTS

The developed parallel multi-agent method of big data sets reduction has been implemented in C language using the MPI and CUDA libraries. Besides, the data exchange between the main core, which performed the initialization and agent restart stages, and other cores of cluster nodes has been performed by multiple exchange functions of MPI library (Bcast, Gather, Scatter, Reduce). The GPU cores used the global memory of GPU, in which many agents were placed. Each core of GPU performed a separate branch of the algorithm, and since the number of cores in the GPU is counted as many hundred, as a result, a significant number of evaluations of feature combinations were performed in one cycle.

To check the effectiveness of the proposed method with the help of the developed software, a problem of selecting informative features for the recognition of vehicles was solved [19, 20]. The training sample contained information on 10,000 images obtained from highways, taken in gray. Using the recognition system [20], images of interest areas with a vehicle were identified on the images, which were manually classified by an expert person (recognition was carried out in the following classes: 0 – not recognized, 1 – motorcyclist, 2 – car, 3 – truck, 4 – bus, 5 – minivan or minibus) and were displayed into a matrix 128*128 (16384 points). The resulting images were transformed by calculating 26 characteristics that generalize graphic information about object [20]. For each class of vehicle, a different recognition model has been synthesized, which makes it possible to determine whether the recognizable means belong to this type. Thus, five training samples $S = < P, T >$ of 10,000 instances were obtained, each of which was characterized by 26 features. The task was to reduce the number of attributes of training samples to identify the most informative combinations consisting of no more than 12 features. In the tables below, the results of selection of characteristics for the synthesis of recognition models defining the belonging of a motor vehicle to class 2 “passenger car” are presented.

To provide the experiments the following equipment has been involved:

– the cluster of Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering NAS of Ukraine, which involved 16 logical nodes (cores), each of which performed one process. The cluster configuration is as follows: processors Intel Xeon 5405, RAM – 4Ч2 GB DDR-2 for each node, communication environment InfiniBand 20Gb/s, middleware Torque and OMPI;

– NVIDIA GTX 960 with 1024 thread’s processors.

To compare the proposed method with existing analogues, the separation of combination of features was performed using various methods: heuristic search, the method of main components analyzing , the method of group accounting of arguments, the canonical model of genetic search, multi-agent methods for selecting informative features with direct and indirect communication between agents and using the developed parallel multi-agent method of informative features selection with indirect communication between agents. Values of parameters of the multi-agent method with indirect communication between the agents were: $N_\chi = 100$; $N_{re} = 4$; $N_s = 4$; $N_c = 20$; $N_{ed} = 2$; $P_{ed} = 0{,}25$; $d_{attract} = 0{,}1$; $w_{attract} = 0{,}2$; $h_{repellant} = d_{attract}$; $w_{repellant} = 10$ [14, 18]. Since the optimization process of most of the listed methods is of a stochastic nature, the search for optimal solutions

during experiments was carried out 100 times, after which the average values of investigated parameters on basis of the obtained results were calculated. As criteria for assessing effectiveness of the selection of features followed were used [14, 18]:

– the number of accesses to the objective function N_{fit} necessary to achieve the result with required accuracy;

– the error of the method *E*, calculated by the formula (3);

– the operating time of the method *T*, necessary to achieve an acceptable solution;

– the number of features of *k*, selected by the method as informative.

As the objective function *E,* the probability of making erroneous decisions (3) for a neural network of direct propagation, containing 3 neurons on the first layer and one neuron on the second layer was used. The neural network was synthesized on the basis of the appropriate combination of characteristics of the sample $S = < P, T >$, the neuroelements had a logistic sigmoid activation function. As discriminant functions weighted sums were used.

The proposed method was performed on 1, 2, 4, 8, 12, 16 cluster nodes and the time spent on the method was recorded. In addition, speedup of the computational process and efficiency of the computer system were calculated. Moreover, communication overheads (transfers and synchronizations) were analyzed.

Similar experiments were performed using the GPU.

5 RESULTS

Table 1 presents the characteristic values of the proposed and known methods of informative features selection in the recognition of vehicles.

Figures 3 and 4 shows dependences between the proposed method execution time in seconds (*Tspent*) and the number of involved cluster nodes (fig. 3), and the number of GPU threads (fig. 4).

Table 1 – Characteristics of selection features methods for vehicles recognition

№	Method of selection of features	Values of comparison criteria			
		E	N_{fit}	T	k
1	Method of analyzing the main components (MAMC) [6, 15]	0.0412	–	524	12
2	Method of group accounting of arguments (MGAA) [5, 8, 17]	0.0358	9761	18578	11
3	Canonical method of evolutionary search (CMES) [6, 19]	0.0219	10000	23171	10
4	Method of alternately adding and removing of features (MARF) [6, 8]	0.0471	871	2199	12
5	Multiagent method with indirect connection between agents (MMICA) (Ant Colony Optimization for Feature Selection) [19]	0.0198	4872	10318	10
6	Multiagent method with direct connection between agents (MMDCA) (Bee Colony Optimization for Feature Selection) [19]	0.0191	4719	10192	11
7	Parallel multiagent method of big data sets reduction (PMMBDSR), single core implementation $N_{pr} = 1$	0.0172	5418	11461	10
	PMMBDSR, implementation in $N_{pr} = 12$		65017	1868	
	PMMBDSR, implementation in 60 threads of GPU		48216	7317	

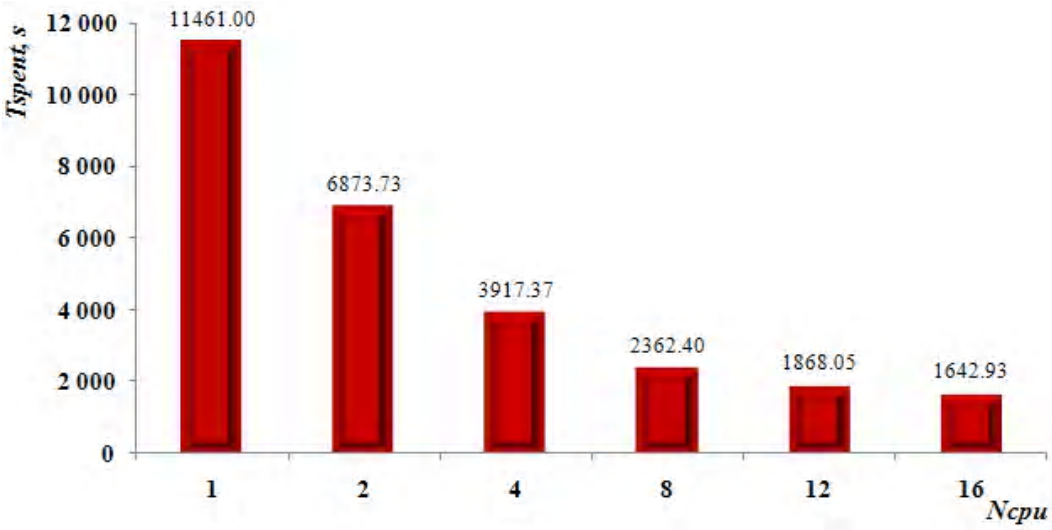


Figure 3 – Dependence between the proposed method execution time and the number of involved cluster nodes

In Figures 5 and 6 the speedup graphs of the computational process $Speedup_{pr}$ on the cluster and on the GPU, respectively, were shown.

Graph of the cluster efficiency $Efficiency_{pr}$ when performing the proposed method is shown in Figure 7.

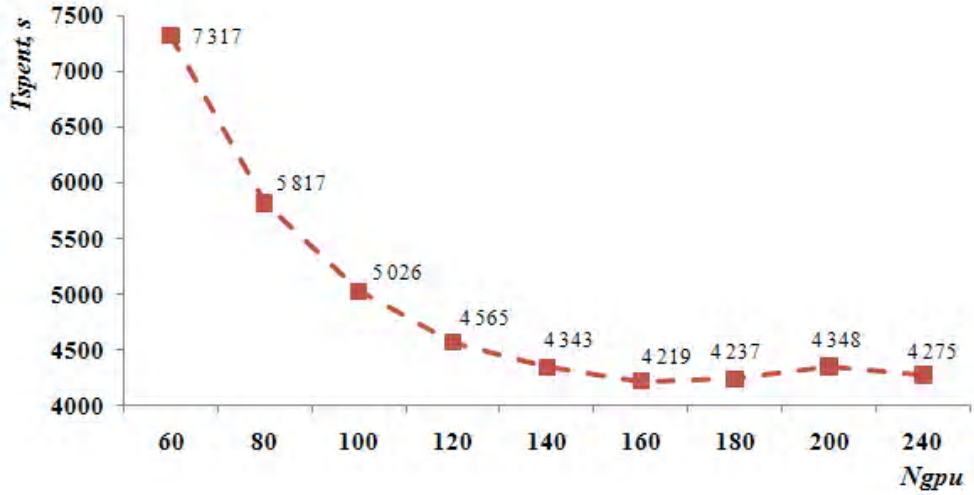


Figure 4 – Dependence between the proposed method execution time and the number of involved GPU threads

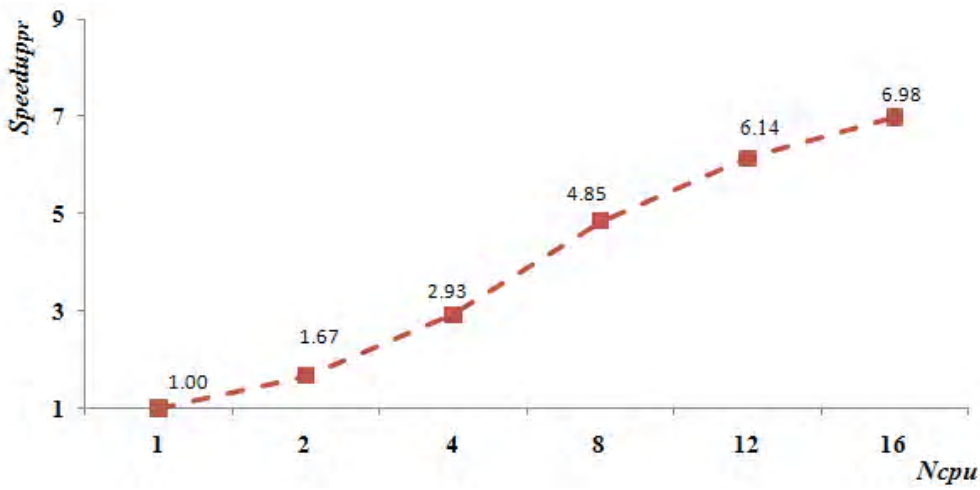


Figure 5 – Dependence between the computational speedup and the number of involved cluster nodes

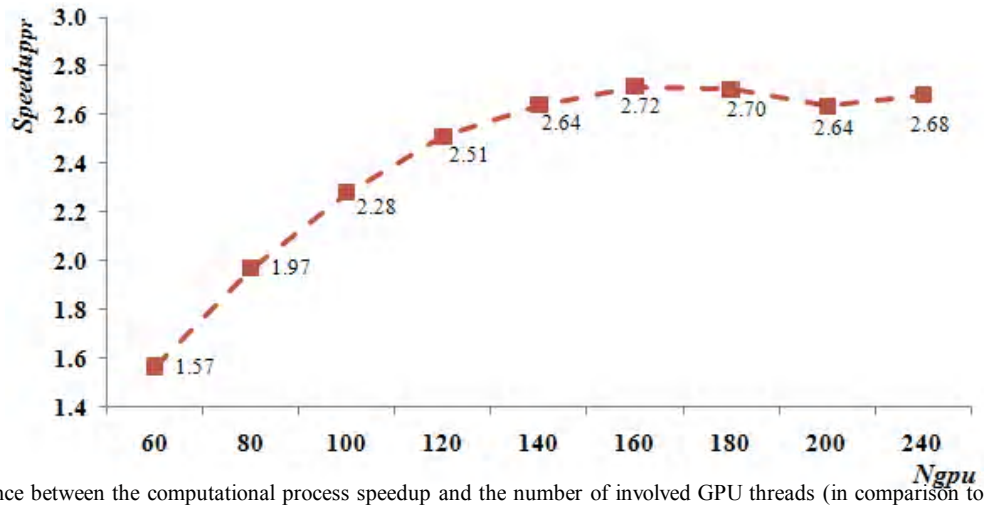


Figure 6 – Dependence between the computational process speedup and the number of involved GPU threads (in comparison to one cluster node)

As a result of the analysis of reasons of computer system efficiency decrease the corresponding graphs were formed. They show percentage of communication overheads *Overhead* (transfers and synchronizations) in the computational process from the number of involved cluster nodes (Figure 8) and GPU threads (Figure 9).

Graph of execution time *Tspent* of the proposed method from the number of agents, processed on each cluster core (Agents Per cluster Core) *ApC* is shown in the Figure. 10. The *ApC* criterion was calculated by the formula (9):

$$ApC = \frac{N_{\chi}}{N_{pr}}. \quad (9)$$

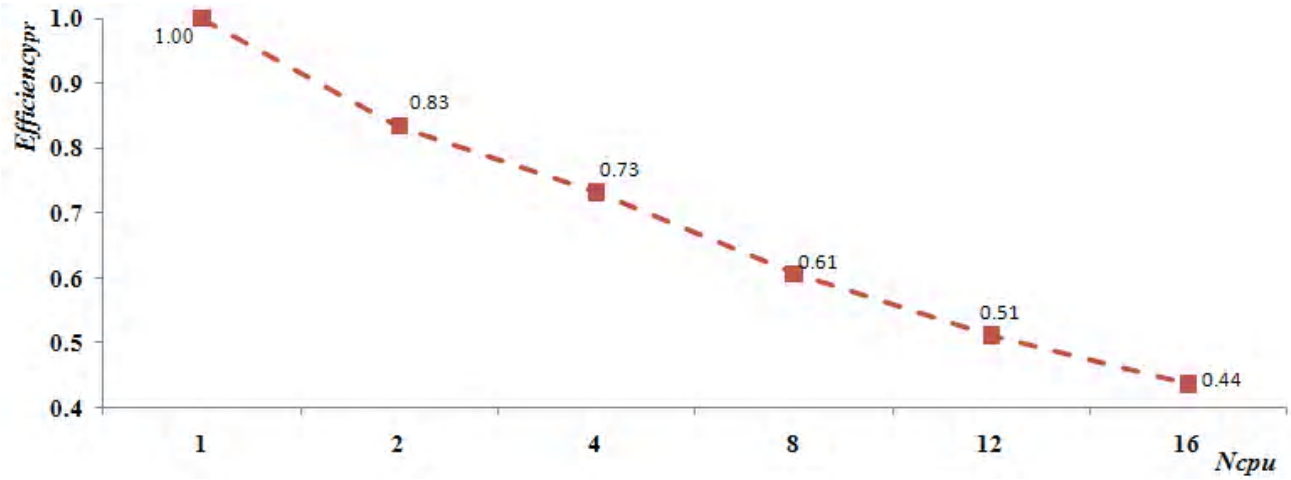


Figure 7 – Graph of the cluster efficiency when performing the proposed method

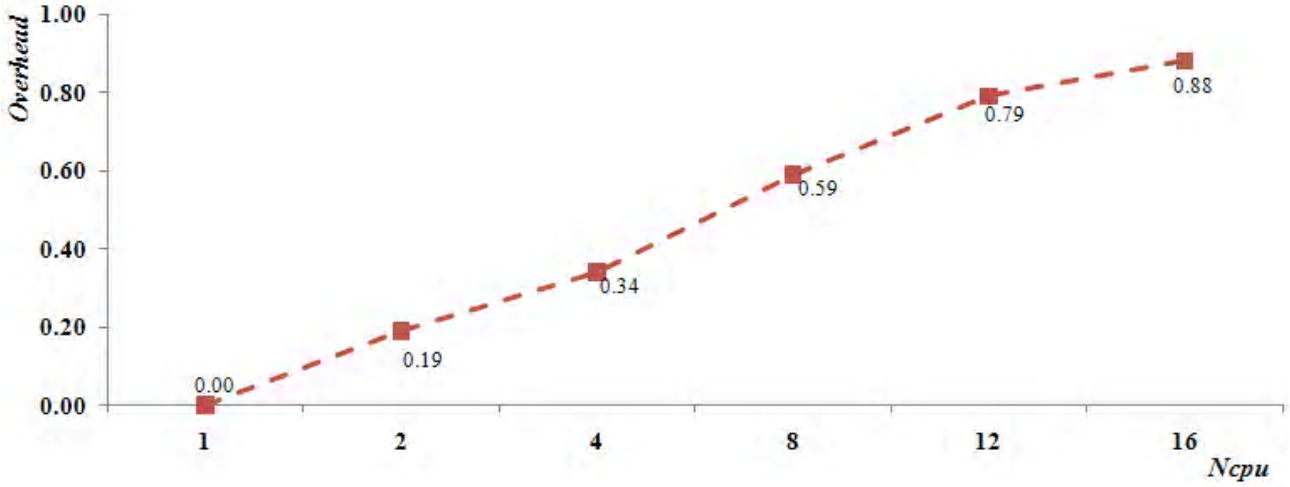


Figure 8 – Graph of communication overhead from the number of cluster nodes involved

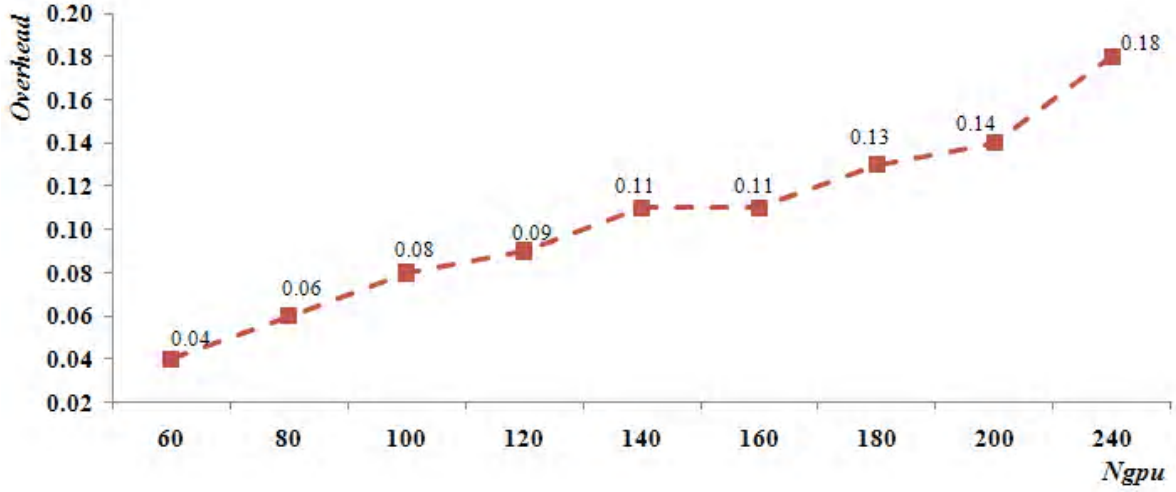


Figure 9 – Graph of communication overhead from the number of GPU threads involved

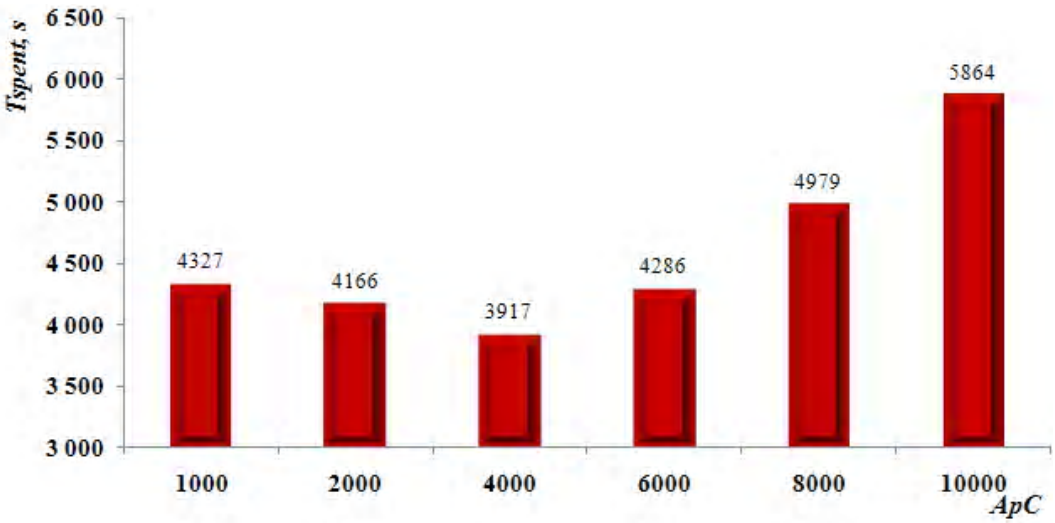


Figure 10 – Execution time graph of the proposed method from the number of agents per cluster core

6 DISCUSSION

As shown in Table 1 combinations of features which obtained using stochastic methods (CMES, MMICA, MMDCA, PMMBDSR) were characterized by more acceptable values of the objective function (for example, $E = 0.0172$ for PMMBDSR method) compared with the MAMC, MGAA and MARF methods (error value is varied in the range of $E = 0.0358$ for MGAA to $E = 0.0471$ for MARF). Such results are explained by a more effective analysis of search space using stochastic methods, including developed PMMBDSR method.

The operating time T of the methods varies from 524 s (for MAMC) to 23171 s (for CMES), which is related to number of calculations of the values of the objective function before the search stops. Such large operating time values of the selecting features methods are associated with the need to construct a recognition model based on each of the evaluated combinations of features. Obviously, sequential implementations of stochastic methods investigate a larger number of points in the search space, because of the stochastic nature, which causes large time consumption for their operation.

The results of Table 1 confirmed advisability of parallelizing the proposed method PMMBDSR: with number of parallel processes $N_{pr} = 12$, operation time of the method is 1868 s, that is less than the time of the heuristic method MARF ($T = 2199$ s)

The use of stochastic (evolutionary and multi-agent) methods allowed to select combinations that consist of fewer features ($k = 10$ for CMES, MMICA and PMMBDSR) compared with the use of other methods ($k = 11$ and 12 for other methods). This also indicates a more effective investigation of the features space using stochastic methods.

Consequently, the obtained values of the effectiveness estimation criteria of methods for selection informative features (E, N_{fit}, T, k) indicate the advisability of applying the proposed method for solving practical recognition problems.

Analysis of Figures 3–6 shows that the proposed method is well parallelized on a cluster and on a graphics processor. For instance, on 16 nodes of the cluster speedup of the computational process was 6.98, that allowed reducing the execution time of the method in computer system from 11461 s to 1643 s. On GPU, speedup of computational process compared to one core of the cluster was from 1.57 to 2.68, depending on the number of involved GPU threads.

Figure 7 shows a significant efficiency decrease of the computer system that performs the proposed method with an increase of the number of involved nodes. This is associated with an increase of overhead portion (synchronizations and transfers) with each new involved node of the system. Figure 8 confirms this fact. For example, when using 4 cluster nodes, the overhead portion in the general computing process is 0.34 and when using 16 cluster nodes is 0.88. As a result, growth in the number of involved nodes by 4 times (from 4 to 16) increases the speedup not linearly by 4 times, but only by about 2.38 times (Figure 5). On the GPU, the overheads increase with the number of involved threads not as significant as on the cluster (Figure 9). However, the capability of GPU in implementing of the proposed method is limited by the frequencies of the stream processors and by the bandwidth of data buses. As a result, the GPU managed to achieve the execution time of the proposed method, comparable to the four nodes of cluster (Figures 3, 4), which is an acceptable result.

The analysis of the runtime graph of the proposed method from the number of agents to the cluster core (Figure 10) shows that when the system's load is less than 4 000 agents per cluster core, the system is not fully loaded. For 4000 agents per core, the computer system is used efficiently, it finds a solution earlier than with a lesser load.

With a rise in the number of agents per core of more than 4 000, the time for finding solutions rises due to an increase in the overhead percentage. A concrete number of agents (in this case 4000), by which the system is used effectively depends on the capability of specific equipment. However, the form of the graph (as in Figure 10) should be preserved on other clusters.

CONCLUSIONS

The actual task of automation of large data sets reduction process based on the multi-agent approach has been solved

Scientific novelty lies in the fact that the parallel multiagent method of big data sets reduction has been proposed. The developed method involves splitting multiple agents into several subsets for parallel search of an informative combination of features in different areas of the search space. Wherein on parallel nodes of the computing system, it is suggested to perform the most resource-intensive operations related to the estimation of the current set of agents, as well as the need to create and modify new sets of solutions based on stochastic computations. This allows to speedup the process of multi-agent search for an informative combination of features, and also decreases the practical threshold for applying the multi-agent method with indirect communication between agents to reduce big amounts of data.

The practical value of the work lies in the fact that the program implementation of the proposed method for the CPU cluster and for the GPU has been developed. It allows to perform feature selection in a parallel computer system for significantly less time compared to other feature selection methods, implemented, as a rule, sequentially.

ACKNOWLEDGMENTS

The work was performed as part of research work "Methods and means of computational intelligence and parallel computing for processing large amounts of data in diagnostic systems" (number of state registration 0116U007419) of software tools department of Zaporizhzhia National Technical University.

REFERENCES

1. Salfner F. A survey of online failure prediction methods / F. Salfner, M. Lenk, M. Malek // ACM computing surveys. –2010. – Vol. 42, Issue 3. – P. 1–42. DOI: 10.1145/ 1670679.1670680.
2. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms / J. C. Bezdek. – N.Y. : Plenum Press, 1981. – 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1.
3. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing / S. Bow. – New York: Marcel Dekker Inc., 2002. – 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
4. Shin Y. C. Intelligent systems : modeling, optimization, and control / C. Y. Shin, C. Xu. – Boca Raton: CRC Press, 2009. – 456 p. DOI: 10.1201/9781420051773.
5. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
6. Encyclopedia of machine learning / [eds. C. Sammut, G.I. Webb]. – New York : Springer, 2011. – 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
7. Abonyi J. Cluster analysis for data mining and system identification / J. Abonyi, B. Feil. – Basel: Birkhäuser, 2007. – 303 p.
8. Jensen R. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches / R. Jensen, Q. Shen. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2008. – 339 p. DOI: 10.1002/9780470377888.
9. Lee J. A. Nonlinear dimensionality reduction / J. A. Lee, M. Verleysen. – New York : Springer, 2007. – 308 p. DOI: 10.1007/ 978-0-387-39351-3.
10. Bodyanskiy Ye. A Multidimensional Cascade Neuro-Fuzzy System with Neuron Pool Optimization in Each Cascade / Ye. Bodyanskiy, O. Tyshchenko, D. Kopaliani // Int. Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS). – 2014. – Vol. 6, No. 8. – P. 11–17. DOI: 10.5815/ijitcs.2014.08.02
11. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection / A. Oliinyk // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2016. – № 1. – P. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
12. Oliinyk A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2015. – Vol. 24, № 1. – P. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
13. Oliinyk A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 419–426.
14. Oliinyk A. O. Agent technologies for feature selection / A. O. Oliinyk, O. O. Oliinyk and S. A. Subbotin // Cybernetics and Systems Analysis. – 2012. – Vol. 48, Issue 2. – P. 257–267. DOI: 10.1007/s10559-012-9405-z.
15. Jolliffe I. T. Principal Component Analysis / I. T. Jolliffe. – Berlin : Springer-Verlag. – 2002. – 489 p.
16. McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition / G. McLachlan. – New Jersey : John Wiley & Sons. – 2004. – 526 p.
17. Guyon I. An introduction to variable and feature selection / I. Guyon, A. Elisseeff // Journal of machine learning research. – 2003. – № 3. – P. 1157–1182.
18. Kim D. H. Bacterial Foraging Based Neural Network Fuzzy Learning / D. H. Kim, C. H. Cho // Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Artificial Intelligence (IICAI-2005). – Pune : IICAI, 2005. – P. 2030–2036.
19. Субботін С. О. Неітеративні, еволюційні та мультиагентні методи синтезу нечіткологічних і нейромережних моделей: монографія / С. О. Субботін, А. О. Олійник, О. О. Олійник ; під заг. ред. С. О. Субботіна. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2009. – 375 с.
20. Subbotin S. A. Synthesis of neuro-fuzzy models for the allocation and detection of objects on a complex background on the two-dimensional image / S. A. Subbotin // Computer modeling and intelligent systems : proceedings of the conference. – Zaporizhzhya: ZNTU, 2007. – P. 68–91.

Article was submitted 29.05.2017.

Олійник А. О.[1], Скрупський С. Ю.[2], Шкарупило В. В.[3], Благодарьов О. Ю.[4]

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

[2]Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

[3]Канд. техн.наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

[4]Аспірант кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

ПАРАЛЕЛЬНИЙ МУЛЬТИАГЕНТНИЙ МЕТОД РЕДУКЦІЇ ВЕЛИКИХ МАСИВІВ ДАНИХ ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ОБРАЗІВ

Актуальність. Вирішено задачу відбору інформативних ознак при обробці великих масивів даних на основі мультиагентного підходу та паралельних обчислень. Об'єкт дослідження – процес відбору інформативних ознак. Предмет дослідження – методи відбору інформативних ознак.

Мета роботи полягає в створенні паралельного мультиагентного методу редукції великих масивів даних.

Метод. Запропоновано паралельний мультиагентний метод редукції великих масивів даних. Розроблений метод передбачає розбиття множини агентів на декілька підмножин для паралельного пошуку інформативної комбінації ознак в різних областях простору пошуку. При цьому на паралельних вузлах обчислювальної системи запропоновано виконувати найбільш ресурсомісткі операції, пов'язані з оцінюванням поточної множини агентів, а також з необхідністю створення і модифікації нових множин рішень на основі стохастичних обчислень. Це дозволяє прискорити процес мультиагентного пошуку інформативної комбінації ознак, а також знизити практичний поріг застосування мультиагентного методу з непрямим зв'язком між агентами для редукції великих масивів даних.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований метод і дозволяє виконувати відбір інформативних ознак на основі мультиагентного підходу і паралельних обчислень.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого математичного забезпечення та дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при обробці великих масивів даних для розпізнавання образів. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в модифікації розробленого методу шляхом використання різних критеріїв оцінювання групової інформативності ознак, а також експериментальному дослідженні запропонованого методу на більшому комплексі практичних завдань різної природи і розмірності.

Ключові слова: агент, вибірка даних, відбір ознак, паралельні обчислення, мультиагентний підхід, розпізнавання образів.

Олейник А. А.[1], Скрупский С. Ю.[2], Шкарупило В. В.[3], Благодарев А. Ю.[4]

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

[2]Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

[3]Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных систем и сетей, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

[4]Аспирант кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ МЕТОД РЕДУКЦИИ БОЛЬШИХ МАССИВОВ ДАННЫХ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

Актуальность. Решена задача отбора информативных признаков при обработке больших массивов данных на основе мультиагентного подхода и параллельных вычислений. Объект исследования – процесс отбора информативных признаков. Предмет исследования – методы отбора информативных признаков.

Цель работы заключается в создании параллельного мультиагентного метода редукции больших массивов данных.

Метод. Предложен параллельный мультиагентный метод редукции больших массивов данных. Разработанный метод предполагает разбиение множества агентов на несколько подмножеств для параллельного поиска информативной комбинации признаков в различных областях пространства поиска. При этом на параллельных узлах вычислительной системы предложено выполнять наиболее ресурсоемкие операции, связанные с оцениванием текущего множества агентов, а также с необходимостью создания и модификации новых множеств решений на основе стохастических вычислений. Это позволяет ускорить процесс мультиагентного поиска информативной комбинации признаков, а также снизить практический порог применения мультиагентного метода с непрямой связью между агентами для редукции больших массивов данных

Результаты. Разработано программное обеспечение, которое реализует предложенный метод и позволяет выполнять отбор информативных признаков на основе мультиагентного подхода и параллельных вычислений.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при обработке больших массивов данных для распознавания образов. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в модификации разработанного метода путем использования различных критериев оценивания групповой информативности признаков, а также экспериментальном исследовании предложенного метода на большем комплексе практических задач разной природы и размерности.

Ключевые слова: агент, выборка данных, отбор признаков, параллельные вычисления, мультиагентный подход, распознавание образов.

REFERENCES

1. Salfner F., Lenk M., Malek M. A survey of online failure prediction methods, *ACM computing surveys*, 2010, Vol. 42, Issue 3, pp. 1–42. DOI: 10.1145/1670679.1670680.
2. Bezdek J. C. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms. N.Y. Plenum Press, 1981, 272 p. DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1.
3. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing. New York, Marcel Dekker Inc., 2002, 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
4. Shin Y. C., Xu C. Intelligent systems : modeling, optimization, and control. Boca Raton: CRC Press, 2009, 456 p. DOI: 10.1201/9781420051773.
5. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning, New York, Springer, 2006, 738 p.
6. Sammut C., Webb G. I. eds. Encyclopedia of machine learning. New York, Springer, 2011, 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
7. Abonyi J., Feil B. Cluster analysis for data mining and system identification. Basel, Birkhäuser, 2007, 303 p.
8. Jensen R., Shen Q. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008, 339 p. DOI: 10.1002/9780470377888.
9. Lee J. A., Verleysen M. Nonlinear dimensionality reduction. New York, Springer, 2007, 308 p. DOI: 10.1007/978-0-387-39351-3.
10. Bodyanskiy Ye., Tyshchenko O., Kopaliani D. A Multidimensional Cascade Neuro-Fuzzy System with Neuron Pool Optimization in Each Cascade, *Int. Journal of Information Technology and Computer Science (IJITCS),* 2014, Vol. 6, No. 8, pp. 11–17. DOI: 10.5815/ijitcs.2014.08.02
11. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection, Radio Electronics, Computer Science, Control, 2016, No. 1, pp. 40–49. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-1-5.
12. Oliinyk A., Subbotin S. A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis, *Optical Memory and Neural Networks (Information Optics)*, 2015, Vol. 24, No. 1, pp. 18–27. DOI: 10.3103/S1060992X15010038.
13. Oliinyk A., Subbotin S. A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2016, Vol. 26, No. 2, pp. 419–426.
14. Oliinyk A. O., Oliinyk O. O. and Subbotin S. A. Agent technologies for feature selection, *Cybernetics and Systems Analysis,* 2012, Vol. 48, Issue 2, pp. 257–267. DOI: 10.1007/s10559-012-9405-z.
15. Jolliffe I. T. Principal Component Analysis. Berlin, Springer-Verlag, 2002, 489 p.
16. McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, 526 p.
17. Guyon I., Elisseeff A. An introduction to variable and feature selection, *Journal of machine learning research*, 2003, No. 3, pp. 1157–1182.
18. Kim D. H., Cho C. H. Bacterial Foraging Based Neural Network Fuzzy Learning, *Proceedings of the 2nd Indian International Conference on Artificial Intelligence (IICAI-2005)*. Pune, IICAI, 2005, pp. 2030–2036.
19. Subbotin S., Oliinyk A., Oliinyk O. Noniterative, evolutionary and multi-agent methods of fuzzy and neural network models synthesis : monograph. Zaporizhzhya, ZNTU, 2009, 375 p. (In Ukrainian).
20. Subbotin S. A. Synthesis of neuro-fuzzy models for the allocation and detection of objects on a complex background on the two-dimensional image, *Computer modeling and intelligent systems : proceedings of the conference.* Zaporizhzhya, ZNTU, 2007, pp. 68–91.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 528.29

Боровик О. В.[1], Рачок Р. В.[2], Дармороз М. М.[3]

[1]Д-р техн. наук, професор, начальник кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна
[2]Канд. техн. наук, доцент, докторант, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна
[3] Ад'юнкт, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Актуальність. В охороні державного кордону України використовується нова система оптико-електронного спостереження (СОЕС). Проте її потенційні можливості не реалізовані повною мірою. Однією з причин цього є відсутність науково-методичного апарату оцінки ефективності її функціонування при врахуванні різноманітних факторів природного і техногенного характеру. Останнє робить актуальним проведення відповідного дослідження.

Мета. Метою роботи є розробка методики оцінки ефективності функціонування СОЕС.

Метод. У роботі запропоновані показники ефективності функціонування окремих технічних засобів спостереження та їх комплексного використання з однієї вежі системи оптико-електронного спостереження. Також у роботі запропоновано новий показник ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження. У показнику враховано особливості ведення спостереження з комплексним використанням різних технічних засобів охорони кордону в різних умовах природного і техногенного характеру та з урахуванням рельєфу місцевості. Обґрунтування доцільності їх застосування передбачало використання ймовірнісно-статистичних методів.

Результати. На основі інформації про цифрові характеристики рельєфу досліджуваної ділянки здійснено визначення недоступних для спостереження ділянок місцевості, так званих «мертвих зон». Запропоновано методику обчислення показника ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження. Наведений опис алгоритмічної і програмної реалізації цієї методики. З використанням розробленого програмного забезпечення проведений аналіз особливостей функціонування існуючої системи оптико-електронного спостереження, визначені основні проблемні аспекти та напрями підвищення ефективності функціонування СОЕС.

Висновки. Сучасна побудова СОЕС не є оптимальною. Можливими напрямами підвищення ефективності її функціонування можуть бути оптимізація розстановки веж системи на місцевості, коригування висоти розміщення на вежах технічних засобів спостереження та вдалий підбір самих технічних засобів спостереження.

Ключові слова: система оптико-електронного спостереження, показник ефективності системи, математичні методи, алгоритм.

НОМЕНКЛАТУРА

E_0 – необхідний рівень ефективності СОЕС;
$E_ф$ – фактичний рівень ефективності СОЕС;
m_R – математичне сподівання відстані до цілі;
σ_R – середнє квадратичне відхилення відстані до цілі;
p_0 – граничний рівень ефективності прикриття (ймовірність виявлення цілі);
$P_1(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою РЛС;
$P_2(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою тепловізійної камери;
$P_3(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою телевізійної камери;
ДПСУ – Державна прикордонна служба України;
РЛС – радіолокаційна станція;
СОЕС – система оптико-електронного спостереження;
ТЗОК – технічні засоби охорони кордону;
ТЗС – технічні засоби спостереження.

ВСТУП

Важливим фактором сучасного забезпечення прикордонної безпеки України є ефективне використання Державною прикордонною службою України технічних засобів охорони кордону. Але аналіз забезпечення підрозділів охорони кордону ТЗОК показує, що значна

© Боровик О. В., Рачок Р. В., Дармороз М. М., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-10

частина цих засобів експлуатується понад 10–15 років і в будь-який час може вийти з ладу. Тому надзвичайно важливим є як оновлення існуючого парку ТЗОК, так і впровадження та ефективне використання кращого сучасного обладнання. Останнім часом на озброєння ДПСУ поступили нові ТЗОК в складі СОЕС. Однак виникає питання їх ефективного використання. Об'єктом дослідження є функціонування СОЕС, предметом дослідження є науково-методичний апарат оцінки ефективності функціонування СОЕС. Метою роботи є розробка методики оцінки ефективності функціонування СОЕС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Завдяки технічній допомозі міністерства оборони США у рамках проекту міжнародної технічної допомоги ДПСУ було отримано високоточне обладнання системи оптико-електронного спостереження (СОЕС). Основою цієї системи є інтегровані вежі, на яких встановлені: радіолокаційні станції EL/M-2129 ELTA, електронно-оптичні камери, обладнання передачі даних. Однак ефективність використання цього сучасного обладнання значною мірою залежить від багатьох факторів: місць розташування веж спостереження, їх висоти, рельєфу місцевості, погодних умов, виду цілей. Попередній аналіз результатів оперативно-службової діяльності з застосуванням СОЕС свідчить про недостатню реалізованість потенціалу цієї системи. Для вдосконалення функціонування існуючої СОЕС та оптимізації побудови нових таких систем необхідно визначити показник ефективності роботи цієї системи та оцінити вплив на нього основних факторів.

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Дослідженню ефективності використання засобів спостереження з урахуванням різноманітних факторів приділяли увагу багато науковців. Зокрема, в [1–3] розглядались питання реконструкції рельєфу місцевості в задачах спостереження. Ефективність ведення спостереження прикордонниками з урахуванням рельєфу місцевості та можлива тактика дій контрабандистів досліджувалися в [4–8]. Проте в [1–8] не враховувалися особливості використання різних технічних засобів спостереження (ТЗС). Окремі аспекти функціонування таких засобів аналізувались у роботах [9–12]. У цих працях увага в основному приділялася визначенню підходів до оцінки ефективності ведення спостереження з використанням окремих ТЗС.

Однак використання СОЕС, в складі якої комплексно задіяні різні ТЗС, гостро ставить питання оцінки ефективності її функціонування з урахуванням різних факторів, зокрема, рельєфу місцевості. Все це обумовлює актуальність саме такого дослідження СОЕС.

Зважаючи на це, метою даної роботи є визначення показника ефективності ведення спостереження з використанням СОЕС, формування підходів до його знаходження та аналіз впливу різних факторів на цю ефективність.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Виявлення цілей СОЕС будемо розглядати як випадковий процес, а дальність дії засобів спостереження – як випадкову величину, закономірності зміни якої вивчаються за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики. На вежах СОЕС застосуються наступні засоби спостереження: радіолокаційна станція ELTA EL\M-2129, тепловізійна камера Axys EOSS 180S-DUTV, телевізійна камера. Отримаємо для цих ТЗС вирази визначення ймовірності виявлення цілі в залежності від дальності, типу цілі, умов, в яких здійснюється спостереження, стану засобу спостереження.

Якщо розглядати виявлення цілі як випадковий процес, який відбувається в достатньо однорідних типових умовах, то розподіл дальності виявлення описується нормальним законом. Тоді дальність дії засобів спостереження буде цілком описана з ймовірнісної точки зору, якщо буде встановлене математичне сподівання m_R (обумовлене впливом контрольованих факторів) і середнє квадратичне відхилення σ_R. Для отримання цих величин по кожному ТЗС в різних умовах ведення спостереження можливо використати апарат математичної статистики. Слід відмітити, що одні і ті ж погодні, техногенні умови чи період доби по-різному впливають на ймовірність виявлення для даних ТЗС. Будемо вважати їх вплив протягом певного проміжку часу незмінним. Тоді інтегральний закон розподілу, що характеризує ймовірність невиявлення цілі до її підходу на відстань R, буде мати вигляд

$$F(R)=\frac{1}{\sigma_R\sqrt{2\pi}}\int_{R_{\min}}^{R} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}}dR,$$

де $R_{\min}=m_R-3\sigma_R$.

Ймовірність виявлення цілі на дальності R буде знаходитись за формулою

$$P(R)=1-\frac{1}{\sigma_R\sqrt{2\pi}}\int_{R_{\min}}^{R} e^{-\frac{(R-m_R)^2}{2\sigma_R^2}}dR. \qquad (1)$$

У випадку, якщо умови, в яких функціонує СОЕС, є такими, що характеризуються суттєвою невизначеністю, то розподіл дальності виявлення підпорядковується закону Релея і

$$P(R)=1-\int_0^R \frac{R}{\sigma_R^2}e^{-\frac{R^2}{2\sigma_R^2}}dR. \qquad (2)$$

Розглянемо комплексне використання всіх ТЗС, які встановлені на вежах СОЕС.

Позначимо ймовірності виявлення окремими ТЗС в певний момент часу, які обчислюються за (1) або (2), наступним чином:

– $P_1(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою РЛС;

– $P_2(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою тепловізійної камери;

– $P_3(R)$ – ймовірність виявлення цілі за допомогою телевізійної камери.

Тоді ймовірність виявлення цілі за допомогою засобів, встановлених на к-тій вежі СОЕС, може бути знайдена так:

$$P_k(R)=1-\overline{P}_1(R)\cdot\overline{P}_2(R)\cdot\overline{P}_3(R). \qquad (3)$$

Цей вираз визначає технологію оцінки ефективності однієї вежі СОЕС, як сукупності ТЗОК, що реалізують функції виявлення цілей.

Однак СОЕС представляє собою систему веж. Розглянемо ефективність функціонування цієї системи з точки зору виявлення цілей в межах смуги прикриття, яку потрібно забезпечити. Для цього визначимо підхід щодо визначення ефективності спостереження за кожним елементом ділянки місцевості, який буде загальним для всіх засобів спостереження (рис. 1).

У лівій частині рис. 1 показана смуга прикриття, яку необхідно реалізувати. В межах цієї смуги має забезпечуватись граничний рівень ефективності прикриття (ймовірність виявлення цілі) p_0. Наступний елемент рис. 1 – «мертві» для спостереження зони, які утворюються внаслідок перешкоджаючого впливу рельєфу місцевості. Зони ефективності на рис.1 утворюються на основі обчислення для кожної вежі СОЕС показника (3).

У правій частині рис. 1 демонструється підхід до отримання результуючої ефективності з урахуванням «мертвих» для спостереження зон. Для цих ділянок приймається $P(R)=0$.

Остаточно ефективність спостереження за певною ділянкою місцевості усіма ТЗС визначається наступним чином:

$$P\left(R\right)=1-\prod_{k}(1-P_k^{/}\left(R\right)). \qquad (4)$$

Слід відмітити, що $P_k^{/}$ у (4) обчислюється за (3) у випадку, якщо досліджувана ділянка не належить множині «мертвих» зон. В протилежному випадку $P_k^{/}=0$.

Необхідний рівень ефективності СОЕС приймемо

$$E_0=S_0 \cdot p_0. \qquad (5)$$

Слід відмітити, що такий рівень забезпечуватиметься у випадку, коли відсутні «мертві» зони і по всій площі смуги перекриття забезпечується висока ймовірність виявлення цілей p_0 (звичайно p_0=0,95). На жаль, наявність недоступних для спостереження зон та зниження ймовірності виявлення цілі зі збільшенням відстані суттєво знижує фактичний рівень ефективності СОЕС

$$E_{\text{ф}}=\sum_i S_i \cdot p_i. \qquad (6)$$

Слід відмітити, що p_i у (6) обчислюється на основі (4) відповідно до координат i-тої ділянки. Коли відомий фактичний рівень ефективності СОЕС (6) та необхідний рівень ефективності СОЕС (5) можливо остаточно оцінити ефективність прикриття необхідної смуги перекриття наступним чином:

$$W=\frac{E_{\text{ф}}}{E_0}\cdot 100\%. \qquad (7)$$

Слід відмітити, що процедура обчислення показника (7) є достатньо складною. Це обумовлено необхідністю визначення «мертвих», недоступних для спостереження зон, які залежать від місць розташування веж СОЕС, висоти вежі та рельєфу місцевості. Тому необхідна алгоритмічна і програмна реалізація визначення (7).

Блок-схема знаходження (7), яка представляє відповідну методику, наведена на рис. 2.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

З метою програмної реалізації блок-схеми (рис. 2) було розроблене програмне забезпечення, в якому алгоритмічно реалізовано всі етапи розрахунку (7). Головне вікно програми представлене на рис. 3.

У верхній частині вікна знаходяться кнопки, з використанням яких реалізується завантаження у растрових форматах карти місцевості, висот та смуги перекриття. Після завантаження цих даних і визначення місць розташування веж СОЕС стає активною кнопка «Зони видимості». Обчислення цих зон проводиться на основі інформації про рельєф місцевості, координати веж СОЕС та висоти веж. Висоти місцевості отримані з проекту SRTM з просторовою роздільною здатністю 90 м.

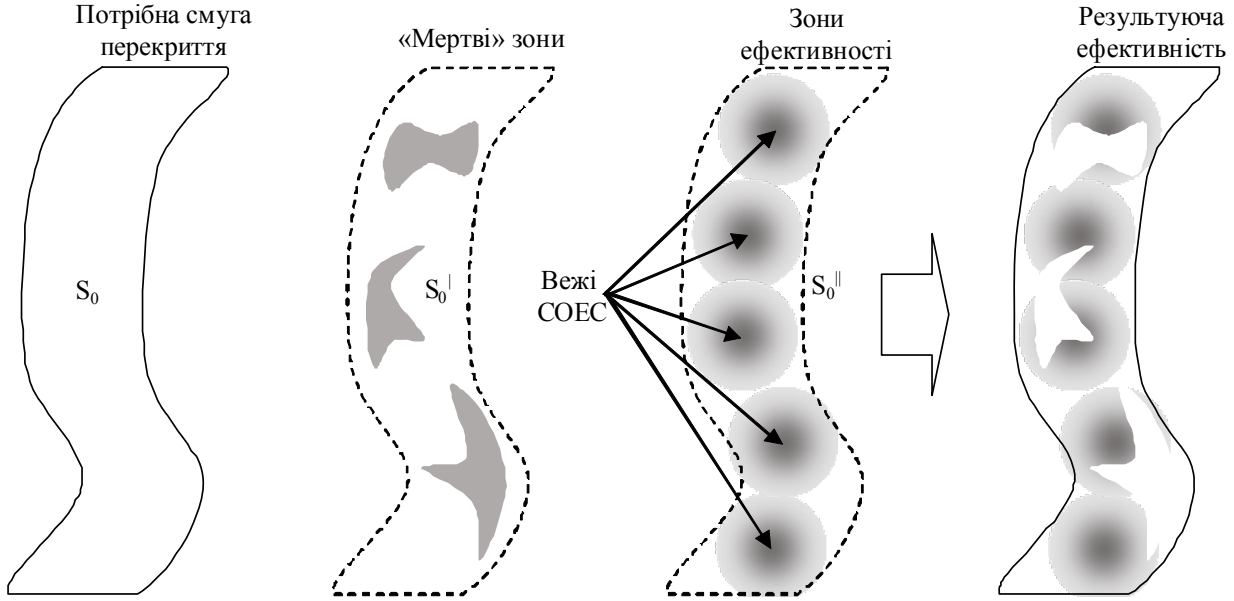


Рисунок 1 – Схема визначення ефективності виявлення цілі з використанням СОЕС

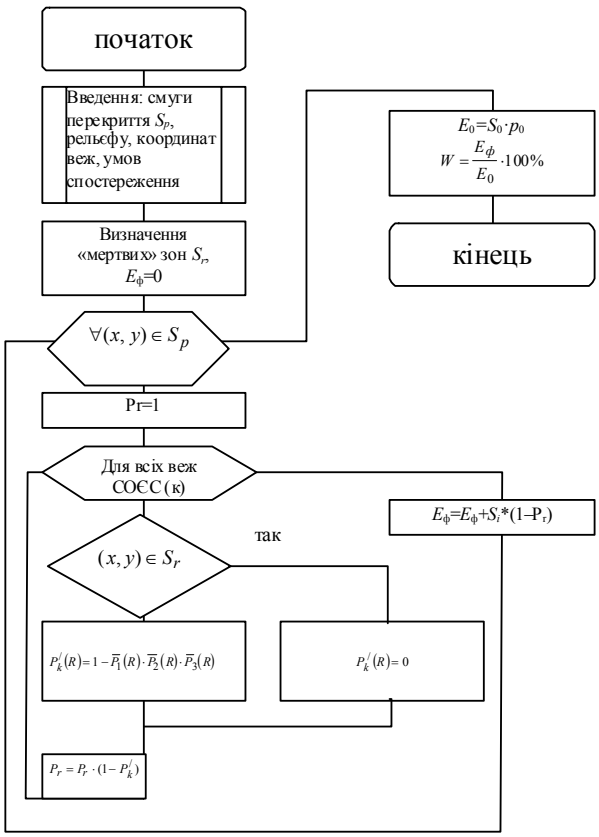


Рисунок 2 – Блок-схема обчислення ефективності прикриття необхідної смуги перекриття

Для визначення видимості ділянки місцевості, яка відповідає кожному пікселю, використовується авторський алгоритм, що ґрунтується на швидкому алгоритмі комп'ютерної графіки побудови відрізків на растрі – алгоритмі Брезенхема. Для кожної точки на місцевості від вежі спостереження до вказаної ділянки здійснюється обчислення висоти проходження променю (використовується рівняння прямої) і порівнюється з висотою рельєфу в цій точці. Якщо висота рельєфу є більшою – умова видимості порушується, перебір точок місцевості припиняється і досліджувана ділянка відноситься до «мертвої» зони. Порівняння програмної реалізації запропонованого алгоритму з програмною реалізацією інших аналогічних алгоритмів (r.viewshed в GRASS GIS) визначення зон видимості на одній обчислювальній платформі показала в декілька разів більшу швидкодію.

Після визначення зон видимості стає доступною кнопка «Ефективність», яка запускає процедуру обчислення (7). При визначенні ефективності враховуються умови проведення спостереження (час доби, погодні умови), вид цілі і необхідний граничний рівень ефективності прикриття. Введення цих даних передбачене в головному вікні програми. Для кожного з варіантів умов проведення спостереження у програмі задані параметри m_R і σ_R, необхідні для обчислення (3).

З використанням картографічного сервісу Google Maps було визначено розміщення веж спостереження СОЕС. Результат обчислення показника (7) показав низьку ефективність існуючого прикриття необхідної смуги перекриття. У випадку малої цілі ця ефективність складає 47,57 що менше 50%. Однією з причин цього є нера-

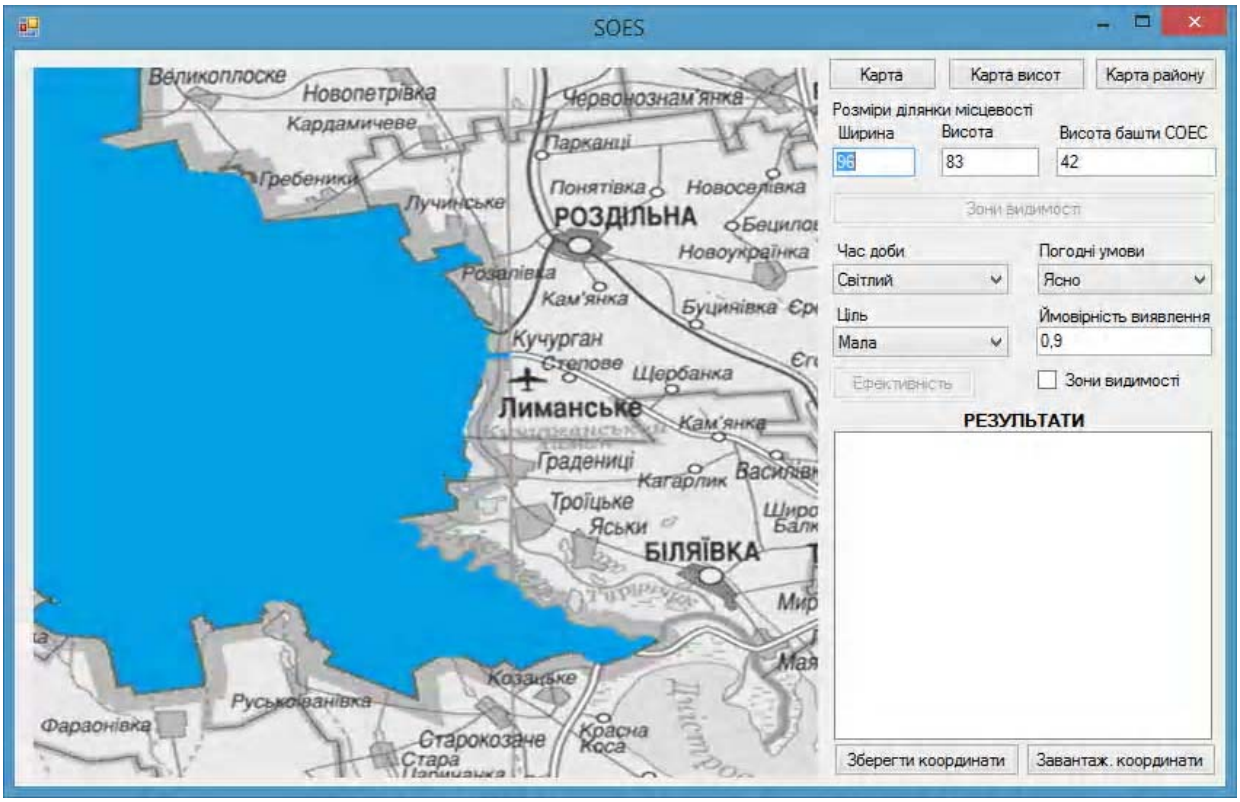


Рисунок 3 – Програма для визначення ефективності прикриття необхідної смуги перекриття з використанням СОЕС

ціональне розташування веж спостереження, яке не повною мірою враховує особливості рельєфу місцевості і форму необхідної смуги перекриття. В окремих випадках вежі встановлені на краю смуги. Звичайно, для малих цілей ефективність зі збільшенням відстані достатньо швидко спадає. Тому при невдалому розташуванні веж ефективне спостереження здійснюється лише по малій частці потрібної смуги перекриття. Одна з веж встановлена в місці, де смуга перекриття є вузькою. Тому значна частка потенційної ефективної площі спостереження втрачається, оскільки вона знаходиться поза межами смуги перекриття.

Після вибору іншого можливого більш раціонального розташування веж спостереження були отримані значно кращі результати. Цей спосіб розміщення веж отриманий шляхом незначних переміщень окремих з них. Для одного з варіантів умов спостереження вікно програми з результатами представлене на рис. 4. Для зручної інтерпретації результатів у програмі кольором відмічаються «мертві зони» та ефективність ведення спостереження.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати проведених розрахунків для різних варіантів умов спостереження (табл. 1) свідчать про можливість вдосконалення існуючої СОЕС за рахунок більш ефективного розташування веж спостереження.

З даних, наведених у табл. 1, випливає, що найбільше зростання *W* (практично у два рази) за рахунок кращого розташування веж досягається по малих цілях. У випадку середніх цілей значення *W* є кращими приблизно на 50%. Для великих цілей таке зростання є більш скромним і становить лише декілька відсотків.

Таблиця 1 – Оцінювання ефективності СОЕС

Погодні умови	Ціль	*W* початкова, %	*W* можлива, %
ясно	мала	47,57	75,37
	середня	59,11	85,07
	велика	97,47	99,16
дощ	мала	38,67	64,58
	середня	47,57	75,37
	велика	94,87	99,16

6 ОБГОВОРЕННЯ

Це пояснюється тим, що ефективна дальність спостереження ТЗС по великих цілях забезпечує значне перекриття зон для сусідніх веж. Тому остаточна ефективність обмежується лише негативним впливом рельєфу, що приводить до появи «мертвих» зон. Однак навіть у цьому випадку, як випливає з табл. 1, можливе більш ефективне розташування веж, при якому зменшується площа цих зон.

ВИСНОВКИ

Таким чином, за результатами проведеного дослідження в роботі запропоновані показники для оцінки ефективності ведення спостереження з використанням СОЕС та наведений можливий підхід до їх знаходження (методика обчислення). На основі використання програмної реалізації запропонованої методики, проведений аналіз впливу різних факторів на ефективність виявлення цілей. Проведені дослідження показали нераціональність існуючої побудови СОЕС та визначили можливі шляхи підвищення ефективності системи за рахунок покращення розстановки веж спостереження.

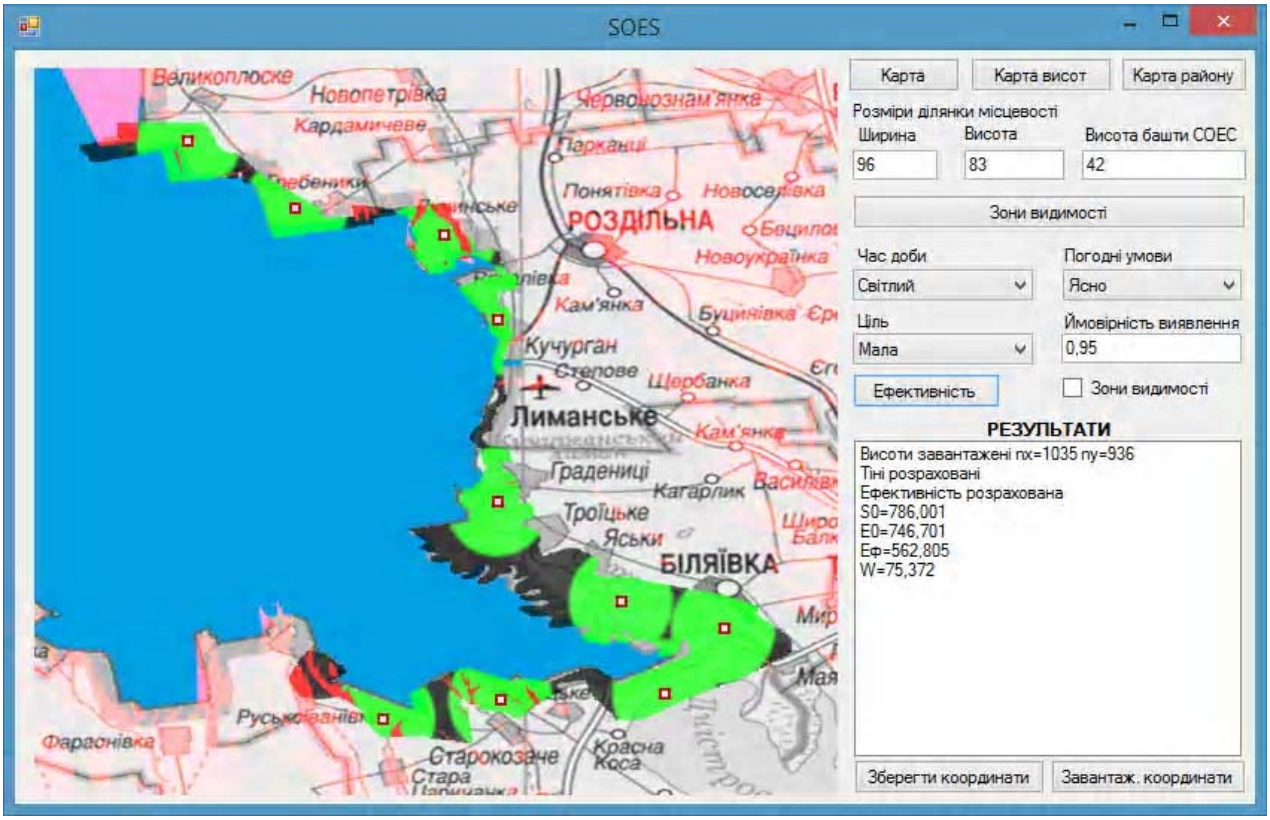


Рисунок 4 – Розрахунок ефективності прикриття необхідної смуги перекриття для можливого розташування веж СОЕС

ПОДЯКИ

У статті визначений науково-методичний апарат оцінки ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження. Роботу виконано в рамках спільних наукових досліджень кафедри інженерного забезпечення та технічних засобів охорони кордону і кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін Національної академії Державної прикордонної служби України. Дослідження здійснювались у рамках науково-дослідних робіт за темами «Опис рельєфу місцевості в задачах статистичної радіофізики з застосуванням геоінформаційних систем» та «Формалізація задач геоінформаційної обробки даних в системі охорони кордону».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tamal K. Curve and Surface Reconstruction : Algorithms with Mathematical Analysis / K. Tamal. – New York : Cambridge University Press, 2006. – 230 p.
2. Owen M. The compression of digital terrain elevation data (DTED) using JPEG 2000 : technical report : DSTO-TR-1548 / M. Owen, M. Grigg. / Command and Control Division Information Sciences Laboratory. – Australia, 2004. – 21 p.
3. Parallel ODETLAP for terrain compression and reconstruction / [J. Stookey, Z. Xie, B. Cutler, W. Randolph, D. Tracy, M. Andrade et al.] // ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems : 16th international conference, Irvine, 5–7 November 2008 : proceedings. ACM New York, 2008, – P. 135–144.
4. Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI / [W. Franklin, M. Inanc, Z. Xie, D. Tracy, B. Cutler, M. Andrade, F. Luk et al.]. // ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings. ACM New York, 2007. – P. 228–236.
5. Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain / [D. Tracy, W. Franklin, B. Cutler et al.] // Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference, San Diego, 26–27 August 2007: proceedings. Bellingham, 2007. – P. 6697–16.
6. Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells / [W. Franklin, C. Vogt, A. Riedl, W. Kainz, G. Elmes et al.] // Progress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006: proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2006. – P. 845–861.
7. Slope accuracy and path planning on compressed terrain / [W. Franklin, D. Tracy, M. Andrade et al.] // Spatial Data Handling : 13 th international symposium, Montpellier, 23–25 July 2008: proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2008. – P. 335–349.
8. Tracy D. Path planning and slope representation on compressed terrain : thesis … doctor of philosophy / Tracy Daniel. – Troy, Rensselaer Polytechnic Institute, 2009. – 106 p.
9. Горбунов В. А. Эффективность обнаружения целей / В. А. Горбунов. – Москва : Воениздат, 1979. – 160 с.
10. Кривошеев В. А. Эффективность охраны государственной границы СССР и основные направления ее повышения / В. А. Кривошеев. – Москва : Воениздат, 1988. – 256 с.
11. Царьов Ю. О. Засоби візуального спостереження охорони державного кордону / Ю. О. Царьов, Д. А. Купрієнко. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2010. – 164 с.
12. Дем'янюк С. М. Покращення характеристик радіолокаційних засобів охорони кордону при застосуванні спектрально-фазового методу обробки сигналів : дис. … канд. техн. наук : 20.02.14 / Дем'янюк Сергій Миколайович. – Хмельницький, 2004. – 235 с.

Стаття надійшла до редакции 23.12.2016.
Після доробки 12.01.2017.

Боровик О. В.[1], Рачок Р. В.[2], Дармороз М. М.[3]

[1]Д-р техн. наук, профессор, начальник кафедры инженерного обеспечения и технических средств охраны границы, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

[2]Канд. техн. наук, доцент, докторант, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

[3]Адъюнкт, Национальная академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Актуальность. В охране государственной границы Украины используется новая система оптико-электронного наблюдения (СОЭН). Однако ее потенциальные возможности не реализованы в полной мере. Одной из причин этого является отсутствие научно-методического аппарата оценки эффективности ее функционирования с учетом различных факторов природного и техногенного характера. Последнее делает актуальным проведение соответствующего исследования.

Цель. Целью работы является разработка методики оценки эффективности функционирования СОЭН.

Метод. В работе предложены показатели эффективности функционирования отдельных технических средств наблюдения и их комплексного использования с одной башни системы оптико-электронного наблюдения. Также в работе предложен новый показатель эффективности функционирования системы оптико-электронного наблюдения. В показателе учтены особенности ведения наблюдения с комплексным использованием различных технических средств охраны границы в различных условиях природного и техногенного характера и с учетом рельефа местности. Обоснование целесообразности их применения предусматривало использование вероятностно-статистических методов.

Результаты. На основе информации о цифровых характеристиках рельефа исследуемого участка осуществлено определение недоступных для наблюдения участков местности, так называемых «мертвых зон». Предложена методика вычисления показателя эффективности функционирования системы оптико-электронного наблюдения. Приведено описание алгоритмической и программной реализации этой методики. С использованием разработанного программного обеспечения проведен анализ особенностей функционирования существующей системы оптико-электронного наблюдения, определены основные проблемные аспекты и направления повышения эффективности функционирования СОЭН.

Выводы. Текущее построение СОЭН не является оптимальным. Возможными направлениями повышения эффективности ее функционирования могут быть оптимизация расстановки башен системы на местности, корректировка высоты размещения на башнях технических средств наблюдения и удачный подбор самих технических средств наблюдения.

Ключевые слова: система оптико-электронного наблюдения, показатель эффективности системы, математические методы, алгоритм.

Borovik O. V.[1], Rachok R. V.[2], Darmoroz M. M.[3]

[1]Dr.Sc., Professor, Department of Engineering and Technical Means of Border Protection, National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

[2]PhD, Associate Professor, Doctorate, National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

[3]Adjunct, National Academy of State Border Guard Service of Ukraine Named After Bohdan Khmelnitsky, Khmelnitsky, Ukraine

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF THE OPTICAL-ELECTRONIC SURVEILLANCE SYSTEM

Context. In the protection of the state border of Ukraine used the new system of optical-electronic observation (SOEO). However, its potential is not fully realized. One of the reasons for this is the lack of scientific and methodological apparatus of evaluation of the effectiveness of its functioning in various factors of natural and technogenic character. The latter makes it relevant to conduct appropriate research.

Objective. The aim of this work is to develop a methodology for assessing the efficiency of SOEO.

Method. The proposed indicators of efficiency of functioning of individual surveillance technology and their integrated use with one tower system opto-electronic surveillance. The work also proposed a new indicator of efficiency of functioning of system of optical-electronic observation. The indicator takes into account features of conducting observations with the comprehensive use of various technical means of border protection in various conditions of natural and technogenic character, and given the terrain. Substantiation of expediency of their application involved the use of probabilistic-statistical methods.

Results. On the basis of information about digital characteristics of the topography of the investigated area carried out determining unobservable areas, the so-called "dead zones". The proposed method of calculating the index of efficiency of functioning of system of optical-electronic observation. The description of algorithmic and software implementation of this technique. Using the developed software the analysis of the functioning of the current system optical-electronic surveillance, identified key problematic aspects and directions of improving the efficiency of SOEO.

Conclusions. Modern building of SOEO is not optimal. Possible directions of increase of efficiency of its functioning can be optimization of the placement of the towers system on the ground, adjusting the height placement on the towers of surveillance technology and a good selection of the technical means of observation.

Keywords: system of optical-electronic observation, system performance indicator, mathematical methods, algorithm.

REFERENCES

1. Tamal K. Curve and Surface Reconstruction : Algorithms with Mathematical Analysis. New York, Cambridge University Press, 2006, 230 p.
2. Owen M., Grigg M. The compression of digital terrain elevation data (DTED) using JPEG 2000 : technical report : DSTO-TR-1548, *Command and Control Division Information Sciences Laboratory*. Australia, 2004, 21 p.
3. Stookey J., Xie Z., Cutler B., Randolph W., Tracy D., Andrade M. et al. Parallel ODETLAP for terrain compression and reconstruction, ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems : 16th international conference, Irvine, 5–7 November 2008 : proceedings. ACM New York, 2008, pp. 135–144.
4. Franklin W., Inanc M., Xie Z., Tracy D., Cutler B., Andrade M., Luk F. et al.Smugglers and border guards – The GeoStar Project at RPI, *ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems : 15th international symposium, Seattle, 7–9 November 2007 : proceedings*. ACM New York, 2007, pp. 228–236.
5. Tracy D., Franklin W., Cutler B., Andrade M., Luk F., Inanc M., Xie Z. et al.Multiple observer siting and path planning on a compressed terrain, *Advanced Signal Processing Algorithms, Architectures, and Implementations : 17th international conference*. San Diego, 26–27 August 2007: proceedings. Bellingham, 2007, pp. 6697–16.
6. Franklin W., Vogt C., Riedl A., Kainz W., Elmes G. et al.Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells, P*rogress in Spatial Data Handling : 12th international symposium, University of Vienna, 12–14 July 2006: proceedings*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, pp. 845–861.
7. Franklin W., Tracy D., Andrade M., Muckell J., Inanc M., Xie Z., Cutler B. et al.Slope accuracy and path planning on compressed terrain, *Spatial Data Handling : 13th international symposium, Montpellier*, 23–25 July 2008: proceedings. Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 335–349.
8. Tracy D. Path planning and slope representation on compressed terrain : thesis … doctor of philosophy. Troy, Rensselaer Polytechnic Institute, 2009, 106 p.
9. Gorbunov V. A. Jeffektivnost' obnaruzhenija celej. Moscow, Voenizdat, 1979, 160 p.
10. Krivosheev V. A. Jeffektivnost' ohrany gosudarstvennoj granicy SSSR i osnovnye napravlenija ee povyshenija. Moscow, Voenizdat, 1988, 256 p.
11. Car'ov Ju. O., Kuprienko D. A. Zasobi vizual'nogo sposterezhennja ohoroni derzhavnogo kordonu. Hmel'nic'kij, Vid-vo NADPSU, 2010, 164 p.
12. Dem'janjuk S. M. Pokrashhennja harakteristik radiolokacijnih zasobiv ohoroni kordonu pri zastosuvanni spektral'no-fazovogo metodu obrobki signaliv : dis. … kand. tehn. nauk : 20.02.14. Hmel'nic'kij, 2004, 235 p.

UDC 519.816

Kolpakova T.[1], Oliinyk A.[2], Lovkin V.[3]

[1]Senior lecturer of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine
[2]PhD, Associate Professor, Associate Professor of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine
[3] PhD, Associate Professor of Software Tools Department, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

INTEGRATED METHOD OF EXTRACTION, FORMALIZATION AND AGGREGATION OF COMPETITIVE AGENTS EXPERT EVALUATIONS IN A GROUP

Context. The problem of extraction, formalization and aggregation of expert evaluations performed during selection of the best solution from possible alternatives set was considered. The problem actuality is defined by different application areas, additional analysis necessity and group evaluation under uncertainty.

Objective. The research objective was to raise quality of the decisions made by group of experts due to increase of individual expert evaluation process efficiency and improvement of evaluation aggregation process.

Method. The integrated method which consists of individual and group evaluation was proposed for the problem solution.

The modified method of extraction and formalization of individual expert evaluations which is based on the analytic hierarchy process modification and includes absolute and relative evaluation phases was proposed. It evaluates expert competence based on confidence coefficient for expert judgments.

The modified method of agent group evaluation based on summation of individual expert evaluations of every alternative was proposed. It makes total evaluation based on relative quantitative importance of the agents and confidence coefficients for judgments of every group participant. It gives preference to judgments of qualified experts to increase solution quality.

Results. The experimental investigation of the proposed methods confirmed availability of the developed mathematical support. The proposed methods are able to detect and control nontrivial issues in tasks which are solved.

Conclusions. Scientific novelty of the paper consists in the proposed integrated method of extraction, formalization and aggregation of expert evaluations in group which enables to define integrated assessment of competitive agents as well as to evaluate confidence coefficient for expert judgments directly during individual evaluation process and to use it in the following group decision-making phase.

Practical significance of the paper results consists in the developed information technology which made it possible to put the method into practice for solving of the tender support tasks and experiment results.

Keywords: expert evaluation, group evaluations, individual evaluations, expert competence, competitive agents.

NOMENCLATURE

A – pairwise comparison matrix which elements are criteria or agents;

Ag – set of competitive agents;

a_{rp} – result of comparison of the r object with the p object according to general criterion;

B – pairwise comparison matrix of competitive agents according to criteria;

b_{ij} – evaluation of the i-th agent according to the j-th criterion;

C – criterion set;

D – set of competitive agents evaluations;

d_{best} – agent which is considered most preferable;

d_i – part of the i-th agent in the total estimate;

f_1 – function which extracts element with the largest key value;

f_2 – functional dependence;

gw_g – global priority vector for the g-th expert;

gw_g^{best} – agent which is considered most preferable by the g-th expert;

gw_{gi} – element of global priority vector which corresponds to the evaluation of the i-th agent by the g-th expert;

KA – number of compared elements (criteria or agents);

KM – number of evaluation criteria;

KN – number of agents;

KS – number of experts;

PCM – pairwise comparison matrix;

Q – set of “control” questions;

q_k – comparative evaluation of random agent pair from the k matrix;

S – set of experts;

s_g – the g-th expert from the set S;

Sum_i – total evaluation of the i-th competitive agent;

v_g – confidence coefficient for judgments of the expert s_g;

$v_g(k)$ – confidence coefficient for judgment of the g-th expert on the k-th question;

W – local priority vector;

w_r – the r-th element of local priority vector W.

INTRODUCTION

The problems of selection of one solution from the set of possible variants are known in different activity areas. These problems are often characterized by the fact that the choice has significant impact on problem-solving environment state. At the same time most commonly it isn’t possible to select the best solution from the set of alternatives in such problems without additional analysis of all possible variants as well as factors which impact on solution quality.

As factors which are evaluation criteria can be not only quantitative but also qualitative, and evaluation is executed under uncertainty, automatic decision-making isn’t possible.

© Kolpakova T., Oliinyk A., Lovkin V., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-11

Hence expert knowledge are used for selection of the best variant from the set of alternatives.

To raise objectivity of evaluation procedure it should be done by more than one expert. However one part of experts in group may turn out to be more competent than others in the problem which is solved, so judgments of this part of expert group should be preferred during aggregation of group evaluation.

So the development of integrated method which enables to extract and aggregate expert evaluations taking into account competence of every expert is actual.

Object of the research is process of formalization and aggregation of expert evaluations. Subject of the research is methods of evaluation performed during selection of solutions from the set of alternatives (which are considered as competitive agents).

The research objective is to raise quality of the decisions made by group of experts due to increase of individual expert evaluation process efficiency and improvement of evaluation aggregation process.

The following tasks were defined to achieve the research objective:

– improvement of the method of extraction and formalization of expert judgments;

– development of the method of expert competence evaluation during individual evaluation process;

– improvement of the method of group evaluation based on individual expert evaluations taking into account expert competence;

– practical investigation of the proposed methods efficiency using the developed information technology.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose we have the set Ag of competitive agents, the set S of experts who can estimate these agents and the set C of the evaluation criteria.

Then the problem of competitive agents selection is to define estimates $D = \{d_i \mid i = 1,..., KN\}$ of each agent from the set Ag using transformation $i = f_1(Ag_j), j = 1..KN$, which executes descending ordering according to the values of d_i.

Values of elements from the set D are defined by the dependence $D = f_2(C, S)$. Method of determination of the dependence should be proposed in the paper for competitive agents selection problem solving.

It should be noted that the given problem includes also competitive agent selection problem which consists in selection of competitive agent with the biggest part in total evaluation $d_{best} = \max_i d_i$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

When decision is made by expert group, collaboration using open dynamic discussion has substantial disadvantages which can impact on decision, making it subjective [1–4]. Therefore in some circumstances it is more efficient to question experts individually, permitting them to use only personal experience making judgments [5–6]. At the same time expert should be proposed to place all possible solutions in descending order of its correspondence to the task as well as to estimate solutions quantitatively determining this correspondence level or relative priority of each alternative comparing it with another one. To obtain such estimations there is a lot of traditional methods: the Schulze method [7], the method of preference [8], the analytic hierarchy process [9], fuzzy methods and the COPRAS method [10]. But the described methods have substantial disadvantages which are critical for the problem which is solved. So the Schulze method and the method of preference make evaluations only by one criterion and limit scale of correspondence to the task by natural numbers. The analytic hierarchy process is sufficiently laborious and doesn't enable to take into account correspondence level of considered variants to the problem objective. Fuzzy methods may be unefficient for practical tasks, because these methods can make inaccuracy for similar alternative evaluations during transformation of triangular numbers to real ones. The COPRAS method solves tasks of multicriterion alternatives evaluation based on its correspondence to the task objective, but this method doesn't enable to detect its priorities comparing with each other. The methods [11–19] enable to make evaluations according to several criteria based on association rules synthesis [11], decision trees [12], radial basis neural networks [13], production rules [14], neuro-fuzzy networks [15], cascade systems [16] and sequential [11, 17] or parallel [18, 19] computing. However these methods are applicable only when training data samples, which contain collected information about objects and processes under consideration, are available, that makes difficult and in some circumstances eliminates possibility of its applicability for solving of tasks which need expert evaluation.

As analysis result it should be noted that regarding the problem which is considered decomposition approach of the analytic hierarchy process enables to develop the most appropriate problem model [20], since experts can use quantitative and qualitative criteria for evaluation of agents using qualitative criteria based on clear scale.

Thus disadvantages of existing expert evaluation methods cause necessity of improvement of methods which conduct individual evaluation of competitive agents by expert group and further evaluations aggregation taking into account competency of every expert.

3 MATERIALS AND METHODS

Currently only one approach is usually used for extraction and formalization of expert judgments at a time. Possible approaches include the following ones: expert can estimate agent as consistent entity based on its correspondence to the given problem or expert can compare all agents with each other creating relative rating. Both these approaches give only one-track evaluation. For integrated evaluation of alternatives as competitive agents within the scope of the current problem it was proposed to make evaluation using two approaches [21–22]:

– absolute evaluation as determination of competitive agents correspondence to the customization demands for each criterion;

– relative evaluation based on comparison of agents with each other according to each criterion.

At the beginning of the proposed method of extraction and formalization of individual expert evaluations level of

correspondence of competitive agents to the problem statement according to each criterion is evaluated (absolute evaluation). This phase is made by absolute percentage evaluation (from 0 to 100%) of each agent according to each criterion comparing to the problem statement requirements. After evaluation obtained values has to be normalized using division by 100. The result of this stage is the matrix B of the size KNxKM which consists of evaluations $b_{ij} \in [0,1]$ for $i = 1,...,KN$, $j = 1,...,KM$:

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & ... & b_{1KM} \\ b_{21} & b_{22} & ... & b_{2KM} \\ ... & ... & ... & ... \\ b_{KN1} & b_{KN2} & ... & b_{KNKM} \end{pmatrix}.$$

Then the modified analytic hierarchy process is used to evaluate agents comparatively according to each criterion (relative evaluation).

Relative evaluation process is generally represented on activity diagram (fig. 1).

The method of paired comparisons [9] is used to compare criteria according to the given task and to compare agents according to criteria. According to this method pairwise comparison matrices (PCM) are obtained from the results of comparison of every row element with every column element.

So the matrix A of size KAxKA is obtained from elements a_{rp} which are presented by real numbers:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & ... & a_{1KA} \\ a_{21} & 1 & ... & a_{2KA} \\ ... & ... & ... & ... \\ a_{KA1} & a_{KA2} & ... & 1 \end{pmatrix}.$$

Every expert that takes part in the evaluation process has to compare all elements with each other presenting evaluations as numeric values in accordance with fundamental ratio scale [23] and has to complete corresponding PCM.

One of the main disadvantages of the method of paired comparisons is its laboriousness. It is necessary to analyze fundamental properties of PCM [9] to reduce the number of comparison operations which have to be executed by expert.

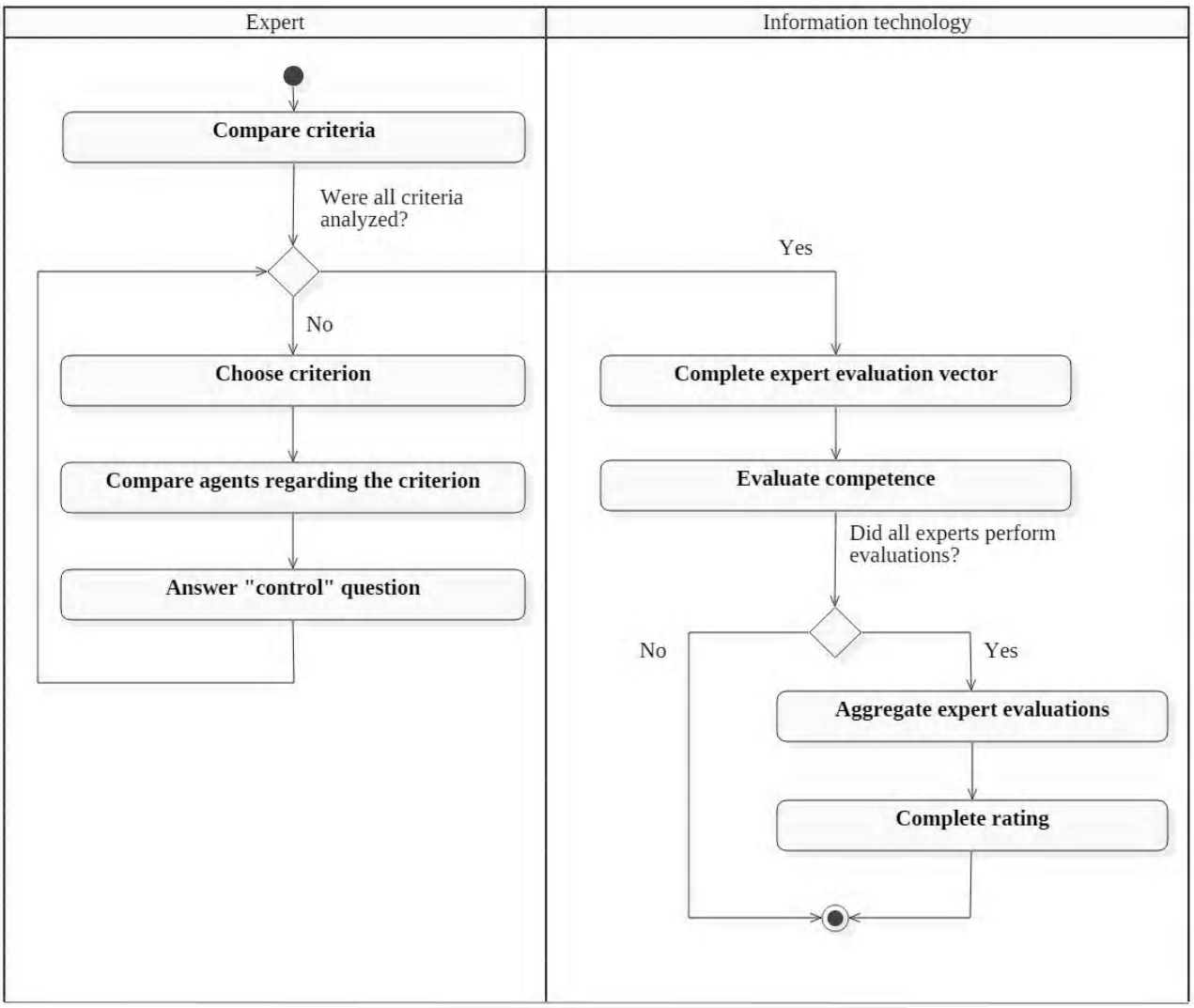


Figure 1 – Activity diagram for relative agent evaluation (UML 2.5 notation)

The main property of PCM is the following: for each r, $p=1,...,KA$ elements $a_{rp}>0$. Besides that under $r=p$ $a_{rp}=1$, because these elements present comparisons of each element with oneself and have to correspond to equal significance.

The third property is inverse symmetry of the matrix about the main diagonal. For each r, $p=1,...,KA$ $a_{pr}=1/a_{rp}$, so expert has to complete only evaluations which are situated above the main diagonal.

Thus the PCM A will take the following form:

$$A=\begin{pmatrix} 1 & a_{12} & ... & a_{1KA} \\ 1/a_{12} & 1 & ... & a_{2KA} \\ ... & ... & ... & ... \\ 1/a_{1KA} & 1/a_{1KA} & ... & 1 \end{pmatrix}.$$

The phase of PCM filling has to be done for every hierarchy level.

The results of this phase are PCMs where criteria of the same hierarchy level are compared with each other, criteria of lower hierarchy level are compared with each other according to criteria of higher hierarchy level, if there are ones, and agents are compared with each other according to criteria.

Then local priority vectors are obtained from the collection of PCMs. Local priority vector $W=(w_1,w_2,...,w_{KA})^T$ has to be determined for every obtained PCM. The main property of the obtained local priority vectors is that sum of vector components equals 1, that is $\sum_{r=1}^{KA} w_r = 1$.

To obtain global priority vector $gw_g=\{gw_{g1},gw_{g2},...,gw_{gKN}\}$ for each g-th expert, local priorities of each evaluated agent are multiplied by priority of the corresponding criterion and results are added to each other.

Then the corresponding values of the global priority gw_{gi} of every agent are compared with each other. Agent which is considered most preferable by the g-th expert will have the biggest value of the global priority:

$$gw_g^{best} = \max_i gw_{gi},\ i=1,...,KN.$$

The tasks which are solved in the context of the considered problem are seldom completely identical, because every task has its own features and differences: for example technical or time constraints. Application of the analytic hierarchy process demands familiarity with these features, constraints and its influence on the final result from experts. However it isn't always possible because of the wide specialization of experts who take part in questioning in practice.

In this case it is necessary to evaluate additionally expert competence and confidence in decisions made by him [24]. Expert competence level should be then used for aggregation of group evaluation [25].

Confidence coefficient v_g corresponds to quantification of the level of confidence in competence of expert $s_g \in S$ $(g=1,...,KS)$ in the presented problem.

It is proposed to add set of «control» questions Q to pairwise comparison sequence to evaluate confidence coefficients for expert judgments. Each element of the set Q is defined as $q_k = a_{rp}$ $(r \in \{2,KN\},\ p \in \{1,KN-r\})$ which is comparative evaluation of random pair of agents from the bottom part of the k-th PCM where agents are compared according to criteria. So the set Q is defined in the following form:

$$Q=\{q_k \mid k=1,...,KM\}.$$

«Control» question is a question which was restated and repeated to expert. Such questions enable to determine confidence of expert answering main questions in agents evaluation process.

Since all elements of the matrix A are inverse symmetrical that is for each r, $p=1,...,KA$ $a_{pr}=1/a_{rp}$, it is possible to verify if expert judgments which were gotten comparing random pair of agents are equal to expert judgments which were gotten during primary comparisons. This verification is based on evaluation of PCM elements which are situated under the main diagonal as inverse proportion to the values of elements which are situated in the matrix part which was filled by expert.

For each k-th PCM random pair of agents p and r is selected from the elements of the matrix which are situated under the main diagonal and is proposed to expert for comparison.

If values a_{rp} and a_{pr} are bigger or lower than 1 at the same time, then confidence coefficient for the given question should be specified as $v_g(k)=0$ (the g-th expert showed his incompetence answering the k-th question). Otherwise confidence coefficient for the given question should be calculated using the following expression:

$$v_g(k)=\begin{cases} 1-\dfrac{|a_{rp}-1/a_{pr}|}{\max(a_{rp},1/a_{pr})}, & (a_{rp}\ge 1)\cap(a_{pr}\le 1); \\ 1-\dfrac{|a_{pr}-1/a_{rp}|}{\max(a_{pr},1/a_{rp})}, & (a_{rp}<1)\cap(a_{pr}>1). \end{cases}$$

Overall confidence coefficient v_g for judgments of the expert s_g is calculated using the following formula:

$$v_g=\frac{\sum_{k=1}^{KM} v_g(k)}{KM}.$$

After questioning is finished, final value of v_g should be evaluated. If $v_g=1$ expert should be considered as competent and his judgments can be trusted. If $v_g=0$ expert should be considered as incompetent relatively to the

solved task. In this case evaluations of this expert should not be taken into account in aggregation of group evaluation.

After all experts of the group made own evaluations, global priority vector gw_g and confidence coefficient for expert judgments v_g are defined for each expert from number *KS*, the method of group agent evaluation has to be executed. This method calculates total evaluation Sum_i for each *i*-th agent based on summation of evaluations gw_{gi} which were given to the agent by the *g*-th expert. At the same time evaluations has to be multiplied by confidence coefficients for expert judgments:

$$Sum_i = \sum_{g=1}^{KS} v_g \cdot gw_{gi} .$$

Thus the bigger value confidence coefficient v_g for expert judgments has, more impact *g*-th expert will have on overall evaluation.

After summation is done, overall rating of competitive agents *D* is defined. Each individual evaluation is multiplied by confidence coefficient for expert judgments and part d_i of each *i*-th agent in the total evaluation is calculated using the following formula:

$$d_i = \frac{Sum_i}{\sum_{i=1}^{KN} Sum_i}, \quad \sum_{i=1}^{KN} d_i = 1.$$

Agents are ordered by decrease of d_i values, in that way defining function f_1 which can be implemented as binary heap. The result of this operation is agent rating, where agent which is considered most preferable by expert group heads the list. Based on the obtained rating responsible person makes final decision on the best agent. In most cases it is agent which is the first in the list and it becomes solution of the competitive agents selection problem.

4 EXPERIMENTS

The proposed methods were used for the development of the competitive agents selection information technology.

The tasks of competitive agents selection were solved for experimental investigation of practical availability of the proposed methods using the developed information technology.

The investigation was made based on data collected from tender tasks, participant offers and tender results accumulated by design companies LLC “SK Inzhenernye systemy” and “VST” (Ukraine) and evaluations of experts who were selected and invited based on the tender tasks.

The following competitive agents (companies) were considered in the task of tender for design, supply and mounting of metalware and barriers:

– AO “Metallist SMK”, Kharkiv;
– Atlas Word (Germany), branch in Kyiv;
– Borga Hale, Gdynia, Poland.

The following competitive agents were considered in the task of supply of materials and equipment for mounting of shopping center buildings:

– Master Profi, Dnipro;
– Remko, Kyiv;
– Atlas Word, Kyiv;
– Askon, Kamyanske;
– IBT, Kyiv.

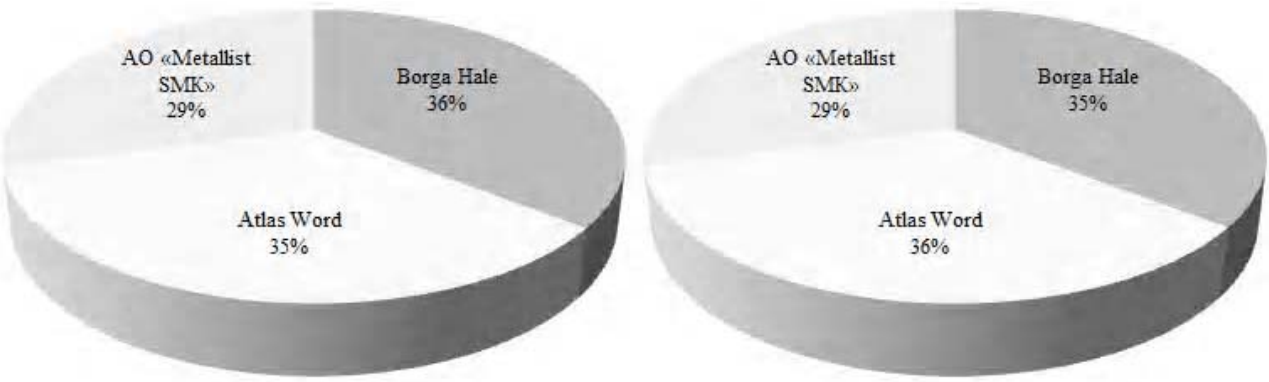
Design companies traditionally used pricing appraisal or oral discussion method for evaluation during tender process. However since tender results can be determined in long time horizon [26] it is necessary from one to six months after tender is ended for its efficiency evaluation. During experimental investigation the results of traditional approach were compared with the results obtained by the proposed integrated method.

5 RESULTS

Solving the task of tender for design, supply and mounting of metalware and barriers the derived proposals were formalized as competitive agents and were proposed to the group of three experts for evaluation. Expert evaluations were used for agents rating aggregation.

The rating of competitive agents obtained by the traditional approach (without taking into account confidence coefficient for expert judgments) can be summarized in the following list (fig. 2a):

– Borga Hale – 35,60%;



a b

Figure 2 – The results of competitive agents evaluation in the task of tender for design, supply and mounting of metalware and barriers:
a – without taking into account confidence coefficient for expert judgments;
b – taking into account confidence coefficient for expert judgments

– Atlas Word – 35,35%;
– AO "Metallist SMK" – 29,05%.

The rating of competitive agents obtained using the modified methods (taking into account confidence coefficient for expert judgments) can be summarized in the following list (fig. 2b):

– Atlas Word – 35,60%;
– Borga Hale – 35,50%;
– AO "Metallist SMK" – 28,9%.

Solving the task of supply of materials and equipment for mounting of shopping center buildings the derived proposals were formalized as competitive agents and were proposed to the group of four experts for evaluation.

Before the beginning of evaluation process experts were proposed to examine tender task using the developed information technology. Then traditional approach based on oral discussion was used for evaluation. Based on oral discussion and simple voting methods expert commission elected the tender offer of "Master Profi" because of its minimum cost and delivery time.

Then agents evaluation was repeated by the same expert commission using competitive agents information technology based on the proposed methods (fig. 3).

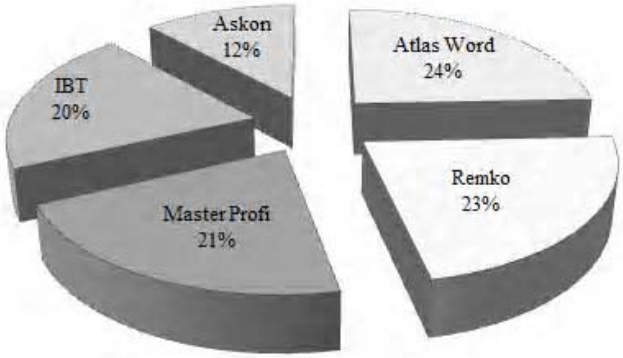


Figure 3 – The results of competitive agents evaluation in the task of supply of materials and equipment for mounting of shopping center buildings taking into account confidence coefficient for expert judgments

Besides that individual expert preferences and confidence coefficients for expert judgments were defined (fig. 4).

The rating of competitive agents obtained using the integrated method and taking into account confidence coefficient for expert judgments can be summarized in the following list:

– Atlas Word – 24.35%;
– Remko – 22.40%;
– Master Profi – 21.31%;
– IBT – 20.13%;
– Askon – 11.81%.

6 DISCUSSION

Results of competitive agents evaluation in the task of tender for design, supply and mounting of metalware and barriers showed that taking into account confidence coefficient for expert judgments changed positions of participants in rating. It should be noted that the bigger the dispersion of confidence coefficients for expert judgments is, more impact experts with bigger values of confidence coefficient will have on tender results.

As the result of the proposed integrated method application to the tender for supply of materials and equipment for mounting of shopping center buildings the tender offer of the company «Master Profi» which was chosen during oral discussion occupied only the third place in the rating. It is caused by its failures which were missed during basic analysis: delayed starting date of execution phase and small production volume regarding competitors.

Thus investigation results confirm availability of the developed competitive agents selection information technology in whole and the proposed integrated method particularly for practical tasks solving since the proposed problem solution helps to detect nontrivial problems and failures of the considered competitive agents.

Analysis of the obtained results showed that the proposed integrated method of extraction, formalization and aggregation of expert evaluations enabled to raise accuracy

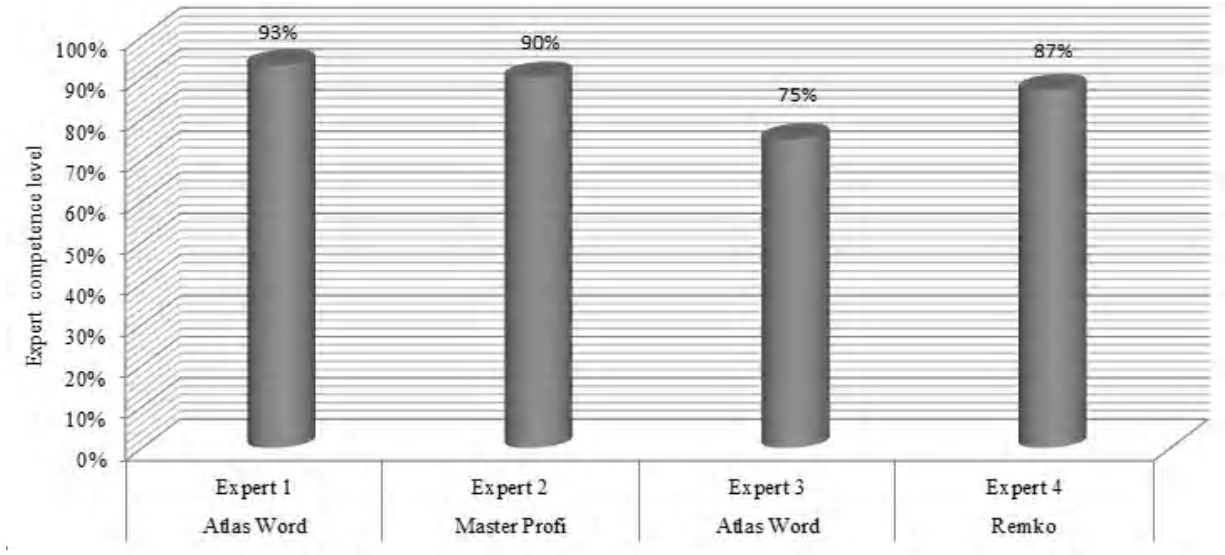


Figure 4 – Expert competence level

of group evaluations due to formalization of individual evaluations derivation process as well as implementation of expert competence evaluation mechanism. In turn it ensures group decision making process efficiency and enables to raise quality of the final solution.

The proposed integrated method can be used for practical expert evaluation tasks solving in many areas of industry, economics and medicine: tender processes in all areas of state and business activity, complicated clinical decision support, expert evaluation of techware quality in industry.

In what follows it is planned to investigate availability of the developed method for solving of practical tasks in other activity areas and the dependence of the method efficiency on application domain.

CONCLUSIONS

In this paper actual problem of competitive agents selection was solved based on group expert evaluations.

Scientific novelty of the paper consists in the proposed integrated method of extraction, formalization and aggregation of expert evaluations in group which enables to define integrated assessment of competitive agents as well as to evaluate confidence coefficient for expert judgments directly during individual evaluation process and to use it in the following group decision-making phase. The proposed method gives preference to judgments of competent experts in the overall evaluation, at the same time increasing quality of the decision.

Practical significance of the paper results consists in the developed information technology and experiment results. Information technology implemented the proposed integrated method that made it possible to put the method into practice for solving of the tender support tasks. Experiments confirmed availability of the developed mathematical support and made it possible to recommend it for practical application.

Application of the proposed mathematical support and the developed information technology for other practical tasks directly concerned with competitive agents evaluation should be noted as further research directions.

ACKNOWLEDGEMENTS

The research was made in the context of the state budget research and development project “Methods and tools of computational intelligence and parallel computing for big data processing in diagnostic systems” (state registration number 0116U007419) of Zaporizhzhya National Technical University with the support of the international project “Centers of Excellence for young RESearchers” of the Tempus programme of the European Union (registration number 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES).

REFERENCES

1. Карнышев А. Д. Психология деятельности и управления : учеб. пособие / А. Д. Карнышев, Е. А. Иванова. – Иркутск : ИГЭА, 2001. – 186 с.
2. Мулен Э. Кооперативное принятие решений : аксиомы и модели / Э. Мулен. – М. : Мир, 1991. – 464 с.
3. Майерс Д. Социальная психология / Д. Майерс. – СПб. : Питер, 2013. – 800 с.
4. Ambrusa A. How individual preferences are aggregated in groups: An experimental study / A. Ambrusa, B. Greinerb, P. A. Pathakc // Journal of Public Economics. – 2015. – Volume 129. – P. 1–13.
5. Budziński R. Model of competence of experts in the computer decision support system / R. Budziński, J. Becker // Quantitative Methods In Economics. – 2013. – Volume XIV, Issue 1. – Pp. 53-64.
6. Patel H. T. A Study on the Effectiveness of Group Activity and Group Discussion Method in English / H. T. Patel // International Journal of Research in Humanities and Social Sciences. – 2014. – Volume 2, Issue 1. – P. 13–15.
7. Parkes D. C. A Complexity-of-Strategic-Behavior Comparison between Schulze’s Rule and Ranked Pairs / D. C. Parkes, L. Xia / / Proceedings of the Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence. – 2012. – P. 1429–1435.
8. Roszkowska E. Rank ordering criteria weighting methods – a comparative overview / E. Roszkowska // Optimum. Studia Ekonomiczne. – 2013. – № 5 (65). – P. 14–33.
9. Saaty T. L. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process / T. L. Saaty, L. G. Vargas. – Springer US, 2012. – 346 p.
10. An Integrated Approach of Fuzzy Linguistic Preference Based AHP and Fuzzy COPRAS for Machine Tool Evaluation / [H. T. Nguyen, S. Z. M. Dawal, Y. Nukman at al.] // PLOS One. – 2015. – № 10 (9). – 24 p.
11. Oliinyk A. Training Sample Reduction Based on Association Rules for Neuro-Fuzzy Networks Synthesis / A. Oliinyk, T. Zaiko, S. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23, № 2. – P. 89–95.
12. Oliinyk A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis / A. Oliinyk, S. A. Subbotin // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2015. – Vol. 24, № 1. – P. 18–27.
13. Subbotin S. A. The method of diagnostic model synthesis based on radial basis neural networks with the support of generalization properties / S. A. Subbotin // Radio Electronics. Computer Science. Control. – 2016. – № 2. – P. 64–69.
14. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection / A. Oliinyk // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2016. – № 1. – P. 40–49.
15. Oliinyk A.O. Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search / A. O. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, S. A. Subbotin // Automatic Control and Computer Sciences. – 2015. – Vol. 49, Issue 1. – P. 11–20.
16. Bodyanskiy Ye. V. An evolving cascade system based on neurofuzzy nodes / Ye. V. Bodyanskiy, O. K. Tyshchenko, O. O. Boiko // Radio Electronics. Computer Science. Control. – 2016. – № 2. – P. 40–45.
17. Oliinyk A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition / A. Oliinyk, S.A. Subbotin // Pattern Recognition and Image Analysis. – 2016. – Vol. 26, № 2. – P. 419–426.
18. 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.
19. Subbotin S. Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence / S. Subbotin, A. Oliinyk, S. Skrupsky // Information and Digital Technologies: International Conference IDT’2015, Zilina, 7–9 July 2015: proceedings of the conference. – Zilina: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015. – P. 336–344.
20. Pangeran M. H. Conceptual model of analytical network process for prioritizing risk in a PPP infrastructure project / M. H. Pangeran, K. S. Pribad // Proceedings of the First Makassar International Conference on Civil Engineering, March 9–10, 2010. – P. 1217–1227.

21. Jao C. S. Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains / Chiang S. Jao. – InTech, 2011. – 478 p.
22. Rush C. Expert Judgement in Cost Estimating: Modelling the Reasoning Process / Christopher Rush, Rajkumar Roy. – Concurrent Engineering. – 2001. – № 9. – P. 271–284.
23. Андрейчиков А. В. Анализ, синтез, планирование решений в экономике / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
24. Shrotriya S. Prediction of the Winner by Using a Weighted Approach of Preferential Balloting Systems on the Basis of Their Satisfied Criterions and Artifice Behavioral Complexity / S. Shrotriya, A. Pandey // 3rd International Conference on Information Security and Artificial Intelligence (ISAI 2012), Singapore. – 2012. – P. 142–146.
25. Wang B. Determining decision makers' weights in group ranking: a granular computing method / B. Wang, J. Liang, Y. Qian // International Journal of Machine Learning and Cybernetics. – 2015. – Volume 6, Issue 3. – P. 511–521.
26. Tao L. Decision Support for Contractor Selection: Incorporating consolidated Past Performance Information / Lijuan Tao. – University of Hong Kong. – 2010. – 184 p.

Article was submitted 14.12.2016.
After revision 29.12.2016.

Колпакова Т. О.[1], Олійник А. О.[2], Льовкін В. М.[3]
[1]Ст. викладач кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна
[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна
[3]Канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ВИДОБУВАННЯ, ФОРМАЛІЗАЦІЇ ТА АГРЕГАЦІЇ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК КОНКУРУЮЧИХ АГЕНТІВ У ГРУПІ

Актуальність. Розглянуто проблему видобування, формалізації та агрегації експертних оцінок під час пошуку найкращого рішення з множини можливих. Актуальність даної проблеми визначається різноманіттям галузей застосування, необхідністю додаткового аналізу та груповим оцінюванням за умов невизначеності.

Мета. Мета даного дослідження полягала в підвищенні якості рішень, що приймаються групою експертів, за рахунок підвищення ефективності процесу отримання індивідуальних експертних оцінок та вдосконалення процесу їх подальшої агрегації.

Метод. Запропоновано комплексний метод, що складається з індивідуального та групового оцінювання, для розв'язання даної проблеми.

Удосконалено метод видобування та формалізації індивідуальних експертних оцінок. Запропонований метод ґрунтується на модифікації методу аналізу ієрархій, містить етапи абсолютного та відносного оцінювання, дозволяє визначити компетентність експерта шляхом обчислення коефіцієнта довіри до його суджень.

Удосконалено метод визначення групових оцінок агентів на основі підсумовування індивідуальних експертних оцінок за кожним рішенням. Даний метод враховує під час обчислення сумарної оцінки кількісну перевагу агентів один над одним та коефіцієнти довіри до суджень кожного учасника групи. Це дозволяє вважати судження компетентних експертів більш значущими з метою підвищення якості отримуваного рішення.

Результати. Проведене експериментальне дослідження підтверджує працездатність розробленого математичного забезпечення. Розроблені методи продемонстрували здатність визначати і усувати неочевидні проблеми в задачах, що розв'язуються.

Висновки. Наукова новизна роботи полягає в тому, що запропоновано комплексний метод видобування, формалізації та агрегації експертних оцінок у групі, який дозволяє визначати комплексну оцінку конкуруючих агентів, а також обчислювати кількісне значення коефіцієнту довіри до суджень експерта безпосередньо в процесі отримання індивідуальної оцінки і в подальшому використовувати її для прийняття групових рішень.

Практична значимість результатів роботи полягає в тому, що розроблено інформаційну технологію, яка реалізує запропонований комплексний метод, що дозволило застосувати на практиці даний метод для розв'язання задачі проведення тендерів, та проведено експерименти.

Ключові слова: експертне оцінювання, групові оцінки, індивідуальні оцінки, компетентність експертів, конкуруючі агенти.

Колпакова Т. А.[1], Олейник А. А.[2], Левкин В. Н.[3]
[1]Ст. преподаватель кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина
[2]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина
[3]Канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ, ФОРМАЛИЗАЦИИ И АГРЕГАЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ ОЦЕНОК КОНКУРИРУЮЩИХ АГЕНТОВ В ГРУППЕ

Актуальность. Рассмотрена проблема извлечения, формализации и агрегации экспертных оценок при поиске наилучшего решения из множества возможных. Актуальность данной проблемы определяется разнообразием областей применения, необходимостью дополнительного анализа и групповым оцениванием в условиях неопределенности.

Цель. Цель данного исследования заключалась в повышении качества решений, принимаемых группой экспертов, за счет повышения эффективности процесса получения индивидуальных экспертных оценок и усовершенствования процесса их последующей агрегации.

Метод. Предложено решение рассматриваемой проблемы в виде комплексного метода, состоящего из индивидуального и группового оценивания.

Усовершенствован метод извлечения и формализации индивидуальных экспертных оценок. Предложенный метод основан на модификации метода анализа иерархий, включает в себя этапы абсолютного и относительного оценивания, позволяет определить компетентность эксперта путем вычисления коэффициента доверия к его мнению.

Усовершенствован метод определения групповых оценок агентов на основе суммирования индивидуальных экспертных оценок по каждому решению. Этот метод учитывает при вычислении суммарной оценки количественное преимущество агентов друг над другом и коэффициенты доверия к мнению каждого участника группы. Это позволяет считать мнение компетентных экспертов более значимым с целью повышения качества получаемого решения.

Результаты. Проведенное экспериментальное исследование подтвердило работоспособность разработанного математического обеспечения. Разработанные методы продемонстрировали возможность выявлять и устранять неочевидные проблемы в решаемых задачах.

Выводы. Научная новизна работы заключается в том, что предложен комплексный метод извлечения, формализации и агрегации экспертных оценок в группе, который позволяет определить комплексную оценку конкурирующих агентов, а также вычислить количественное значение коэффициента доверия к мнению эксперта непосредственно в процессе получения индивидуальной оценки и в дальнейшем использовать его для принятия групповых решений.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что разработана информационная технология, реализующая предложенный комплексный метод, что позволило применить на практике данный метод для решения задач проведения тендеров, и проведены эксперименты.

Ключевые слова: экспертное оценивание, групповые оценки, индивидуальные оценки, компетентность экспертов, конкурирующие агенты.

REFERENCES

1. Karnyishev A. D., Ivanova E. A. Psihologiya deyatelnosti i upravleniya: ucheb. posobie. Irkutsk, IGEA, 2001, 186 p.
2. Mulen E. Kooperativnoe prinyatie resheniy: aksiomyi i modeli. Moscow, Mir, 1991, 464 p.
3. Mayers D. Sotsialnaya psihologiya. Piter, 2013, 800 p.
4. Ambrusa A., Greinerb B., Pathakc P. A. How individual preferences are aggregated in groups: An experimental study. Journal of Public Economics, 2015, Volume 129, pp. 1–13.
5. Budziński R., Becker J. Model of competence of experts in the computer decision support system. Quantitative Methods In Economics, 2013, Volume XIV, Issue 1, pp. 53-64.
6. Patel H. T. A Study on the Effectiveness of Group Activity and Group Discussion Method in English. International Journal of Research in Humanities and Social Sciences, 2014, Volume 2, Issue 1, pp. 13–15.
7. Parkes D. C., Xia L. A Complexity-of-Strategic-Behavior Comparison between Schulze's Rule and Ranked Pairs. Proceedings of the Twenty-Sixth AAAI Conference on Artificial Intelligence, 2012, pp. 1429–1435.
8. Roszkowska E. Rank ordering criteria weighting methods – a comparative overview. Optimum. Studia Ekonomiczne, 2013, No. 5 (65), pp. 14–33.
9. Saaty T. L., Vargas L. G. Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process. Springer US, 2012, 346 p.
10. Nguyen H. T., Dawal S. Z. M., Nukman Y., Aoyama H., Case K. An Integrated Approach of Fuzzy Linguistic Preference Based AHP and Fuzzy COPRAS for Machine Tool Evaluation. PLOS One, 2015, No. 10 (9), 24 p.
11. Oliinyk A., Zaiko T., Subbotin S. Training Sample Reduction Based on Association Rules for Neuro-Fuzzy Networks Synthesis. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2014, Vol. 23, No. 2, pp. 89–95.
12. Oliinyk A., Subbotin S.A. The decision tree construction based on a stochastic search for the neuro-fuzzy network synthesis. Optical Memory and Neural Networks (Information Optics), 2015, Vol. 24, No. 1, pp. 18–27.
13. Subbotin S. A. The method of diagnostic model synthesis based on radial basis neural networks with the support of generalization properties. Radio Electronics. Computer Science. Control, 2016, No. 2, pp. 64–69.
14. Oliinyk A. Production rules extraction based on negative selection. Radio Electronics. Computer Science. Control, 2016, No. 1, pp. 40–49.
15. Oliinyk A. O., Skrupsky S. Yu., Subbotin S. A. Experimental Investigation with Analyzing the Training Method Complexity of Neuro-Fuzzy Networks Based on Parallel Random Search. Automatic Control and Computer Sciences, 2015, Vol. 49, Issue 1, pp. 11–20.
16. Bodyanskiy Ye. V., Tyshchenko O. K., Boiko O. O. An evolving cascade system based on neurofuzzy nodes. Radio Electronics. Computer Science. Control, 2016, No. 2, pp. 40–45.
17. Oliinyk A. A., Subbotin S. A. Association Rules Extraction for Pattern Recognition. Pattern Recognition and Image Analysis, 2016, Vol. 26, No. 2, pp. 419–426.
18. 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.
19. Subbotin S., Oliinyk A., Skrupsky S. Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence. Proceedings of the International Conference on Information and Digital Technologies, 2015, pp. 336–344.
20. Pangeran M. H., Pribad K. S. Conceptual model of analytical network process for prioritizing risk in a PPP infrastructure project. Proceedings of the First Makassar International Conference on Civil Engineering, 2010, pp. 1217–1227.
21. Jao C. S. Efficient Decision Support Systems – Practice and Challenges in Multidisciplinary Domains. InTech, 2011, 478 p.
22. Rush C., Roy R. Expert Judgement in Cost Estimating: Modelling the Reasoning Process. Concurrent Engineering, 2001, No. 9, pp. 271–284.
23. Andreychikov A. V., Andreychikova O. N. Analiz, sintez, planirovanie resheniy v ekonomike. M., Finansyi i statistika, 2012, 368 p.
24. Shrotriya S., Pandey A. Prediction of the Winner by Using a Weighted Approach of Preferential Balloting Systems on the Basis of Their Satisfied Criterions and Artifice Behavioral Complexity. 3rd International Conference on Information Security and Artificial Intelligence (ISAI 2012), Singapore, 2012, pp. 142–146.
25. Wang B., Qian Y. Determining decision makers' weights in group ranking: a granular computing method. International Journal of Machine Learning and Cybernetics, 2015, Volume 6, Issue 3, pp. 511–521.
26. Tao L. Decision Support for Contractor Selection: Incorporating consolidated Past Performance Information. University of Hong Kong, 2010, 184 p.

UDC 004.056

Lakhno V. A.

Dr. Sc. Associate Professor, Head of Complex Information Security Organization Department, European University, Kyiv, Ukraine

DEVELOPMENT OF A SUPPORT SYSTEM FOR MANAGING THE CYBER SECURITY

Context. In this paper the urgent problem of development of software of decision making support systems in information security is solved. Approach is based on a choice of rational options of response to events taking into account operational state-of-health data of a subject to protection.

Objective. Goal of the research is developing a cyber-threats counterwork model using decision support system, choosing rational variants of reactions on the occurrences in cybersecurity, and taking into account current operational data.

Method. The information object cyber security operational management system and the formation of the protection methods rational sets model which is based on a morphological approach is developed. It is proposed to find an optimal variant of the information security perimeter sets using an object function that maximizes the correlation of a consolidated figure of "information security" to consolidated figure "costs".

Results. A model for the operational management of cyber security-critical computer systems was developed. This model allows us to generate different variants of protection sets that are compliant with a computer system taking into account morphological matrices for each security perimeter prepared with the intelligent decision support system. It is proved that the use of the developed decision support systems can significantly reduce the costs planned for the complex means of cyber defense, as well as reduce the time to inform decision-makers on how to counter the identified information security incidents.

Conclusions. Scientific novelty of research consists that the model of operational management of cyber security of an information objects and formation of a rational complex of security features based on morphological approach is for the first time offered. The practical value of the developed methods and instruments is that they allow: to reduce time of development of systems of cyber security, to increase efficiency of planning of rational modular composition of security features due to creation of information and software environment in case of design; to increase validity of the made decisions on operational and to organizational technical control by protection.

Keywords: information safety, information security management, decision support system, morphological approach.

NOMENCLATURE

ACS – automated control systems;
AEIS – audit of CS events;
AVP – antivirus protection;
B – backup;
CIIO – critically important information object;
CONTS – controlling system;
CA – cyber-attacks;
CS – cybersecurity;
DA – data array;
DIC – data integrity control;
DSS – decision support system;
ES – expert systems;
ICS – information-communicative systems;
IDSS – intelligent decision of information security OM support system;
IO – information objects;
IPM – information protection means;
IPR – information protection;
IS – informational security;
ISMC – information security method complex rational structure;
ISMS – information security management system;
ISS – information security systems;
MACS – monitoring and analysis of CS;
MIP – means of information protection;
NLAC – network-level access control;
OM – operational management;
OPIO (V) – the outer perimeter of information object;
PCOI (II) – perimeter of control of information object;
PIS (I) – the perimeter of the information system;
PNE (IV) – the perimeter of the network equipment;
PSIO – physical security of IO;
SDCA – subsystem of detection of CA;
UAC – User Access Control;
UAP (III) – User Access Perimeter;
A – linguistic variable "number of unusual events in network against the spreading of CA";
AL – the number of alternative variants
As_i – DA criticality in i-IO crosspoint;
At_i – IS breach level in i-IO crosspoint;
B – linguistic variable «number of unusual events in the host»;
C – linguistic variable «number of unusual events in IO perimeter»;
CE – communication equipment in an information channel;
C_{ICR} – coefficient that allows to represent a result in a range [0; 1];
DA_j – damage assessment;
DPT_{lm} – security tool for the realization of functional subsystem of l;
EST – external source of threat;
$ICA_{l(m)}$ – internal CA against IA with k-level of criticality;
IMI_{cis_i} – IS incident importance in i-IO crosspoint;
IND – network or IO perimeter indicator;
IST_l^{k-1} – insider source of threat;
l, m – numbers of crosspoints;
L – number of functional subsystems for the perimeter of the IS;

© Lakhno V. A., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-12

LS_i – security measures level in i-IO crosspoint;

MA_{in_l} – indicator of "expenses" for functional subsystem l;

$MA^{ST_{li}}_{K^l_{in}}$ – indicator value "expenses" for security tools ST_{lm};

$MA^{ST_{li}}_{K^l_{LS}}$ – indicator value "security";

MA_l – data for the choice of rational variants;

MA_{LS_l} – indicator of "information security";

n – quantity of crosspoints in IO structure;

NN^k_m – IO crosspoint, on which information with the highest level of criticality (k);

O – access object;

OF – object function of choice;

P_{CA} – CA probability;

$P(z_l)$ – (l) environment status probability;

PP – protocols and packets;

PUR – purpose of decision making;

RCA – remote CA against IO;

RE_j – result;

RO_i – reaction variant;

$RO^{rat}(P_{CA})$ – rational variant of reaction;

RSV – range of synthetic variants of setup;

RUL – model of decision making regarding the choice of the optimal variant of CS tools

SFS – range of functional sub-systems for perimeter IS;

SS_{ne}, SS_h – security services against the method of an CA spreading (networked and host);

ST_{lm} – security tool for the realization of functional subsystem of l;

TL_i – trust level of a device, which reports about IS breaches in i-IO crosspoint;

WCA – possible spreading ways of CA against IO crosspoints;

X – IS events indicators numeric evaluation;

z – environment status uncertainty characteristic;

$\tau_a(p_i)$ – crossing;

$\zeta_a(wca_i)$ – crossing that determines an indicators set which reacts against the CA.

INTRODUCTION

It is impossible to imagine modern attitudes and perspectives of further ICS development in different fields of human activity without the increased attention of questions regarding IS and CS particularly because of the increasing number of CA and the destructive influence on IO. The rapid increase of incidents in the field of IS has shown that existing ISS, which are built on the basis of known threats and emerging attacks, are not always effective in cases of new CA which are created against the widespread enterprise information system, ACS in electronics, industry, transport, the banking system etc.

Goal of the research – developing a cyber-threats counterwork model using DSS, choosing rational variants of reactions on the occurrences in CS, and taking into account current operational IO data.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose that in the process of organizational and technical cyber security management of the CIIO, the protection methods rational sets model planning stage (information protection means) is considered as a process of sequential removal of uncertainty of ISS structure and composition. Thus, the planning of rational compatible software and hardware sets IPM is a consideration of alternatives AL: $PL = SFS \rightarrow CS_{al}$. Then the decision selection by the IDSS is regarded as forming a subset of the best options set $CS' \subseteq CS$.

In the study, the problem of comparing sets of IPM options is examined using morphological matrix sets in terms of "information security" in the perimeter ISS CIIO and "costs" for l functional subsystem ISS, which operate in conditions of uncertainty, inconsistency and lack of knowledge about the state of the object which is protected.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The increasing number of IS and CS threats has given rise to the surge of research in the field of development of uncovering and preventing CA systems [1–4], and also DSS [5, 6] and ES [7–9] in this field. Publication analysis [10, 11], allows us to uncover the increasing popularity of ISS risk assessment automated methods [12] and program sets of IS and CS risk management [13]. It was mentioned in the works [14, 15] that ISMS, in which intelligent technologies of cyber-threat identification and reacting to occurrences of IS breaches are realized, are products of private companies, and that a customer in general doesn't have any information about methods and models of leading effects forming in systems [16]. It is shown in the works [17–20] that it is appropriate to equip existing DSS and ES in field of IS (excluding tasks of cyber-security management) with functional models that allow us to increase efficiency of enumeration and investigation of illegitimate interferences to the work of ICS crimes.

In such a way, according to the disputes in publications [5, 6, 8, 10, 16, 17], dedicated to the potential of using integrated DSS or ES in ISMS, the task of developing methods, models for using them in practice in intelligent support of ISS rational structure planning and the task of assessment and prediction of IS and CS risks became relevant.

3 MATERIALS AND METHODS

There is one main problem creating the CONTS – development of the threat model [7, 15, 21], which is connected to the specification of a management object interaction – ISS IO with the environment. IDSS, which develops a threat model building method, is based on a qualified scheme of goal-oriented destructive influences on IS and CS IO [22–24]. A generalized architecture of ISMS and CS is offered according to the results of the control strategy in conditions of uncertainty analysis [4, 15, 24].

Level of safety is used in the capacity of an operated variable. The *LS* value depends on the maximum level of information urgency which is being updated according to recent changes in ICS. Models [4, 15] consist of five perimeters for decentralized architecture of IO, fig. 1.

Mechanisms of IPR control are created in the circuit with organizational-technical control governing changing business applications, DA processing plans, infrastructure, and all the corresponding requests to the information safety level. The circuit contains: IDSS in regards to choosing a security strategy and a system of safety level assessment. Managing influence in the circuit is realized by the staff of the IS department. The task of ISMC rational structure choice for IO is made according to the following criteria [4, 9, 7, 15]: minimum probability of achieving goals by an attacker; minimum of IO losses should the attacker's goals be achieved; maximum probability of successful ISMC counteraction to the actions of an attacker; minimum "cost-risk" integrated index value [4, 9].

Quantity assessment of IO safety can be found the following way:

$$LS_{CIS} = \prod_{i=1}^{n} (1 - C_{ICR} \cdot At_i \cdot As_i \cdot TL_i \cdot DPT_{lm_i}). \quad (1)$$

Quantity of insider and external CA against IO are given in the form of tuples:

$$RCA = \langle EST, CE, SS_{ne}, SS_h, PP, O(NN) \rangle, \quad (2)$$

$$ICA_{l(m)} = \langle IST_l^{k-1}, CE, SS_{ne}, SS_h, PP, O^k(NN_m^k) \rangle. \quad (3)$$

It is proven in works [4, 10, 12, 20] that the only effective way to identify an attack is in the analysis of a combination of unusual events. That is why in IDSS, an attack spreading *WCA* possible ways, quantity is compared to a quantity of indicators IND. The probability of the fact that suspicious action is a attack is assessed with the indicators quantity which reacted against the attack spreading method. Crossing $\tau_a(p_i)$ determines an indicators set. We get the following expression:

$$\zeta_a \subseteq WCA \times IND = \{(wca_i, ind_j) : wca_i \in WCA \wedge ind_j \in IND\} \quad (4)$$

In conditions when the status of the information environment is unknown, the threat counteraction model is enabled in IDSS, which has an opportunity to choose a controlling influence that better corresponds to the management object status. A process of choosing an optimal safety events reaction variant are given in a form of a tuple:

$$\langle RO_i, RE_j, DA(RE_j), P_{CA}, P(z_l), OF, RO^{rat}(P_{CA}) \rangle. \quad (5)$$

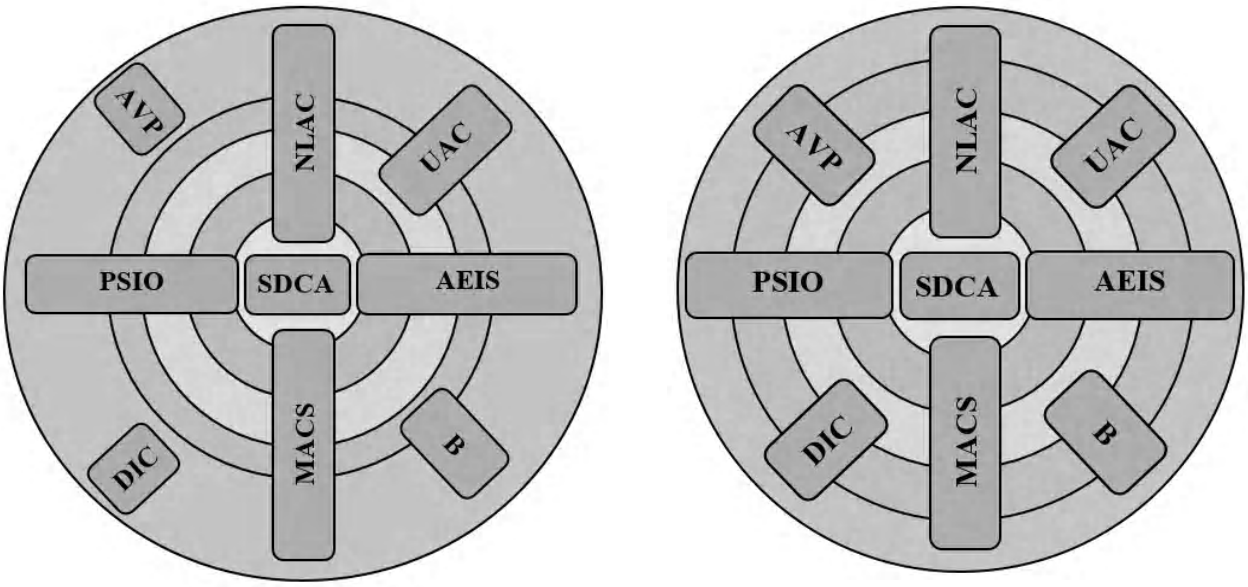
Safety events [4, 6, 9] reaction variants probability analysis $\{RO_i\}$ has shown that the number of control influences for each situation is limited $i \in [1,3]$. An alternative advantages evaluation with a damage assessment model is used in IDSS – $\{RE_j\}, j \in [1,4]$ taking into account that the IS events reaction variants choice is made in conditions of a potential CA: no harm, losses for a certain user, losses for a group of users, loss for all ICS from attack realization.

Define a function with which we choose an optimal reaction variant:

$$OF(RO_i, z) = \sum_{l=1}^{s} DA_j(RE_j(RO_i, z_l)) \cdot \prod_{i=1}^{I} p_{ij}(RE_j(RO_i), P_{CA}). \quad (6)$$

The probability p_{ij} of getting every *j*-result choosing every *i*-reaction variant is determined the following way:

$$p_{ij} = p_{ij}(RE_j(RO_i), P_{CA}), \ \forall i : \sum_j p_{ij} = 1. \quad (7)$$



a b

Figure 1 – IS subsystems:
a – Centralized IO variant; b – Decentralized IO variant

Control influence rational variant $RO^{rat}(P_{CA})$ is determined this way:

$$RO^{rat}(P_{CA}) = RO\left(\arg\min_i (OF(RO_i, z))\right). \quad (8)$$

An IS OM intelligent support subsystem contains: a fuzzy inference mechanism for CA probability numeric evaluation; organized structure information about knowledge database events; threat recognition and counteraction models [4, 5, 9]; algorithm for making a decision regarding choosing an optimal safety events reaction variant [8].

During the organizational-technical management process, the stage of planning of storage for information security tools, and the process of gradual removal of uncertainty about the structure and the storage of information security tools in the information security system is being considered. The process of planning PL rational sets *MIP* is described with the formula:

$$PL = SFS \rightarrow RSV_{al}. \quad (9)$$

With the help of the system for intelligent support, the process of choosing optimal variant of *MIP* setup for perimeters of CS is considered as the formation of a sub-range for the best variants of setup $RSV' \subseteq RSV$. The range of the setup variants is described as

$$RSV = \{RSV_1, \ldots, RSV_{AL}\}. \quad (10)$$

For the choice of the optimal variant of CS tools the objective function *OF* is used:

$$RSV_{al} = OF(RSV). \quad (11)$$

The population of data, which make it possible to compare variants of setups, includes two sub-ranges:

$$MA_{LS_l} \subset MA_l \quad \& \quad MA_{in_l} \subset MA_l. \quad (12)$$

Usage a morphological approach, the model of decision making regarding the choice of the optimal variant of CS tools, is presented in the form of the sequence:

$$RUL : \langle PUR, SFS, RUL_s, RSV, MA_l, OF, RSV_r(RSV') \rangle. \quad (13)$$

The starting data for the synthesis of variants of CS tools sets: $SFS = \{SFS_1, \ldots, SFS_L\}$. Accepted:

$$RSV = SFS_1 \times \ldots \times SFS_L \quad \& \quad SFS_l = \{ST_{l1}, \ldots, ST_{lK_l}\}. \quad (14)$$

The choice of the rational variants of information security tools setups is realized on the basis of experts' knowledge in the field of CS. The process of formation of a rational structure of information security tools is divided into five stages: 1) The variants of *MIP* setup are put under development. The range of possible variants of the solution is set with the help of the morphological matrix. For the considered perimeters of information security, the morphological matrices of CS tools are developed; 2) The intermediary matrices are filled in, which indicate compatibility with the firmware. For each couple of CS tools for different functional subsystems their compatibility is defined. The result is filled in the table. If *MIP* are consistent, then the function of compatibility is $s(ST_{lm}, ST_{pr}) = 1$, in other case $s(ST_{lm}, ST_{pr}) = 0$; 3) The range of decisions concerning the choice of variants of setup *MIP* is generated. The range of tool setups is reduced to the sub-range which is known to be compatible with each other. The range $RSV = \{RSV_1, \ldots, RSV_R\}$, which consists of all possible variants of formulation of setup *MIP* for the considered perimeter, is the Descartes's production of setups of alternatives (morphological matrix ranges).

The element of the range is presented as follows:

$$RSV_r = \{(ST_{1i}, ST_{2j}, \ldots, ST_{Ln}) : ST_{lm} \in SFS_l, \forall l = \overline{1, L}\}. \quad (15)$$

The generation of the range of decisions concerning the choice of the variants, which consists of compatibility with each other *MIP*, is done in the following way. The iterated synthesis of variants of setup is made, which consists of compatibility *MIP*: on the first step the variants of CS tools for the first sub-system are consequently enumerated, after the choice of the alternative ST_{li} the transition to the second stage is made. On the second stage the consequent enumeration of variants of CS tools for the second subsystem is made, but the choice is made only for those alternatives ST_{2j}, for which the compatibility function is $s(ST_{1i}, ST_{2j}) = 1$ etc. For the choice of alternatives for l subsystem, the choice is made only from those alternatives ST_{lm}, for which the compatibility function is equal to one: $s(ST_{l-1,m}, ST_{lm}) = 1, \ldots, s(ST_{li}, ST_{lm}) = 1$.

Hence, the choice of *MIP* from each set of morphological matrix (one from each range) for the formation of a variant of setup is made only from compatibility with each other's firmware.

The further reduction of the *CS* range in the system of intelligent support for decision making is made in the form of a full enumeration with the given objective function. As the objective function for the choice of the setup variant, $CS_r = \{ST_{1i}, ST_{2j}, \ldots, ST_{lm}, \ldots, ST_{Ln}\}$ the function is used

$$OF = \max_r \frac{MA_{K_{LS}^l}^{ST_{li}} + \ldots + MA_{K_{LS}^l}^{ST_{Ln}}}{MA_{K_{in}^l}^{ST_{li}} + \ldots + MA_{K_{in}^l}^{ST_{Ln}}}. \quad (16)$$

The criteria of the quality of information "security" indicator is divided into two groups: the indicators of the effectiveness of the operative methods of the security and the indicators of the functional fitness.

4 EXPERIMENTS

The software package ("Decision Support System of Management protection of information – DMSSCIS") was developed for check of working capacity and practical applicability of the offered model of operational management of cyber security [4, 15]. In the course of the experimental

check of SP reaction options (RO_i) decision making support systems on different classes of CA for the current parameters of probability of implementation of the attack of P_a were researched. Also sets of instruments of information protection $CS' \subseteq CS$ for the purpose of a choice of rational option were researched. Restrictions on the cost of a set are accepted and minimum probabilities of successful implementation attacking all are more whole than CA for the selected set. DMSSCIS was also used in the modernization of existing information security systems in data centers of transport companies in Dnipro (2014) and several industrial enterprises in Kyiv.

5 RESULTS

On the software "DMSSCIS", that particular selection method implemented an efficient option for responding to security events. The results are shown in Table 1.

During the research the possibility was taken into account of an attack that implements remote intrusion through the perimeter, the availability of internal and external users, and abusers that have high privileges and violate the safety of information. After the formation of efficient information security in enterprises which took part in the study, with the help of intelligent decision support "DMSSCIS" the predicted value was P_a =1,78–1,91% risk that there was an average value of 5,9–6,2 times less risk to information security systems compared to before.

The amount of expenditure by the organization on information security for critical nodes of information objects order from 5200–5500 $. The likelihood of the offender achieving all their goals is 10^{-2}. The increase in appropriations for the organization of information security above a certain level (above 13,000 $.) is inappropriate because it does not lead to a significant increase in the efficiency of information security.

During the research it was shown that the implementation of the intelligent decision support "DMSSCIS" allows an increased level of automation and centralized monitoring of CS facility and reduces the time to inform those responsible for information security incidents by 6,9–7,2 times.

6 DISCUSSION

The approach of building a comprehensive information security system for the information object makes it possible to reduce the cost of data protection by 32–35% compared to alternative methods [6–9, 12, 13]. A certain lack of intelligent systems of decision support of "DMSSCIS", required the involvement in the initial study of several independent experts to build membership functions of production and assembly rules. At the current stage of research for this instrument, the fuzzy logic Fuzzy Toolbox (Matlab) was employed, which calculated "security information" MIP parameters for everyone involved in perimeter protection.

Overall, based on the studies, we can ascertain the effectiveness of the proposed models and software for information security management (information systems and automated control system) in examined enterprises.

CONCLUSIONS

In this paper the urgent problem of development of software of decision making support systems in CS of OI.

Scientific novelty of research consists that the model of operational management of CS of an OI and formation of a rational complex of security features based on morphological approach is for the first time offered. Unlike existing solutions, the model prepared on the basis of intelligent decision support, a morphological matrix for each facility's perimeters of information protection, and can generate a set of options for remedies which take into account the compatibility of software and hardware. The choice of the optimal option set for that perimeter protection of information, implements an objective function that maximizes the ratio of the sum "security information" to the total rate "cost". It provides a range of remedies for a given class of certified security, and satisfies the requirements for eligible costs for implementation of CS.

The practical value of the developed methods and instruments is that they allow: to reduce time of development of systems of CS, to increase efficiency of planning of rational modular composition of security features due to

Table 1 – The results of testing the software system "DMSSCIS"

Class of CA	Options for responding to the current settings information of environment of information object RO_i		
U2R	A=2, B=3, P_a = 0,54		A=1, B=1, P_a = 0,242
	The end of session attack source node		Sending a warning message to the user
R2L	A=1, B=3, P_a = 0,43		A=1, B=1, P_a = 0,192
	The end of session attack source node		Sending a warning message to the user
DOS/DDOS	A=2, B=3, P_a = 0,62		A=1, C=2, P_a = 0,4
	The end of session attack source node		Sending a warning message to the user
The external attack (Wi Fi)	A=3, C=3, P_a = 0,678	A=1, C=2, P_a = 0,4	A=1, C=1, P_a = 0,3
	Blocking access point	DOS-attack on stations	The lack of response
A remote attack via lines on the perimeter	A=3, B=4, C=2, P_a = 0,82	A=1, B=1, C=1, P_a = 0,224	A=1, P_a = 0,076
	Blocking access to the server in the network	Reconfiguration of security services to block IP	Sending a warning message to the user
Cost of a rational set of means of information protection $CS' \subseteq CS$ for OI			
Experts		"DMSSCIS"	
1000–11000 $		7000–8000 $	

creation of information and software environment in case of design; to increase validity of the made decisions on operational and to organizational technical control by protection. By using the developed system of intelligent decision support, networks of enterprises using DMSSCIS reduced the projected cost of the planned system of protection to 35 %. Further development of this work may be improving the interaction of traditional mechanisms of information security IO, which, in particular, are working on primary information system modules and intelligent decision support "DMSSCIS".

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan "Automation of processes of complex technical systems in conditions of uncertainty" (state registration number 0104U005401).

REFERENCES

1. Distributed Intrusion Detection System in a Multi-Layer Network Architecture of Smart Grids / [Y. Zhang, L. Wang, W. Sun, R. C. Green II at al] // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2011. – Vol. 2, No. 4. – P. 796–808. DOI:10.1109/TSG.2011.2159818
2. Al-Jarrah O. Network Intrusion Detection System using attack behavior classification / O. Al-Jarrah, A. Arafat // 5th International Conference Information and Communication Systems (ICICS). – 2014. – P. 1–6. DOI: 10.1109/IACS.2014.6841978
3. Louvieris P. Effects-based feature identification for network intrusion detection / P. Louvieris, N. Clewley, X. Liu // Neurocomputing. – 2013. – Vol. 121, Iss. 9. – P. 265–273. DOI:10.1016/j.neucom.2013.04.038
4. Lakhno V. Creation of the adaptive cyber threat detection system on the basis of fuzzy feature clustering / V. Lakhno // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – Vol. 2, No 9(80). – P. 18–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66015
5. Cybersecurity Games and Investments: A Decision Support Approach / [E. Panaousis, A. Fielder, P. Malacaria, C. Hankin et al] // Chapter Decision and Game Theory for Security. – 2014. – Vol. 8840. – P. 266–286. DOI: 10.1007/978-3-319-12601-2_15
6. Cavusoglu H. Decision-theoretic and game-theoretic approaches to IT security investment / H. Cavusoglu, R. Srinivasan, T. Y. Wei // Journal of Management Information Systems. – 2008. – Vol. 25(2). – P. 281–304.
7. Li-Yun Chang. Applying fuzzy expert system to information security risk Assessment – A case study on an attendance system / Li-Yun Chang, Zne–Jung Lee // 2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications. – P. 346–351. DOI: 10.1109/iFuzzy.2013.6825462
8. Atymtayeva L. Building a Knowledge Base for Expert System in Information Security / L. Atymtayeva, K. Kozhakhmet, G. Bortsova // Chapter Soft Computing in Artificial Intelligence. – 2014. – Vol. 270. – P. 57–76. DOI:10.1007/978-3-319-05515-2_7
9. Kanatov M. Expert systems for information security management and audit / M. Kanatov, L. Atymtayeva, B. Yagaliyeva // Implementation phase issues, Soft Computing and Intelligent Systems, Joint 7th International Conference on and Advanced Intelligent Systems (ISIS), 15th International Symposium on 3–6 Dec. 2014. – P. 896–900. DOI:10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044702
10. Yanga Y.-P. Ou. A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment / Y.-P. O. Yanga, H. Shieha, G. Tzeng // Information Sciences. – 2013. – Vol. 232. – P. 482–500. http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.09.012
11. Bulgurcu B. Information security policy compliance: An empirical study of rationality-based beliefs and information security awareness / B. Bulgurcu, H. Cavusoglu, I. Benbasat // MIS Quarterly. – 2010. – No. 34(3). – P. 523–548.
12. Fuzzy logic based anomaly detection for embedded network security cyber sensor / [O. Linda, M. Manic, T. Vollmer, J. Wright] // Computational Intelligence in Cyber Security (CICS), IEEE Symposium on 11–15 April 2011. – P. 202–209. DOI: 10.1109/CICYBS.2011.5949392
13. Demetz L. To Invest or Not to Invest? Assessing the Economic Viability of a Policy and Security Configuration Management Tool / L. Demetz, D. Bachlechner // The Economics of Information Security and Privacy, Springer, 2013. – P. 25–47. DOI:10.1007/978-3-642-39498-0_2
14. Oglaza A. Authorization Policies: Using Decision Support System for Context-Aware Protection of User's Private Data, Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom) / A. Oglaza, R. Laborde, P. Zarate // 2013 12th IEEE International Conference on 16–18 July 2013, Melbourne, VIC Australia. – P. 1639–164. DOI: 10.1109/TrustCom.2013.202.
15. LakhnoDesign of adaptive system of detection of cyber-attacks, based on the model of logical procedures and the coverage matrices of features / [V. Lakhno, S. Kazmirchuk, Y. Kovalenko, L. Myrutenko et al] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 3/9 (81). – P. 30–38. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71769
16. Gamal M. M. A Security Analysis Framework Powered by an Expert System / M. M. Gamal, B. Hasan, A. F. Hegazy // International Journal of Computer Science and Security. – 2011. – Vol. 4, No. 6. – P. 505–527.
17. Goztepe K. Designing Fuzzy Rule Based Expert System for Cyber Security / K. Goztepe // International Journal of Information Security Science. – 2012. – Vol. 1, No. 1. – P. 13–19.
18. Gutzwiller R. S. A task analysis toward characterizing cyber-cognitive situation awareness (CCSA) in cyber defense analysts / R. S. Gutzwiller, S. M. Hunt, D. S. Lange // 2016 IEEE International Multi-Disciplinary Conference on 21–25 March 2016, DOI: 10.1109/COGSIMA.2016.7497780.
19. Decision support for Cybersecurity risk planning / [L. P. Reesa, J. K. Deanea, T. R. Rakesa, W. H. Bakerb] // Decision Support Systems. – 2011. – Vol. 51, Iss. 3. – P. 493–505. DOI.org/10.1016/j.dss.2011.02.013
20. Paliwal S. Denial-of-Service, Probing & Remote to User (R2L) Attack Detection using Genetic Algorithm / S. Paliwal, R. Gupta // International Journal of Computer Applications. – 2012. – Vol. 60, No.19. – P. 57–62.
21. Ben-Asher N. Effects of cyber security knowledge on attack detection / N. Ben-Asher, C. Gonzalez // Computers in Human Behavior. – 2015. – Vol. 48. – P. 51–61. DOI: 10.1016/j.chb.2015.01.039
22. Buryachok V. L. Algoritm ocinyuvannya stupenya zaxishhenosti special'nix informacijno-telekomunikacijnix sistem // Zaxist informacії. – 2011. – No. 3. – P. 19–27.
23. Valenzuela J. Real-Time Intrusion Detection in Power System Operations / J. Valenzuela, J. Wang, N. Bissinger // IEEE Transactions on Power Systems, 2013. – Vol. 28, No. 2. – P. 1052–1062. DOI:10.1109/TPWRS.2012.2224144
24. Потій О. В. Дослідження методів оцінки ризиків безпеці інформації та розробка пропозицій з їх вдосконалення на основі системного підходу / О. В. Потій, А. В. Лєншин [Текст] // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – 2010. – Вип. 2(24). – С. 85–91.

Article was submitted 16.12.2016.
After revision 28.12.2016.

Лахно В. А.
Д-р техн. наук, доцент, зав. кафедри організації комплексного захисту інформації, Європейський університет, Київ, Україна

РОЗРОБКА СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ РІШЕНЬ З УПРАВЛІННЯ КІБЕРЗАХИСТОМ

Актуальність. В роботі вирішена актуальна задача розвитку математичного забезпечення систем підтримки прийняття рішень з кібербезпеки на основі вибору оптимізованих варіантів реагування на інциденти. При цьому враховуються експлуатаційні параметри об'єкта захисту.

Мета. Розробка моделі протидії кіберзагрозам на основі застосування системи підтримки рішень по вибору оптимізованих варіантів реагування на інциденти кібербезпеки з урахуванням поточної інформації, яка стосується об'єктів захисту.

Метод. Розроблено модель оперативного менеджменту кібербезпекою критично важливих комп'ютерних систем і синтезу раціональних комплексів засобів захисту. Модель базується на морфологічній парадигмі. Запропоновано здійснювати вибір оптимізованих варіантів комплексів для периметрів кіберзахисту за допомогою цільової функції, яка максимізує відношення узагальненого індексу «захищеність інформації» до підсумкового показника «витрати».

Результати. Розроблено модель оперативного менеджменту кібербезпекою критично важливих комп'ютерних систем. Модель дозволяє з урахуванням сукупності морфологічних матриць, підготовлених в ході роботи системи підтримки прийняття рішень для кожного з розглянутих в роботі периметрів, згенерувати варіативні набори комплексів захисту, в яких врахована їх апаратно-програмна сумісність. Розроблено програмний комплекс для інтелектуальної підтримки прийняття рішень в задачах управління кібербезпекою об'єкта інформатизації. Доведено, що використання розробленої системи підтримки рішень дозволяє істотно зменшити плановані витрати на комплекси засобів кіберзахисту, а також скоротити час інформування відповідальних осіб про способи протидії виявленим інцидентам з інформаційної безпеки.

Висновки. Наукова новизна досліджень полягає в тому, що вперше запропонована модель оперативного менеджменту кібербезпекою критично важливих комп'ютерних систем і синтезу оптимізованих комплексів засобів захисту, що базується на морфологічній парадигмі. Практична цінність розроблених методів і засобів полягає в тому, що вони забезпечують: економію часу на етапі побудови комплексних систем кібербезпеки об'єктів інформатизації; підвищення ефективності вибору оптимізованих модульних систем кіберзахисту; аргументованість прийнятих рішень в процесі стратегічного, оперативного та організаційного менеджменту захистом об'єктів інформатизації.

Ключові слова: інформаційна безпека, управління захистом інформації, система підтримки рішення, раціональний набір засобів захисту.

Лахно В. А.
Д-р техн. наук, доцент, зав. кафедры организации комплексной защиты информации, Европейский университет, Киев, Украина

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ РЕШЕНИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ КИБЕРЗАЩИТОЙ

Актуальность. В работе решена актуальная задача развития математического обеспечения систем поддержки принятия решений по кибербезопасности на основе выбора оптимизированных вариантов реагирования на инциденты с учетом эксплуатационных параметров объекта защиты.

Цель. Разработка модели противодействия киберугрозам на основе применения системы поддержки решений по выбору оптимизированных вариантов реагирования на инциденты кибербезопасности с учетом текущей информации, касающейся объектов защиты.

Метод. Разработана модель оперативного менеджмента кибербезопасностью критически важных компьютерных систем и синтеза рациональных комплексов средств защиты. Модель базируется на морфологической парадигме. Предложено осуществлять выбор оптимизированных вариантов комплексов для периметров киберзащиты с помощью целевой функции, которая максимизирует отношение обобщенного индекса «защищенность информации» к итоговому показателю «затраты».

Результаты. Разработана модель оперативного менеджмента кибербезопасностью критически важных компьютерных систем. Модель позволяет с учетом совокупности морфологических матриц, подготавливаемых в ходе работы системы поддержки принятия решений для каждого из рассматриваемых в работе периметров, сгенерировать вариативные наборы комплексов защиты, в которых учтена их аппаратно-программная совместимость. Разработан программный комплекс для интеллектуальной поддержки принятия решений в задачах управления кибербезопасностью объекта информатизации. Доказано, что использование разработанной системы поддержки решений позволяет существенно уменьшить планируемые расходы на комплексы средств киберзащиты, а также сократить время информирования ответственных лиц о способах противодействия выявленным инцидентам информационной безопасности.

Выводы. Научная новизна исследований состоит в том, что впервые предложена модель оперативного менеджмента кибербезопасностью критически важных компьютерных систем и синтеза оптимизированных комплексов средств защиты, базирующаяся на морфологической парадигме. Практическая ценность разработанных методов и средств заключается в том, что они обеспечивают: экономию времени на этапе построения комплексных систем кибербезопасности объектов информатизации; повышение эффективности выбора оптимизированных модульных систем киберзащиты; аргументированность принимаемых решений в процессе стратегического, оперативного и организационного менеджмента защитой объектов информатизации.

Ключевые слова: информационная безопасность, управление защитой информации, система поддержки решения, рациональный набор средств защиты.

REFERENCES

1. Zhang Y., Wang L., Sun W., Green R. C., Alam M. Distributed Intrusion Detection System in a Multi-Layer Network Architecture of Smart Grids, *IEEE Transactions on Smart Grid,* 2011, Vol. 2, No. 4, pp. 796–808. DOI:10.1109/TSG.2011.2159818
2. Al-Jarrah O., Arafat A. Network Intrusion Detection System using attack behavior classification, *Information and Communication Systems (ICICS), 2014 5th International Conference*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/IACS.2014.6841978
3. Louvieris P., Clewley N., Liu X. Effects-based feature identification for network intrusion detection, *Neurocomputing,* 2013, Vol. 121, Iss. 9, P. 265–273. DOI:10.1016/j.neucom.2013.04.038
4. Lakhno V. Creation of the adaptive cyber threat detection system on the basis of fuzzy feature clustering, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2016, Vol. 2, No. 9(80): Information and controlling system, pp. 18–25. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.66015
5. Panaousis E., Fielder A., Malacaria P., Hankin C., Smeraldi F. Cybersecurity Games and Investments: A Decision Support Approach, Chapter Decision and Game Theory for Security of

the series Lecture Notes in Computer Science, 2014, Vol. 8840, pp. 266–286. DOI: 10.1007/978-3-319-12601-2_15

6. Cavusoglu H., Srinivasan R., Wei T. Y. Decision-theoretic and game-theoretic approaches to IT security investment, *Journal of Management Information Systems*, 2008, Vol. 25(2), pp. 281–304.
7. Li-Yun, Chang, Zne-Jung Lee Applying fuzzy expert system to information security risk Assessment – A case study on an attendance system, *2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Applications,* 2013, pp. 346–351. DOI: 10.1109/iFuzzy.2013.6825462
8. Atymtayeva L., Kozhakhmet K., Bortsova G. Building a Knowledge Base for Expert System in Information Security, *Chapter Soft Computing in Artificial Intelligence,* 2014, Vol. 270, pp. 57–76. DOI:10.1007/978-3-319-05515-2_7
9. Kanatov M., Atymtayeva L., Yagaliyeva, B. Expert systems for information security management and audit. Implementation phase issues, Soft Computing and Intelligent Systems (SCIS), *Joint 7th International Conference on and Advanced Intelligent Systems (ISIS), 15th International Symposium on 3–6 Dec. 2014,* pp. 896–900. DOI:10.1109/SCIS-ISIS.2014.7044702
10. Yu-Ping Ou Yanga, How-Ming Shieha, Gwo-Hshiung Tzeng A VIKOR technique based on DEMATEL and ANP for information security risk control assessment, *Information Sciences,* 2013, Vol. 232, pp. 482–500. http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2011.09.012
11. Bulgurcu B., Cavusoglu H. and Benbasat I. Information security policy compliance: An empirical study of rationality-based beliefs and information security awareness, *MIS Quarterly,* 2010, No. 34(3), pp. 523–548.
12. Linda O., Manic M., Vollmer T., Wright J. Fuzzy logic based anomaly detection for embedded network security cyber sensor, *Computational Intelligence in Cyber Security (CICS), IEEE Symposium on 11–15 April 2011,* 2011, pp. 202–209. DOI: 10.1109/CICYBS.2011.5949392
13. Demetz L., Bachlechner D. To Invest or Not to Invest? Assessing the Economic Viability of a Policy and Security Configuration Management Tool, *The Economics of Information Security and Privacy*, Springer, Heidelberg, 2013, pp. 25–47. DOI:10.1007/978-3-642-39498-0_2
14. Oglaza A., Laborde R., Zarate P. Authorization Policies: Using Decision Support System for Context-Aware Protection of User's Private Data, Trust, Security and Privacy in Computing and Communications (TrustCom), *12th IEEE International Conference on 16–18 July 2013,* 2013, pp. 1639–164. DOI: 10.1109/TrustCom.2013.202.
15. Lakhno V., Kazmirchuk S., Kovalenko Y., Myrutenko L., Zhmurko T. Design of adaptive system of detection of cyber-attacks, based on the model of logical procedures and the coverage matrices of features, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,* 2016, No. 3/9 (81), pp. 30–38. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71769
16. Gamal, M. M., Hasan, B., Hegazy, A.F. A Security Analysis Framework Powered by an Expert System, International Journal of Computer Science and Security, 2011, Vol. 4, No. 6, pp. 505–527.
17. Goztepe, K. Designing Fuzzy Rule Based Expert System for Cyber Security, International Journal of Information Security Science, 2012, Vol. 1, No. 1, pp. 13–19.
18. Robert S. Gutzwiller, Sarah M. Hunt, Douglas S. Lange A task analysis toward characterizing cyber-cognitive situation awareness (CCSA) in cyber defense analysts, Cognitive Methods in Situation Awareness and Decision Support (CogSIMA), *IEEE International Multi-Disciplinary Conference on 21–25 March 2016,* 2016. DOI: 10.1109/COGSIMA.2016.7497780.
19. Loren Paul Reesa, Jason K. Deanea, Terry R. Rakesa, Wade H. Bakerb Decision support for Cybersecurity risk planning, *Decision Support Systems,* 2011, Vol. 51, Iss. 3, pp. 493–505. DOI.org/10.1016/j.dss.2011.02.013
20. Paliwal, S., Gupta, R. Denial-of-Service, Probing & Remote to User (R2L) Attack Detection using Genetic Algorithm, International Journal of Computer Applications, 2012, Vol. 60, No. 19, pp. 57–62.
21. Ben-Asher N., Gonzalez C. Effects of cyber security knowledge on attack detection, Computers in Human Behavior, 2015, Vol. 48, pp. 51–61. DOI: 10.1016/j.chb.2015.01.039
22. Burachok, V. Algorithm for evaluating the degree of protection of special information and telecommunication systems, *Information Security,* 2011, No. 3, pp. 19–27.
23. Valenzuela J., Wang J., Bissinger N. Real-Time Intrusion Detection in Power System Operations, *IEEE Transactions on Power Systems,* 2013, Vol. 28, No. 2, pp. 1052–1062. DOI:10.1109/TPWRS.2012.2224144
24. Potij O. V., Ljenshyn A. V. Doslidzhennja metodiv ocinky ryzykiv bezpeci informacii' ta rozrobka propozycij z i'h vdoskonalennja na osnovi systemnogo pidhodu, *Zbirnyk naukovyh prac' Harkivs'kogo universytetu Povitrjanyh Syl*, 2010, Vyp. 2(24), pp. 85–91.

УДК 004.056.5:004.738.5(045)

Молодецька-Гринчук К. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем Житомирського національного агроекологічного університету, Житомир, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ІНФОРМАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ У СОЦІАЛЬНИХ ІНТЕРНЕТ-СЕРВІСАХ ЗА ЗМІСТОВНИМИ ОЗНАКАМИ

Актуальність. Сьогодні соціальні інтернет-сервіси перетворилися на ефективний інструмент комунікації між учасниками віртуальних спільнот – акторами. З огляду на високу швидкість поширення контенту, транскордонність процесів взаємодії акторів, наявність засобів для їх організації у групи, соціальні-інтернет сервіси можуть застосовуватися як дієвий засіб проведення інформаційних операцій проти людини, суспільства, держави. В процесах комунікації акторів у віртуальних спільнотах найчастіше використовується текстовий контент. Розроблення ефективних алгоритмів функціонування системи забезпечення інформаційної безпеки держави для вирішення проблеми моніторингу текстового контенту соціальних інтернет-сервісів є актуальним теоретико-прикладним завданням.

Мета. Метою досліджень є обґрунтування й розроблення методу виявлення інформаційних впливів у соціальних інтернет-сервісах за змістовними ознаками для підвищення ефективності системи забезпечення інформаційної безпеки держави.

Метод. Розроблений метод ґрунтується на сучасних підходах до інтелектуального аналізу текстового контенту – латентно-семантичному індексуванню і семантичному аналізі на базі онтологій.

Результати. В результаті латентно-семантичного індексування відбирається релевантний заданій тематиці текстовий контент на основі його змісту і без врахування щільності ключових слів. На етапі семантичного аналізу реалізовано процедури подальшого виявлення небезпечних семантичних конструкцій у відібраному текстовому контенті. У випадку детектування суперечливих фрагментів текстового контенту і онтології та після їх аналізу експертами виконується наповнення онтологічних баз знань шаблонами загроз інформаційній безпеці у соціальних інтернет-сервісах. Таким чином, комбінація методів латентно-семантичного індексування і семантичного аналізу забезпечує взаємну компенсацію їх недоліків та виявлення прихованих залежностей між мовними одиницями.

Висновки. Завдяки розробленому методу виявлення ознак інформаційних впливів у соціальних інтернет-сервісах автоматизуються процедури ідентифікації у віртуальних спільнотах інформаційних операцій, направлених проти інформаційної безпеки людини, суспільства, держави. Застосування запропонованого методу виявлення ознак інформаційних впливів дозволяє підвищити ефективність і швидкодію системи забезпечення інформаційної безпеки держави в соціальних інтернет-сервісах як складової національної безпеки України.

Ключові слова: соціальний інтернет-сервіс, інформаційна безпека, загроза, текстовий контент, латентно-семантичне індексування, семантичний аналіз, онтологія.

НОМЕНКЛАТУРА

i – кількість ключових слів;

j – кількість публікацій акторів;

k – кількість сингулярних значень матриці;

$W = \langle w_i \rangle$ – ключові слова;

M – частотна матриця;

U і V^T – ортогональні матриці;

S – діагональна матриця;

P_n – скінченна множина концептів;

R_n – скінченна множина відношень між концептами;

$P_s(p_n) \in P_n$ – підмножина множини концептів P_n, суміжних до деякого концепту p_n;

$P_{in}(r_n) \in P_n$ – підмножина множини концептів P_n, інцидентних до відношення r_n;

$R_{in}(p_n) \in R_n$ – підмножина множини відношень R_n, інцидентних до деякого концепту p_n;

$R_z(p_n) \in R_n$ – підмножина множини відношень R_n, яка вказує на небезпеку для концепту p_n;

$r_t(p_t)$ – деяке відношення з текстового контенту СІС, що аналізується;

$p_t \in P_n$ – концепт онтології досліджуваної віртуальної спільноти;

$r_t \in R_z(p_n)$ – множина відношень, які вказують на небезпеку для деякого концепту p_n;

D_i – колекції публікацій;

LSI – латентно-семантичне індексування;

Ont – онтологія;

СІС – соціальний інтернет-сервіс.

ВСТУП

На сучасному етапі значну роль в процесах комунікації суспільства відіграють соціальні інтернет-сервіси (СІС), які забезпечують учасників віртуальних спільнот – акторів, новітніми засобами взаємодії [1]. Завдяки комунікаційним перевагам [2] СІС перетворилися на потужний інструмент взаємодії громадянського суспільства і держави, формування суспільної думки з багатьох актуальних питань. Однак, внаслідок широкої популярності СІС стали і дієвим засобом проведення інформаційних операцій проти людини, суспільства, держави. Встановлено, що ознаки інформаційних впливів у СІС доцільно об'єднати в групи за такими характеристиками – організаційні, змістовні та маніпулятивні. Виявлення згаданих ознак, як показано в [1, 3], у першу чергу пов'язане з моніторингом їх контенту.

В свою чергу, контент, який ґенерується акторами віртуальних спільнот, може бути представлений тексто-

© Молодецька-Гринчук К. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-13

вими, аудіо, відео, графічними та іншими типами даних. Дослідження співвідношення видів контенту в СІС показують, що найбільшу частку інформаційного середовища займає текстовий тип даних [4]. В першу чергу, це пов'язано з високою швидкістю його споживання акторами віртуальних спільнот завдяки універсальності, відсутності залежності якості відображення від типу кінцевого пристрою користувача. Популярність текстового контенту визначається закладеною в його зміст ідеєю, яка приймаючи різні форми покликана донести до актора потрібні картини суспільних чи політичних подій.

Однак, як показано в [1], зміст текстового контенту може містити деструктивний інформаційний вплив у явному або прихованому вигляді. Висока складність процедур аналізу змісту текстового контенту й особливо автоматичного аналізу, призводить до ускладнення процесу виявлення початку та самого факту інформаційного впливу в СІС. Тому розроблення ефективних алгоритмів функціонування системи забезпечення інформаційної безпеки держави для вирішення проблеми моніторингу текстового контенту СІС є актуальним теоретико-прикладним завданням.

Мета статті полягає в обґрунтуванні й розробленні методу виявлення інформаційних впливів в СІС за змістовними ознаками, який дозволить підвищити ефективність функціонування системи забезпечення інформаційної безпеки держави.

Для досягнення поставленої в статті мети необхідно розв'язати такі частинні завдання:

– проаналізувати сучасні підходи до виявлення загроз інформаційній безпеці держави інформаційно-психологічного характеру в розрізі аналізу текстового контенту СІС;

– встановити напрямки підвищення ефективності функціонування системи забезпечення інформаційної безпеки держави для завчасного виявлення ознак інформаційних впливів у СІС;

– розробити метод ідентифікації інформаційних впливів на основі виявлення їх ознак в змісті текстового контенту, який ґенерується або поширюється акторами у віртуальних спільнотах СІС;

– перевірити достовірність запропонованого методу на реальних прикладах.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Поставимо задачу розробити метод виявлення інформаційних впливів на акторів віртуальних спільнот СІС, який забезпечить задану достовірність функціонування, виявлення відомих та нових загроз в явному або прихованому вигляді, реалізованість за умови обмеженого забезпечення ресурсами. Вибір текстового контенту для досягнення мети дослідження проводиться відповідно до вимог критичності і значущості його тематики для інформаційної безпеки держави. Для розв'язку задачі необхідно узагальнити і систематизувати змістовні ознаки для виявлення інформаційного впливу на акторів. Використати сучасні підходи до інтелектуального аналізу текстового контенту, а для побудови онтологій обираються предметні області, пов'язані із забезпеченням інформаційної безпеки держави. Розроблений метод повинен забезпечити задану швидкодію для автоматизації процедур виявлення загроз інформаційний безпеці держави і функціонування підсистеми моніторингу інформаційного середовища системи забезпечення інформаційної безпеки держави у СІС.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що для обробки і аналізу текстового контенту використовуються методи статистичного й лінгвістичного аналізу [3, 5–9]. Перша група методів ґрунтується на аналізі змісту контенту за частотою слів, які в ньому використовуються. Спільним недоліком групи статистичних методів є неможливість врахування зв'язності текстового контенту і, як наслідок, його представлення у вигляді множини не пов'язаних між собою слів або Bag of Words [3, 5]. Для усунення цього недоліку використовують методи лінгвістичного аналізу, які включають такі рівні: графематичний для виділення абзаців, речень і окремих слів; морфологічний, який має на меті визначення морфологічних характеристик і словоформ вхідного контенту; синтаксичний аналіз для встановлення синтаксичної залежності слів у реченні; семантичний аналіз для змістовного розуміння текстового контенту.

Семантичний аналіз є складною процедурою, яка ґрунтується на використанні баз знань і тезаурусів для відображення зв'язку між окремими словами й словосполученнями [3]. Результатом семантичного аналізу є формалізоване подання текстового контенту, який досліджується, для подальшого інтелектуального аналізу. До недоліків сучасних семантичних аналізаторів можна віднести високу вартість їх підтримки для кожної окремої мови, істотну обчислювальну складність, неоднозначність результатів функціонування [3, 7].

Проблема виявлення ознак інформаційних впливів за змістовними ознаками не обмежується лінгвістичним аналізом текстового контенту СІС. Детектування загроз системою забезпечення інформаційної безпеки держави в СІС належить, зокрема, до задач інформаційного пошуку [7]. Серед класичних методів інформаційного пошуку виділяють теоретико-множинні, алгебричні та ймовірнісні. Однак, їх застосування для пошуку в СІС текстового контенту з деструктивним інформаційним впливом обмежується рядом недоліків [3]: неможливістю ранжування результатів пошуку; розрахунки пов'язані зі значними об'ємами даних; низька обчислювальна масштабованість і необхідність навчання системи. Тому перспективним напрямком є використання моделей семантичного пошуку та аналізу, які враховують зміст текстового контенту.

Встановлено, що в існуючих дослідженнях проблеми виявлення інформаційних впливів у СІС не використовується комплексний підхід, який би систематизував і узагальнив їх частинні ознаки. Протиріччя між рівнем розвитку сучасних інформаційних технологій і науковим базисом автоматизованого виявлення загроз в СІС, відсутність дієвих методик змістовного аналізу текстового контенту СІС на предмет деструктивного інформаційного впливу додатково актуалізують обраний напрямок досліджень.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Аналіз останніх досліджень і публікацій показав, що для обробки і аналізу текстового контенту використовуються методи статистичного й лінгвістичного аналізу [3, 5–9]. Перша група методів ґрунтується на аналізі змісту контенту за частотою слів, які в ньому використовуються. Спільним недоліком групи статистичних методів є неможливість врахування зв'язності текстового контенту і, як наслідок, його представлення у вигляді множини не пов'язаних між собою слів або Bag of Words [3, 5]. Для усунення цього недоліку використовують методи лінгвістичного аналізу, які включають такі рівні: графематичний для виділення абзаців, речень і окремих слів; морфологічний, який має на меті визначення морфологічних характеристик і словоформ вхідного контенту; синтаксичний аналіз для встановлення синтаксичної залежності слів у реченні; семантичний аналіз для змістовного розуміння текстового контенту.

Семантичний аналіз є складною процедурою, яка ґрунтується на використанні баз знань і тезаурусів для відображення зв'язку між окремими словами й словосполученнями [3]. Результатом семантичного аналізу є формалізоване подання текстового контенту, який досліджується, для подальшого інтелектуального аналізу. До недоліків сучасних семантичних аналізаторів можна віднести високу вартість їх підтримки для кожної окремої мови, істотну обчислювальну складність, неоднозначність результатів функціонування [3, 7].

Проблема виявлення ознак інформаційних впливів за змістовними ознаками не обмежується лінгвістичним аналізом текстового контенту СІС. Детектування загроз системою забезпечення інформаційної безпеки держави в СІС належить, зокрема, до задач інформаційного пошуку [7]. Серед класичних методів інформаційного пошуку виділяють теоретико-множинні, алгебричні та ймовірнісні. Однак, їх застосування для пошуку в СІС текстового контенту з деструктивним інформаційним впливом обмежується рядом недоліків [3]: неможливістю ранжування результатів пошуку; розрахунки пов'язані зі значними об'ємами даних; низька обчислювальна масштабованість і необхідність навчання системи. Тому перспективним напрямком є використання моделей семантичного пошуку та аналізу, які враховують зміст текстового контенту.

Встановлено, що в існуючих дослідженнях проблеми виявлення інформаційних впливів у СІС не використовується комплексний підхід, який би систематизував і узагальнив їх частинні ознаки. Протиріччя між рівнем розвитку сучасних інформаційних технологій і науковим базисом автоматизованого виявлення загроз в СІС, відсутність дієвих методик змістовного аналізу текстового контенту СІС на предмет деструктивного інформаційного впливу додатково актуалізують обраний напрямок досліджень.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

З [5, 6] відомо, що в загальному вигляді сучасні системи виявлення загроз як в текстовому контенті, так і в технічних системах, функціонують на основі таких базових методів:

– сигнатурні, ідея яких полягає в ідентифікації загроз із використанням відомих значень їх параметрів;

– виявлення аномалій на базі відхилень від еталонної моделі функціонування об'єкта досліджень.

Сигнатурні методи відрізняються високою ефективністю, а загроза, в свою чергу, описується у вигляді набору правил чи формальної моделі. Однак, у разі відсутності моделі деякої загрози в системі, її ідентифікація стає неможливою. Детектування системою виявлення загроз аномальної поведінки об'єкта дослідження пов'язане з його навчанням еталонній поведінці, відхилення від якої вказує на появу загрози. В окремих випадках опис загрози може збігатися з еталонною поведінкою об'єкта, що істотно впливає на достовірність функціонування системи виявлення загроз. Тому перспективним напрямком є розробка таких методів виявлення загроз інформаційній безпеці держави в СІС за змістовними ознаками, які забезпечать задану достовірність функціонування, виявлення відомих та нових загроз в явному або прихованому вигляді, реалізованість за умови обмеженого забезпечення ресурсами.

У результаті узагальнення відомих підходів до інформаційного пошуку і лінгвістичного аналізу контенту СІС розроблено метод виявлення інформаційних впливів на основі встановлення їх ознак у змісті текстового контенту, який зводиться до такого.

Етап 1. Пошук текстового контенту в СІС за заданим інформаційним приводом. На цьому етапі визначаються ключові слова $W = \langle w_i \rangle$, $i = \overline{1, n}$ для пошуку текстового контенту в СІС за критерієм актуальності, критичності та рівня обговорення у суспільстві його тематики. В даному випадку поставлена задача зводиться до вибору методу інформаційного пошуку текстового контенту, який задовольняє вимогам релевантного пошуку текстового контенту, ефективній обробці, зокрема, коротких публікацій. Тому пропонується скористатися методом латентно-семантичного індексування (LSI) (латентно-семантичного аналізу (LSA)) [7–9]. Особливостями LSI є пошук контенту в СІС на основі його змісту, а не щільності ключових слів, і пошук прихованих семантичних зв'язків між ключовими словами й безпосередньо контентом. Суть методу LSI, адаптованого під задачі дослідження, наведена нижче [8].

Крок 1.1 методу полягає у попередній підготовці досліджуваного контенту СІС шляхом видалення стоп-слів, стеммінгу або лематизації слів. Стоп-слова зустрічаються у всьому контенті й не мають змістовного навантаження, наприклад, сполучники, частки, прийменники тощо. Стеммінг полягає у виділенні основи слова виключенням закінчень і суфіксів та є необов'язковим на великих наборах публікацій контенту СІС. Для випадку невеликих наборів публікацій доцільно скористатися алгоритмом Портера [10], який не вимагає морфологічних словників, а виділення основи слова реалізоване на основі визначених правил. Лематизація – це приведення слова до словникового виду.

Крок 1.2. Призначений для виключення з досліджуваного текстового контенту СІС слів, які вживаються тільки один раз. Даний крок не є обов'язковим, однак зменшує кількість подальших обчислень і, як наслідок, підвищує швидкодію.

Крок 1.3. Формування частотної матриці M ключових слів W, які індексуються. Рядками i цієї матриці є ключові слова W семантичного ядра, за яким виконується моніторинг текстового контенту СІС, а стовпцями j-публікації акторів чи віртуальних спільнот. Елементи матриці m_{ij} представляють собою частоту вживання деякого ключового слова w_i в j-й публікації.

Крок 1.4 полягає в сингулярному розкладанні початкової матриці M на три компоненти

$$M = U \times S \times V^T, \quad (1)$$

де матриці U і V^T мають розмірність $i \times k$ та $k \times j$ відповідно; S – діагональна матриця розмірністю $k \times k$, причому k – кількість прихованих тематик контенту, а її елементи впорядковані за спаданням.

На кроці 1.5 виділяють ті рядки матриці U і стовпці V^T, які відповідають найбільшим сингулярним числам k, а їх величина – ступеню прояву ключових слів у колекції публікацій в СІС.

У результаті виконання етапу 1 вдається одержати колекцію публікацій у СІС, які відповідають семантичному ядру пошукового запиту. Такі публікації підлягають подальшому семантичному аналізу на основі онтологій.

Етап 2. Виявлення ознак інформаційних впливів у СІС на основі сигнатурного методу і методу виявлення аномалій. Суть даного етапу полягає у виявленні загроз інформаційній безпеці державі в СІС, які містяться в текстовому контенті, який ґенерується або поширюється віртуальними спільнотами, і мають на меті вплив на акторів, їх свободу вибору, дискредитацію органів влади тощо [11]. Контент віртуальних спільнот, проіндексований і відібраний на попередньому етапі, підлягає семантичному аналізу на базі онтологій [12–17]. В роботі [12] визначено, що онтологія є експліцитною (явною) специфікацією опису множини об'єктів, які називають концептами, і зв'язків між ними – відношеннями. Зміст другого етапу полягає в наступному.

На кроці 2.1 складаються онтологія функціонування віртуальної спільноти в СІС

$$Ont = \langle P_n, R_n \rangle. \quad (2)$$

При цьому в онтології Ont (2) для автоматизації подальшого аналізу текстового контенту віртуальних спільнот виділяються підмножини [5] $P_s(p_n) \in P_n$, $P_{in}(r_n) \in P_n$, $R_{in}(p_n) \in R_n$, $R_z(p_n) \in R_n$.

Крок 2.2 полягає у побудові семантичного опису текстового контенту, виявленого на першому етапі методу

$$Sem_t = \langle P_t, R_t \rangle. \quad (3)$$

Для забезпечення швидкодії функціонування методу доцільно застосовувати автоматичні засоби ґенерації онтологій. До такого класу програмних продуктів відносять Protégé, Ontology Learning Framework, LOGS, ABBYY Compreno тощо [13–16].

Крок 2.3 зводиться до виявлення ознак загрози у попередньо проіндексованому на першому етапі методу текстовому контенті СІС. У формальному вигляді правила виявлення загроз інформаційній безпеці зводяться до такого [5]:

– детектування на основі сигнатурного методу і семантичних ознак

$$\exists r_t(p_t): p_t \in P_n \wedge r_t \in R_z(p_n). \quad (3)$$

Суть правила (3) полягає в наступному: для виявлення загрози інформаційній безпеці у змісті текстового контенту віртуальної спільноти СІС необхідно виявити зв'язок між об'єктом публікації з його характеристиками у контенті та негативними ознаками для цього об'єкта внаслідок реалізації загрози.

Виявлення суперечностей на основі виявлення аномалій шляхом співставлення семантичного опису проіндексованого текстового контенту і семантичного шаблону загрози. При цьому встановлюється невідповідність фактів у контенті СІС, що проявляється як:

– протиріччя понять в змісті контенту віртуальних спільнот – вживання концепту в конкретному відношенні не передбачене онтологією

$$\exists r_t(p_t): p_t \in P_n \wedge r_t \in R_n \wedge p_t \notin P_{in}(r_n). \quad (4)$$

Зміст правила (4) полягає в такому: деякий концепт p_t текстового контенту СІС не може вживатися у конкретному відношенні $r_t(p_t)$.

– протиріччя відношень в контенті – вжите відношення між концептами не визначене онтологією

$$\forall p_n \in P_n \neg \exists r_n \in R_n : r_t = r_n. \quad (5)$$

Правило (5) трактується як: множина відношень R_n онтології функціонування віртуальної спільноти, в які можуть вступати концепти $p_n \in P_n$, які пов'язані між собою відношеннями r_t, не містить цих відношень.

Крок 2.4 призначений для розгорнутого аналізу експертами проіндексованого текстового контенту на предмет наявності загроз. Даний крок необхідний, якщо контент СІС є релевантним семантичному ядру пошукового запиту до контенту СІС з етапу 1, однак на етапі 2 не виявлено суперечливих фрагментів такого контенту і онтології. Тоді ідентифіковані експертами небезпечні семантичні конструкції додаються до шаблонів загроз і використовуються в онтології. В результаті таких дій метод LSI забезпечує ефективне виявлення залежностей між лексичними одиницями в контенті СІС для наповнення онтологічних баз знань [18].

Метод виявлення змістовний ознак інформаційних впливів у СІС з використанням латентного семантичного аналізу і семантичного аналізу на базі онтологій поданий у вигляді структурної схеми на рис. 1.

Застосування розробленого методу виявлення ознак інформаційних впливів дозволяє ідентифікувати у віртуальних спільнотах СІС інформаційні операції, направлені проти інформаційної безпеки людини, суспільства, держави. Перспективним є використання запропонованого методу для функціонування системи забезпечення інформаційної безпеки держави в СІС, зокрема автоматизації процесів моніторингу інформаційного середовища віртуальних спільнот. Окреме місце в забезпеченні функціонування методу належить експертам і співробітникам спеціальних підрозділів, перед якими стоїть завдання виявлення деструктивних інформаційних впливів у попередньо проіндексованому й відібраному контенті СІС. На основі таких

ідентифікованих впливів створюються семантичні шаблони загроз і додаються до онтологічних баз знань.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Відповідно до розробленого методу дослідимо контент СІС Facebook на предмет наявності ознак інформаційного впливу на акторів. Для цього задамо семантичне ядро

W = < майдан; бандити; влада; поліція; корупція; диктатура; війна; злидні; Порошенко; олігархи>

для його пошуку в колекції публікацій D_i, $i = \overline{1,10}$ актора Миколи Гайдука в соціальній мережі Facebook. Після виконання першого етапу розробленого методу дослідимо релевантні до запиту *W* публікації, використовуючи семантичний аналіз і онтологічні бази знань.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати першого етапу функціонування методу виявлення інформаційних впливів подано в табл. 1.

Застосуємо до матриці в табл. 1 операцію двовимірного сингулярного розкладу, внаслідок якого отримаємо три матриці (рис. 2).

З метою візуалізації результатів розрахунків зобразимо їх на графіку (рис. 3).

З рис. 3 видно, що проіндексовані документи D_2, D_3, D_5 і D_{10}, не зважаючи на наявність слів із заданого семантичного ядра *W*, не релевантні пошуковому запиту.

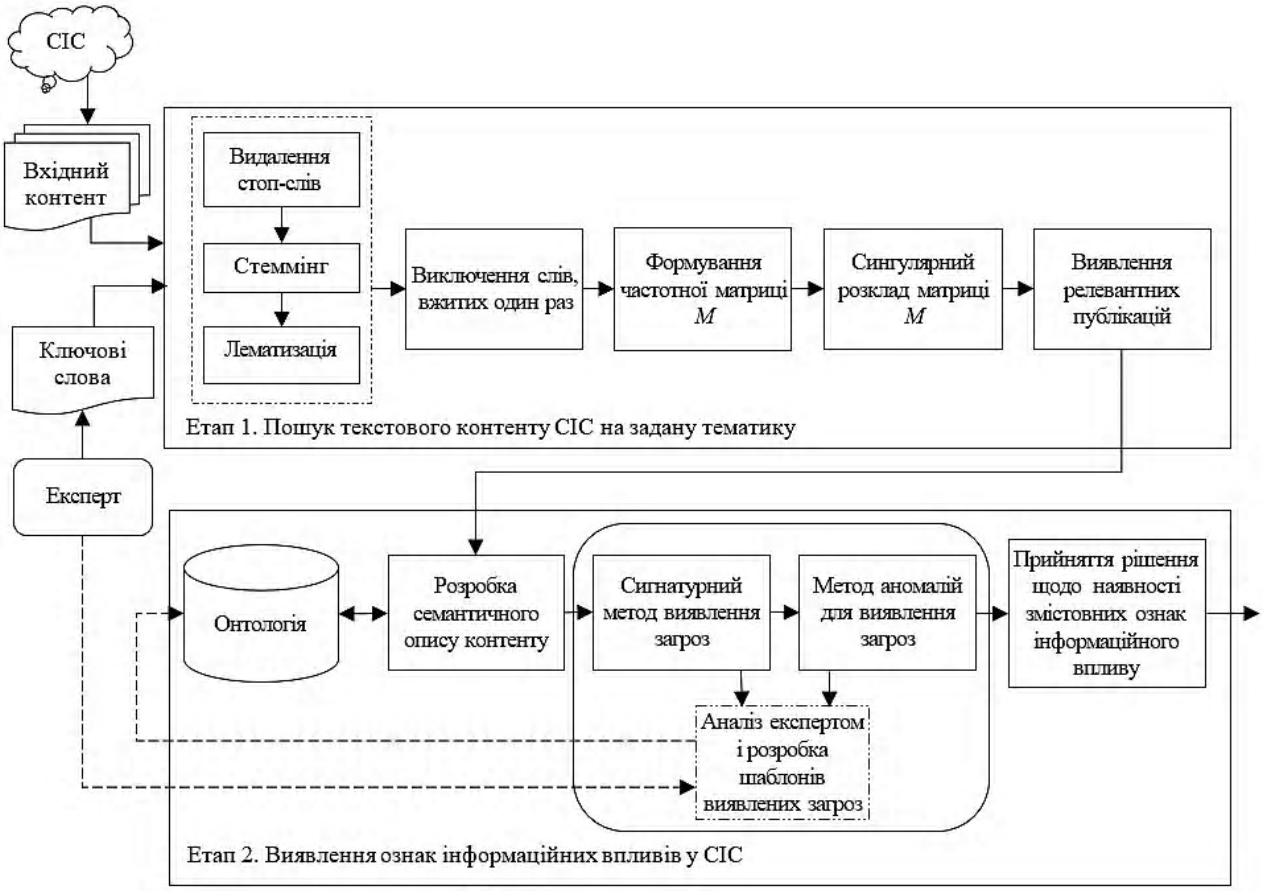


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема методу виявлення інформаційних впливів у СІС за змістовними ознаками

Таблиця 1 – Частотна матриця індексованих слів

Ключові слова	Публікації									
	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}
майдан	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
бандити	0	1	1	1	1	0	1	1	0	0
влада	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0
поліція	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
корупція	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
диктатура	1	1	0	0	0	0	1	0	1	0
війна	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0
злидні	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Порошенко	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1
олігархи	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0

U=

-0,316	-0,140
-0,411	-0,402
-0,354	0,289
-0,427	0,430
-0,248	-0,513
-0,257	0,258
-0,299	-0,395
-0,029	0,076
-0,264	0,055
-0,368	0,235

S^T=

4,957	0
0	2,723

V^T=

-0,367	0,297	0,253	-0,336	0,035	-0,302	-0,440	-0,398	0,004	0,395
-0,343	-0,375	-0,002	0,231	0,570	0,274	-0,322	0,320	0,041	0,283

Рисунок 2 – Результати розрахунків

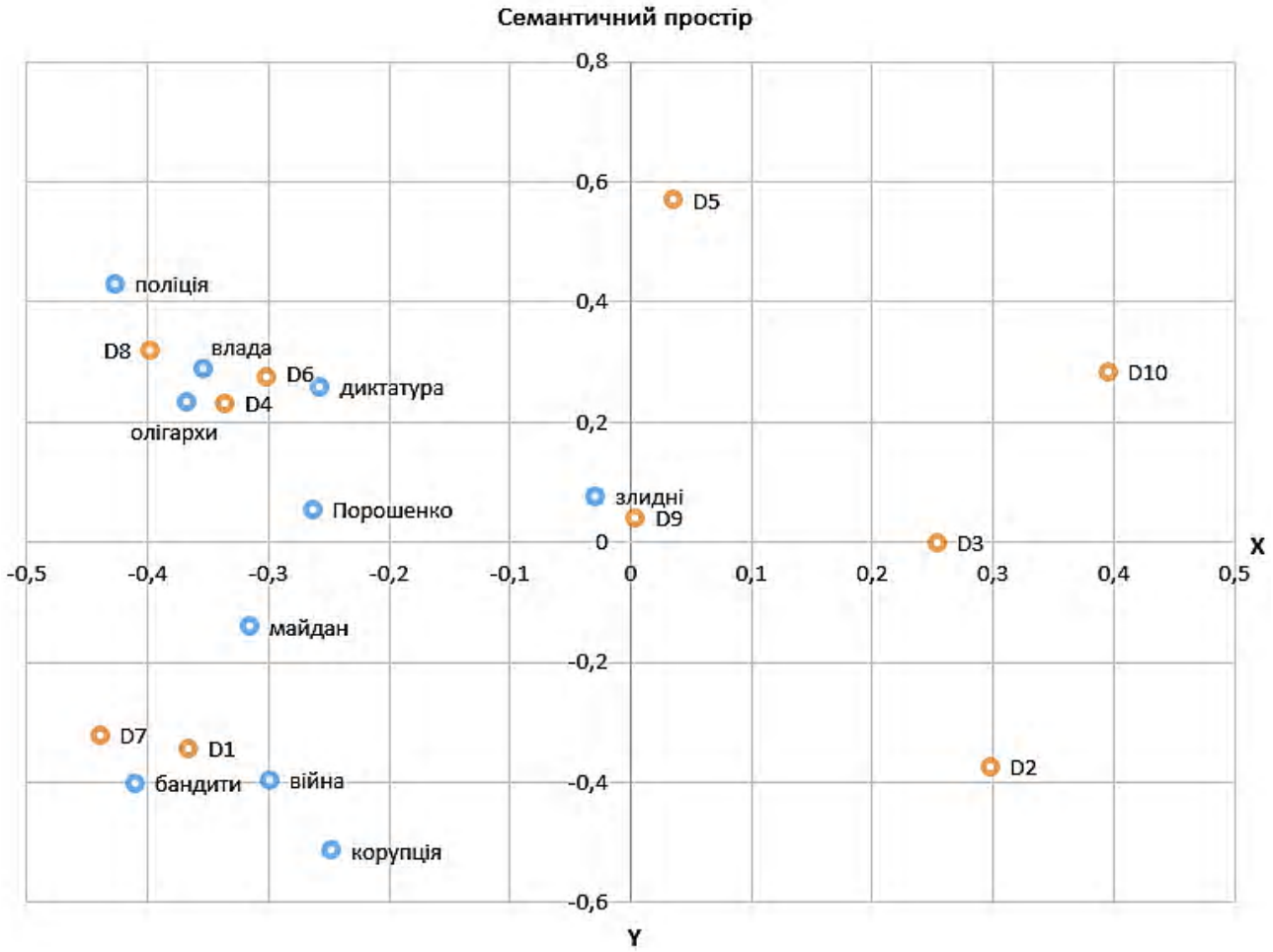


Рисунок 3 – Розподіл колекції публікацій в семантичному просторі

Документи D_4, D_6, D_8 утворюють неочевидний зв'язок з термінами, що пов'язані зі «встановленням диктатури олігархату Порошенка». Близькими для змісту документів D_1 і D_7 є терміни «бандити», «війна», «корупція» та «майдан», які їх об'єднують в окрему групу. Зміст документу D_9 найтісніше пов'язаний з низьким рівнем життя населення і не містить прихованих залежностей від інших слів семантичного ядра.

Отже, подальшому семантичному аналізу підлягають релевантні до семантичного ядра W документи D_1, D_4, D_6, D_7, D_8. Таким чином зменшується загальна кількість документів для подальшого дослідження модулем моніторингу контенту системи забезпечення інформаційної безпеки в СІС, підвищуються ефективність і швидкодія її функціонування.

Розглянемо окремі етапи семантичного аналізу документу D_6, зміст якого наведений на рис. 4.

Фрагмент семантичного опису цього документа наведено на рис. 5.

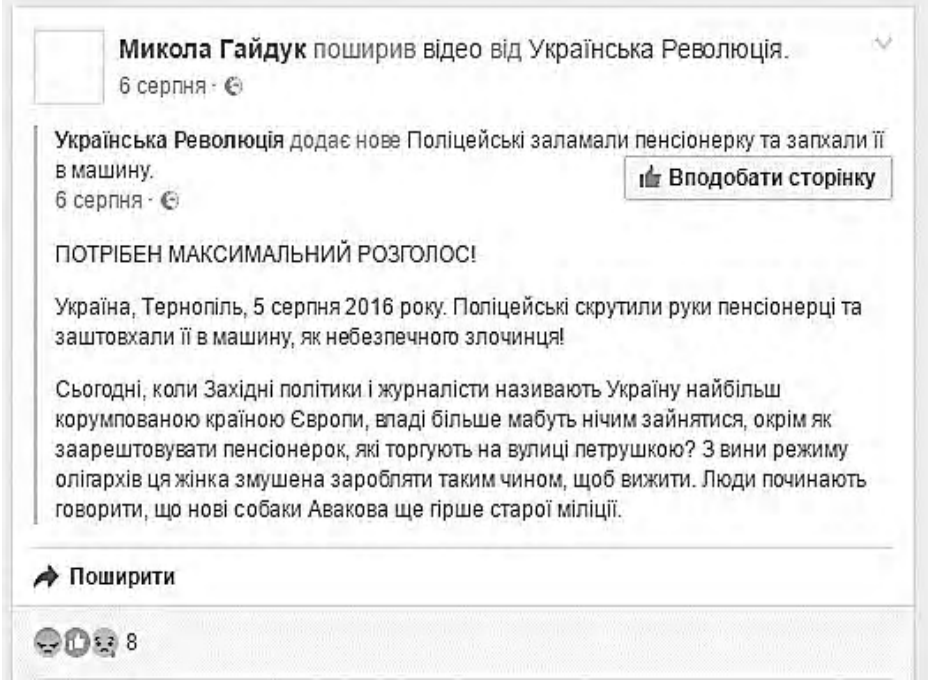


Рисунок 4 – Досліджуваний контент в СІС Facebook

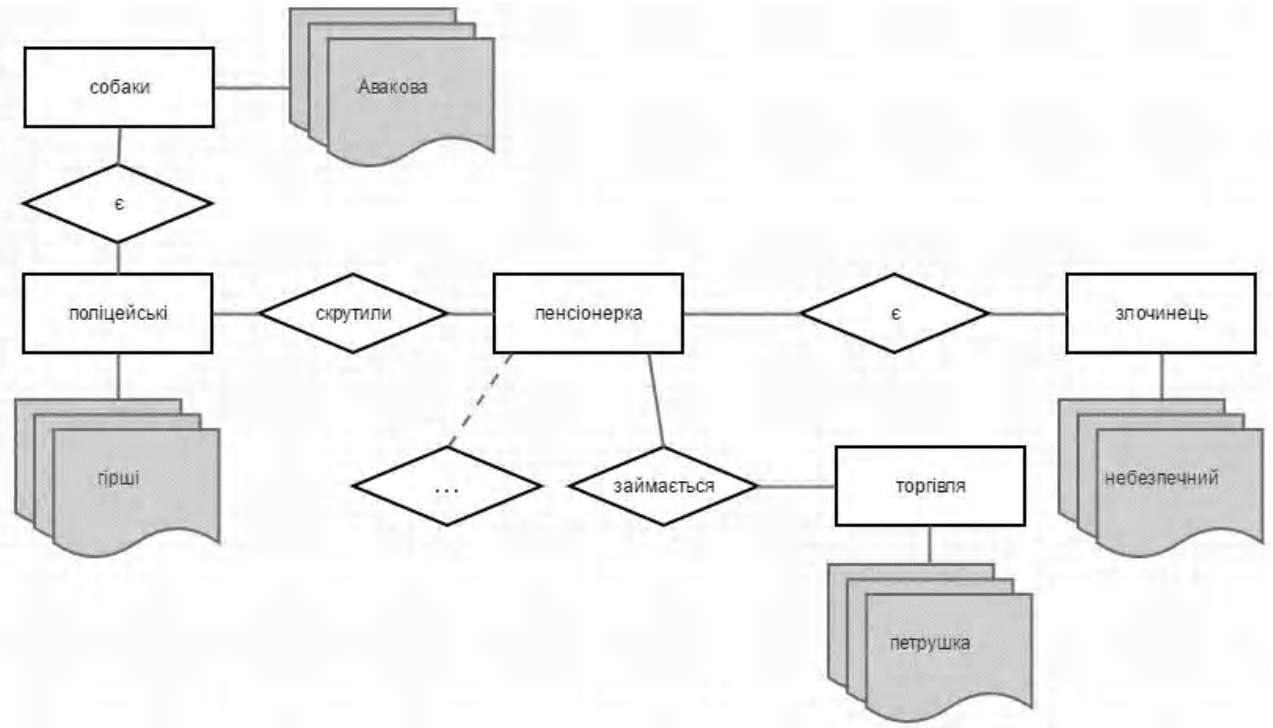


Рисунок 5 – Фрагмент семантичного опису документа D_6

Сигнатурне виявлення загроз в текстовому контенті СІС детектувало використання з концептом «пенсіонерка» відношення «скрутили», яке становить фізичну небезпеку для об'єкта. Відповідно до методу аномалій встановлено, що концепт «пенсіонерка» не може вживатися разом з відношенням «є» і концептом «злочинець» з атрибутом «небезпечний». Також в семантичному описі виявлено відношення «скрутили» між концептами «поліцейські» та «пенсіонерка», що не визначено онтологією. В досліджуваному документі вжито порівняння поліцейських з «собаками Авакова», яке необхідно додати до семантичних шаблонів загроз онтологічної бази знань.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Розглянутий метод поєднує в собі сучасні підходи до обробки текстового контенту – семантичний і латентно-семантичний аналіз. Така комбінація підходів реалізує

взаємну компенсацію їх недоліків [18]: полісемії, омонімії та інших видів лінгвістичних неоднозначностей для LSI; виявлення латентних залежностей між концептами для семантичного аналізу.

Одержані результаті збіжні, наприклад, з дослідженнями аналітичного центру Тексти.org, яким встановлено взаємопов'язані віртуальні спільноти у Вконтакте і Facebook, актори яких закликали до перевороту й протестів в Україні [19]. У результаті розкрито адміністратора таких груп, який зареєстрований у СІС під іменем Микола Гайдук. Отже, дієвість використання запропонованого у статті методу виявлення ознак інформаційного впливу доведено.

ВИСНОВКИ

Метод виявлення ознак інформаційного впливу у СІС за змістовними ознаками ґрунтується на сучасних підходах інтелектуальної обробки текстового контенту. Перевагою розглянутого методу є застосування LSI для пошуку текстового контенту віртуальних спільнот, який містить деструктивний інформаційний вплив в явному або прихованому вигляді. Завдяки додатковому використанню сигнатурного методу і методу аномалій для детектування відомих та нових загроз інформаційній безпеці досягається взаємна компенсація недоліків таких підходів. Таким чином, досягається підвищення ефективності й швидкодії системи забезпечення інформаційної безпеки держави в СІС, що є сьогодні вкрай актуальним завданням для України.

ПОДЯКИ

Робота виконана на кафедрі комп'ютерних технологій і моделювання систем Житомирського національного агроекологічного університету в рамках госпдоговірної науково-дослідницької теми «Методологія побудови сучасних інформаційних технологій аналізу і відображення стану інформаційної та екологічної безпеки держави» ДР№ 0115U004181 за сприяння науково-дослідного відділу інформаційної та кібернетичної безпеки наукового центру Житомирського військового інституту ім. С. П. Корольова в особі начальника відділу – д.т.н., с.н.с. Р. В. Грищука. За результати наукових досліджень у напрямку розробки і впровадження новітньої методології побудови систем забезпечення інформаційної безпеки держави в соціальних інтернет-сервісах автора відзначено стипендією Кабінету Міністрів України для молодих учених.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грищук Р. В. Основи кібернетичної безпеки : моногр. / Р. В. Грищук, Ю. Г. Даник ; за заг. ред. проф. Даника Ю. Г. – Житомир : ЖНАЕУ, 2016. – 636 с.
2. Соціальні мережі як інструмент взаємовпливу влади та громадянського суспільства : [монографія] / [О. С. Онищенко, В. М. Горовий, В. І. Попик та ін.] ; НАН України, Нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. – Київ, 2014. – 260 с.
3. Лапшин С. В. Методы повышения показателей качества фильтрации DLP-систем на основе предметно-ориентированной морфологической модели естественного языка : дисс. … канд. техн. наук : 05.13.19 / Лапшин Сергей Владимирович. – Санкт-Петербург, 2014. – 115 с.
4. Какие бывают типы контента и как с ними работать для реализации успешной стратегии контент-маркетинга / Alphaland.in Интернет Маркетинг [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://alphaland.in/kakie-by-vayut-tipy-kontenta-i-kak-s-nimi/ (дата обращения: 29.10.16). – Название с экрана.
5. Чернишук С. В. Методика виявлення кібернетичних загроз у природномовних текстах / С. В. Чернишук // Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем. – 2013. – Вип. 8. – С. 112–121.
6. Грищук Р. В. Теоретичні основи моделювання процесів нападу на інформацію методами теорій диференціальних ігор та диференціальних перетворень: монографія / Р. В. Грищук. – Житомир : Рута, 2010. – 280 с.
7. Manning Chr. Introduction to Information Retrieval / Chr. Manning, P. Raghavan, H. Schütze. – Cambridge University Press, 2008. – 544 p.
8. Латентно-семантический анализ / Сайт Хабрхабр [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://habrahabr.ru/post/110078/ (дата обращения : 29.10.16). – Название с экрана.
9. Indexing by latent semantic analysis / [S. Deerwester, S. T. Dumais, G. W. Furnas et al], // Journal of the American Society for Information Science. – 1990. – 41(6). – P. 391–407. DOI: 10.1002/(sici)1097-4571(199009)41:6<391::aid-asi1>3.0.co;2-9.
10. Стеммер Портера для русского языка / О программировании, алгоритмах и не только [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.algorithmist.ru/2010/12/porter-stemmer-russian.html/ (дата обращения: 29.10.16). – Название с экрана.
11. Молодецька К. В. Узагальнена класифікація загроз інформаційній безпеці держави в соціальних інтернет-сервісах / К. В. Молодецька // Защита информации. – 2016. – Вып. 23. – С. 75–87.
12. Gruber T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications / T. R. Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. – 5(2). – P. 199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
13. Bouiadjra A. B. A framework for evaluating and ranking ontologies / A. B. Bouiadjra, S. M. Benslimane // International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies. – 2013. – 8(2). – P. 155. DOI: 10.1504/ijmso.2013.056600.
14. Vargas-Vera M. State of the art on Ontology alignment / M. Vargas-Vera, M. Nagy // International Journal of Knowledge Society Research. – 2015. – 6(1). – P. 17–42. DOI: 10.4018/ijksr.2015010102.
15. Priya M. A survey of state of the art of Ontology construction and merging using formal concept analysis / M. Priya, C. Aswani Kumar // Indian Journal of Science and Technology. – 2015. – 8(24). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i24/82808.
16. Василюк Я. Р. Аналіз моделей, методів, принципів і засобів для побудови онтологій області мікроелектромеханічних систем / Я. Р. Василюк, В. М. Теслюк, А. Я. Зелінський // Наук. вісн. Нац. лісотехн. ун-ту Укр. : зб. наук. -техн. пр. – 2011. – Вип. 21(12). – С. 322–330.
17. Wang W. Probabilistic topic models for learning Terminological Ontologies / W. Wang, P. M. Barnaghi, A. Bargiela // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. – 2010. – 22(7). – P. 1028–1040. DOI: 10.1109/tkde.2009.122.
18. Марченко О. О. Порівняння методів онтологічного семантичного аналізу та алгоритмів латентного семантичного аналізу / О. О. Марченко // Вісн. Київського нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Серія фізико-математичні науки. – 2012. – 2. – С. 169–174.
19. Тролесфера / Тексти.org.ua [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://texty.org.ua/d/fb-trolls/ (дата звернення: 29.10.16). – Назва з екрану.

Стаття надійшла до редакції 08.12.2016.
Після доробки 26.12.2016.

Молодецкая-Гринчук К. В.
Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий и моделирования систем Житомирского национального агроэкологического университета, Житомир, Украина

МЕТОД ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЗНАКОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В СОЦИАЛЬНЫХ ИНТЕРНЕТ-СЕРВИСАХ ПО СОДЕРЖАТЕЛЬНЫМ ПРИЗНАКАМ

Актуальность. Сегодня социальные интернет-сервисы превратились в эффективный инструмент коммуникации между участниками виртуальных сообществ – акторами. Учитывая высокую скорость распространения контента, трансграничность процессов взаимодействия актеров, наличие средств для их организации в группы, социальные-интернет сервисы могут применяться как действенное средство проведения информационных операций против человека, общества, государства. В процессах коммуникации акторов в виртуальных сообществах часто используется текстовый контент. Разработка эффективных алгоритмов функционирования системы обеспечения информационной безопасности государства для решения проблемы мониторинга текстового контента социальных интернет-сервисов является актуальной теоретико-прикладной задачей.

Цель. Целью исследований является обоснование и разработка метода выявления информационных воздействий в социальных интернет-сервисах по содержательным признакам для повышения эффективности системы обеспечения информационной безопасности государства.

Метод. Разработанный метод основывается на современных подходах к интеллектуальному анализу текстового контента – латентно-семантическом индексировании и семантическом анализе на базе онтологий.

Результаты. В результате латентно-семантического индексирования отбирается релевантный заданной тематике текстовый контент на основе его содержания и без учета плотности ключевых слов. На этапе семантического анализа реализовано процедуры последующего обнаружения опасных семантических конструкций в отобранном текстовом контенте. В случае детектирования противоречивых фрагментов текстового контента и онтологии и после их анализа экспертами выполняется наполнение онтологических баз знаний шаблонами угроз информационной безопасности в социальных интернет-сервисах. Таким образом, комбинация методов латентно-семантического индексирования и семантического анализа обеспечивает взаимную компенсацию их недостатков и выявления скрытых зависимостей между языковыми единицами.

Выводы. Благодаря разработанному методу выявления признаков информационных воздействий в социальных интернет-сервисах автоматизируются процедуры идентификации в виртуальных сообществах информационных операций, направленных против информационной безопасности человека, общества, государства. Применение предложенного метода выявления признаков информационных воздействий позволяет повысить эффективность и быстродействие системы обеспечения информационной безопасности государства в социальных интернет-сервисах как составляющей национальной безопасности Украины.

Ключевые слова: социальный интернет-сервис, информационная безопасность, угроза, текстовый контент, латентно-семантическая индексация, семантический анализ, онтология.

Molodetska-Hrynchuk K.
Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Information Technologies and System Modelling sub-Department, Zhitomir National Agroecological University, Ukraine

OUTREACHES CONTENT TRACING TECHNIQUE FOR SOCIAL NETWORKING SERVICES

Context. Today's social networking services have turned into an efficient communication tool for the members of virtual communities termed actors. The high rate of content dissemination, transboundary interactions between the actors and the drives to group the latter up, could make the services efficient cyberwarfare against the person, society and country. Text content is the most frequently used means of communication between the actors of virtual communities. The actual theoretical and applied research, aimed at designing maintenance procedures for the national cybersecurity system, is to solve the problem of text content monitoring.

Objective. The research objective is to suggest and design a method for detecting outreaches by their content in the collection of text to solve the problem of efficient monitoring the social media.

Method. The method designed is based on the modern content analysis approaches, i. e. the latent semantic indexing and the semantic analysis based on ontology.

Results. The latent semantic indexing selects the concept relevant context by its content ignoring key word density. The semantic analysis will specify the further techniques of detecting harmful semantic structures in the body of text selected. When any conceptual mismatches in the text content and ontology detected and professionally analyzed, the ontology knowledge bases get updates of the social networking service cyberthreat patterns. Thus, the combination of both produces cancelling effect on the defects of and uncovers latent relationships between linguistic units.

Conclusions. The outreaches tracing method proactively identifies cyberwarfare in virtual communities waged against individual, social and national cybersecurity. The suggested method increases efficiency and effectiveness of the national cybersecurity system on social networking services.

Keywords: social networking services; cybersecurity; threats; text content; latent semantic indexing; semantic analysis; ontology.

REFERENCES

1. Hryshchuk R. V., Danyk Yu. H. za zah. red. prof. Danyka Yu. H. Osnovy kibernetychnoi bezpeky : monohr. Zhytomyr, ZhNAEU, 2016, 636 p.
2. Onyshchenko O. S., Horovyi V. M., Popyk V. I. ta in. Sotsialni merezhi yak instrument vzaiemovplyvu vlady ta hromadianskoho suspilstva : [monohrafiia] ; NAN Ukrainy, Nats. b-ka Ukrainy im. V. I. Vernadskoho. Kyiv, 2014, 260 p.
3. Lapshin S. V. Metody povysheniya pokazatelej kachestva fil'tracii DLP-sistem na osnove predmetno-orientirovannoj morfologicheskoj modeli estestvennogo yazyka : diss. … kand. texn. nauk : 05.13.19. Sankt-Peterburg, 2014, 115 p.
4. Kakie byvayut tipy kontenta i kak s nimi rabotat' dlya realizacii uspeshnoj strategii kontent-marketinga / Alphaland. in Internet Marketing [E'lektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://

alphaland.in/kakie-by-vayut-tipy-kontenta-i-kak-s-nimi/ (data obrashheniya: 29.10.16). Nazvanie s e'krana.
5. Chernyshuk S. V. Metodyka vyiavlennia kibernetychnykh zahroz u pryrodnomovnykh tekstakh, *Problemy stvorennia, vyprobuvannia, zastosuvannia ta ekspluatatsii skladnykh informatsiinykh system*, 2013, Vyp. 8, pp. 112–121.
6. Hryshchuk R. V. Teoretychni osnovy modeliuvannia protsesiv napadu na informatsiiu metodamy teorii dyferentsialnykh ihor ta dyferentsialnykh peretvoren: monohrafiia. Zhytomyr, Ruta, 2010, 280 p.
7. Manning Chr., Raghavan P., Schütze H. Introduction to Information Retrieval. Cambridge University Press, 2008, 544 p.
8. Sajt Xabrxabr Latentno-semanticheskij analiz. [E'lektronnyj resurs]. Rezhim dostupa : https://habrahabr.ru/post/110078/ (data obrashheniya : 29.10.16). Nazvanie s e'krana.
9. Deerwester S., Dumais S. T., Furnas G. W., Landauer T. K., Harshman R. Indexing by latent semantic analysis, *Journal of the American Society for Information Science*, 1990, 41(6), pp. 391–407. DOI: 10.1002/(sici)1097-4571(199009)41:6<391::aid-asi1>3.0.co;2-9.
10. Stemmer Portera dlya russkogo yazyka / O programmirovanii, algoritmax i ne tol'ko [E'lektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: http://www.algorithmist.ru/2010/12/porter-stemmer-russian.html/ (data obrashheniya: 29.10.16). Nazvanie s e'krana.
11. Molodetska K. V. Uzahalnena klasyfikatsiia zahroz informatsiinii bezpetsi derzhavy v sotsialnykh internet-servisakh, *Zashhita informacii*, 2016, Vyp. 23, pp. 75–87.
12. Gruber T. R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications, *Knowledge Acquisition*, 1993, 5(2), pp. 199–220. DOI: 10.1006/knac.1993.1008.
13. Bouiadjra A. B., Benslimane S. M. A framework for evaluating and ranking ontologies, *International Journal of Metadata, Semantics and Ontologies,* 2013, 8(2), pp. 155. DOI: 10.1504/ijmso.2013.056600.
14. Vargas-Vera M., Nagy M. State of the art on Ontology alignment, *International Journal of Knowledge Society Research,* 2015, 6(1), pp. 17–42. DOI: 10.4018/ijksr.2015010102.
15. Priya M., Aswani Kumar C. A survey of state of the art of Ontology construction and merging using formal concept analysis, *Indian Journal of Science and Technology*, 2015, 8(24). DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i24/82808.
16. Vasyliuk Ya. R., Tesliuk V. M., Zelinskyi A. Ya. Analiz modelei, metodiv, pryntsypiv i zasobiv dlia pobudovy ontolohii oblasti mikroelektromekhanichnykh system, Nauk. visn. Nats. lisotekhn. un-tu Ukr. : zb. nauk.-tekhn. pr., 2011, Vyp. 21(12), pp. 322–330.
17. Wang W., Barnaghi P. M., Bargiela A. Probabilistic topic models for learning Terminological Ontologies, *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering,* 2010, 22(7), pp. 1028–1040. DOI: 10.1109/tkde.2009.122.
18. Marchenko O. O. Porivniannia metodiv ontolohichnoho semantychnoho analizu ta alhorytmiv latentnoho semantychnoho analizu, *Visn. Kyivskoho nats. un-tu im. T. Shevchenka. Seriia fizyko-matematychni nauky*, 2012, 2, pp. 169–174.
19. Trolesfera Teksty.org.ua [Elektronnyi resurs]. Rezhym dostupu : http://texty.org.ua/d/fb-trolls/ (data zvernennia: 29.10.16). Nazva z ekranu.

УДК 004.932

Сердюк М. Є.[1], Беркут В. Г.[2]

[1]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна
[2]Студент магістратури кафедри комп'ютерних технологій Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ВИДАЛЕННЯ ТІНЕЙ У ЦИФРОВИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

Актуальність. Наявність затінених ділянок на цифрових зображеннях може спричиняти проблеми в процесах розпізнавання, відстеження, класифікації об'єктів. Тому виявлення та видалення тіней є важливим етапом попередньої обробки зображень, яка застосовується в багатьох алгоритмах комп'ютерного зору.

Мета. Метою роботи є пошук ефективних методів автоматичного виявлення та видалення тіней та розробка програмної системи, яка реалізує відповідну обробку зображень.

Методи. В роботі розглянуто декілька підходів до процесів виявлення та перетворення затінених ділянок, проаналізовано застосовність їх до тіней різних типів. Для локалізації тіней в роботі використано метод з переходом до колірного простору *Lab* та метод з попереднім видаленням текстури. Для видалення тіней використано чотири методи: адитивний, на основі математичної моделі тіні, з переходом до *Lab*-простору, константний. Запропоновано модифікації деяких етапів з метою покращення практичних результатів.

Результати. Розроблена комп'ютерна система, в якій реалізовано автоматичне виявлення та усунення тіней з використанням зазначених методів, які обираються в залежності від характеру затінених областей. Деякі параметри методів доступні для налаштування. Система протестована на низці зображень. Проаналізовано якість та швидкість роботи реалізованих методів. Наведені результати обробки зображень різними методами.

Висновки. Реалізовані в представленій комп'ютерній системі методи локалізації та видалення тіней з запропонованими модифікаціями ефективно працюють на зображеннях різних типів. Додаткове налаштування параметрів дозволяє покращити результати в деяких складних випадках. Система може бути застосована для попередньої обробки зображень з метою запобігання помилкам в подальшій роботі алгоритмів комп'ютерного зору.

Ключові слова: виявлення тіні, видалення тіні, обробка зображень, колірний простір *Lab*, сегментація, модель тіні.

НОМЕНКЛАТУРА

a – хроматична складова в діапазоні від зеленого до червоного кольору у колірній моделі *Lab*;

B– хроматична складова в діапазоні від синього до жовтого кольору у колірній моделі *Lab*;

H – значення порогу для колірних складових в методі з переходом до простору *Lab*;

I – вихідне зображення з тіньовими областями;

$\widetilde{I}$ – результуюче зображення без тіней;

I_i – інтенсивність i-го пікселя;

K_C – значення константи для колірного каналу C в константному методі;

k_i – коефіцієнт тіні i-го пікселя;

K_L – коефіцієнт для розрахунку порогового значення в процедурі бінаризації;

L – світлота пікселя в колірній моделі *Lab*;

mean(x) – середнє значення по масиву x;

n – розмір масиву пікселів зображення;

Q – освітлена область вихідного зображення;

R_i – коефіцієнт, що характеризує відбивні властивості поверхні в i-му пікселі;

r – коефіцієнт освітленості i-го пікселя;

S – тіньова область зображення;

SD(x) – стандартне відхилення для масива x;

T – значення порогу в процедурі бінаризації зображення;

t_i – фактор розсіювання направленого світла в i-му пікселі;

δ – ширина смуги пікселів уздовж границі тіні;

θ_i – кут між напрямком направленого світла та нормаллю поверхні в i-му пікселі.

© Сердюк М. Є., Беркут В. Г., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-14

ВСТУП

В багатьох задачах комп'ютерного зору проблемою є зайва інформативність вхідних зображень, що є наслідком присутності тіней на цих зображеннях. Тіні утворюють помилкові об'єкти через значну різницю яскравостей тіней і навколишнього фону, а це призводить до небажаних проблем і навіть помилок в роботі алгоритмів розпізнавання, виявлення, відстеження і класифікації об'єктів. Тому виявлення та видалення тіней є важливою задачею попередньої обробки зображень. Крім того, видалення тіней з зображень представляє інтерес з естетичної точки зору та використовується при редагуванні зображень чи в обчислювальній фотографії. Отже, актуальною є розробка інформаційної технології виявлення та видалення тіней з зображень, яка б відрізнялась високим ступенем автоматизації процесу локалізації та усунення тіней.

Тіні можна визначити як частини сцени, які безпосередньо не освітлені джерелом світла через присутність об'єкта, що загороджує це джерело [1]. Можна виділити два основні класи тіней: власна тінь та відкидувана тінь. Власна тінь з'являється на частині об'єкта, яка не освітлюється прямим світлом. Відкидувана тінь – це область, яка проектується об'єктом на поверхню в напрямку прямого світла. На основі інтенсивності тіні можна розділити на м'які та жорсткі. М'які тіні зберігають текстуру поверхні фону, але мають розмиті та нечіткі границі, що зазвичай свідчить про плавний перехід від тіні до освітленої частини зображення, а це викликає труднощі при виявленні таких тіней та їх локалізації. Жорсткі тіні мають різкі границі та інтенсивність, що значно відрізняється

від оточуючої поверхні. Але такі тіні є занадто темними і містять мало інформації про текстуру поверхні, що ускладнює їх видалення зі збереженням природного вигляду текстури. Крім того, жорсткі тіні можуть бути помилково прийняті за темні об'єкти.

Видалення тіней з зображень може істотно покращити та спростити виконання ряду завдань комп'ютерного зору. З цих причин постійно розробляються та удосконалюються різні підходи розв'язання даної задачі, які направлені на знаходження способів правильного виявлення та видалення тіней при збереженні незмінними інших деталей вихідного зображення.

Метою роботи є пошук ефективних шляхів автоматичного виявлення тіні та її видалення з використанням тільки одного вихідного зображення, а також розробка програмної системи, яка реалізує ці методи для обробки зображень.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай є вихідне зображення *I*, яке має затінені та освітлені ділянки. Це зображення можна подати у вигляді $I = S + Q$. На основі аналізу зображення *I* необхідно визначити область з тіньовими пікселями *S*, обробити її та отримати результуюче зображення $\widetilde{I}$, яке не містить тіней: $\widetilde{I} = \widetilde{Q}$.

Розв'язання задачі будемо проводити в два етапи. Перший етап – виявлення тіні, тобто локалізація області *S*. Результатом має бути бінарне зображення, на якому білі пікселі відповідають тіньовим, а чорні – нетіньовим пікселям. Другий етап – видалення тіні, тобто обробка пікселів області *S* на основі бінарної маски та отримання безтіньового зображення $\widetilde{I}$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В літературі представлені різні підходи до розв'язання задачі усунення тіней в зображеннях. Так, в роботі [1] запропоновано метод для виявлення та видалення тіней з використанням переходу до колірного простору *YCbCr*. Виявлення тіні здійснюється на основі аналізу компоненти інтенсивності, зображення сегментується на декілька областей, які мають однакову щільність тіні. Для видалення тіні інтенсивність відповідних пікселів підвищується, а потім здійснюється корекція кольору затінених ділянок вже у колірному просторі *RGB*. Перевагою методу є те, що в результуючому зображенні немає різких переходів між затіненими та незатіненими деталями, і всі деталі в затінених областях залишаються незмінними. Але метод працює добре на зображеннях з різкими границями тіні.

В роботі [2] запропоновано метод, оснований на використанні градієнтних полів вихідного зображення та спеціального зображення, інваріантного до освітлення, отримання якого є окремою задачею. В результаті порівняння градієнтних полів двох зображень будується нове градієнтне поле безтіньового зображення. Результуюче зображення без тіней відновлюється за градієнтним полем з використанням рівняння Пуассона. Метод дає непогані результати для тіней з різкими границями, але потребує послідовності зображень, що містять одну сцену при різних умовах денного світла. Недоліком методу є також те, що результат виходить помітно розмитим.

Підхід, запропонований в роботі [3], базується на припущенні, що тіньові області відрізняються від освітлених на деяку константу. Значення константи обчислюється для кожного каналу *RGB* зображення та додається до значень пікселів тіні, і таким чином зменшується різниця між тіньовою областю та сусідніми освітленими областями. Перевагами даного методу є його швидкість, простота реалізації та ефективність. Але в досить складних сценах тінь не видаляється, а лише послаблюється.

У роботі [4] запропоновано метод, в якому видалення тіней здійснюється в три етапи. Спочатку створюється 1D безтіньове зображення з постійним освітленням. Потім отримується еквівалентне 2D зображення, яке зберігає деяку інформацію про колір. В кінці генерується безтіньове кольорове 3D зображення, а границі тіні коригуються за допомогою процедури зафарбовування. Метод вимагає калібрування, крім того може помилково класифікувати деякі межі об'єктів вихідного зображення як границі тіні.

У роботі [5] запропоновано спосіб видалення тіней з криволінійних областей, що зберігає текстуру фону. Видалення ефекту тіней досягається шляхом обчислення різних масштабних коефіцієнтів для тіньових та напівтіньових регіонів.

Ще одним способом, який використовується для локалізації тіней, є інтерактивне виокремлення області тіні користувачем, наприклад, за допомогою миші. Такий спосіб, очевидно, не є автоматичним, але може застосовуватися для виявлення як жорстких, так і м'яких тіней.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для реалізації етапу виявлення тіньових областей були обрані два методи. Перший з них оснований на ідеях, викладених в роботі [6]. Для виявлення тіні здійснюється перехід від колірного простору *RGB* до простору *Lab*, у якому компонента *L* характеризує світлоту, що асоціюється з яскравістю пікселя, а хроматична складова пікселя описується компонентами *a* і *b*. Оскільки тінь менш освітлена, ніж нетіньова частина зображення, то можливо її виявити при розгляді каналу *L*, який зберігає інформацію про яскравість. Для більшості зображень, отриманих на відкритому повітрі, значення параметра *b* менше в тіньових областях. Отже, для виявлення тіней аналізуються значення параметрів *L*, *a* та *b* кожного пікселя. Для цього розраховуються середні значення за всіма каналами простору *Lab:* mean(*L*), mean(*a*), mean(*b*), стандартне відхилення для каналу *L*:

$$\mathrm{SD}(L) = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(L_i - \mathrm{mean}(L))^2}\ , \qquad (1)$$

а також порогове значення

$$T = \mathrm{mean}(L) - K_L \cdot SD(L). \qquad (2)$$

Коефіцієнт K_L у формулі (2) підібрано емпіричним шляхом, в роботі використовується значення $K_L = 1/3$. Виявлення тіні здійснюється за наступним правилом. Якщо $\mathrm{mean}(a) + \mathrm{mean}(b) \le H$, то піксель зі значенням $L < T$ позначається як тіньовий, а решта – як нетіньові. Якщо $\mathrm{mean}(a) + \mathrm{mean}(b) > H$, то пікселі з найбільш

низькими значеннями параметрів L та b можуть бути класифіковані як ті, що належать тіні, а інші – як нетіньові. Значення порогу H може налаштовуватись в залежності від розкиду значень a та b, але в загальному випадку H=256 дає задовільний результат. Отримана бінарна маска часто містить велику кількість неправильно класифікованих пікселів та шум. Для їх видалення можна застосувати процедуру з використанням порогових значень для областей бінарної маски тіні. Але в даній роботі пропонується підхід, що базується на використанні медіанного фільтру для видалення шуму на бінарній масці тіні. Він не потребує додаткових параметрів і дає задовільний результат.

Другий метод для виявлення тіні розроблений з використанням ідей, наведених в [7]. Метод складається з декількох кроків. На першому кроці зображення розмивається за допомогою фільтра Гауса. На другому – застосовується алгоритм середнього зсуву для видалення текстури. Алгоритм середнього зсуву групує об'єкти з близькими ознаками. В якості компонент вектора ознак обираються координати (x, y) пікселя та його RGB компоненти. Пікселі зі схожими ознаками поєднуються в один сегмент, в результаті отримуємо зображення з однорідними областями. На третьому кроці отримане зображення конвертується у відтінки сірого. На останньому кроці застосовується процес бінаризації для перетворення зображення у відтінках сірого в монохромне, де присутні тільки чорні та білі пікселі. Порогове значення T обчислюється за формулою (2), де середнє значення та стандартне відхилення (формула (1)) розраховуються на масиві інтенсивностей пікселів зображення у відтінках сірого. Після виконання описаних кроків отримуємо бінарне зображення, що визначає виявлену тінь: білі пікселі відповідають тіні, а чорні – освітленій частині. Слід відзначити, що ефективність даного методу суттєво залежить від параметрів, що використовуються в алгоритмі середнього зсуву, та від значення порогу T, що застосовується при бінаризації.

Другий етап розв'язання задачі – видалення тіні. Основна ідея видалення тіні полягає в її освітленні у відповідності до обраного підходу. Припускаємо, що тінь вже виявлено, тобто тіньова область S та освітлена область Q вже відомі. Для видалення тіні пропонується використовувати один з чотирьох методів, який обирається в залежності від типу зображення та тіні.

Перший метод – адитивний [8]. В його основі лежить ідея збалансування інтенсивності тіньових та освітлених областей. Це досягається шляхом обчислення середніх значень по червоному, зеленому та синьому каналам в RGB-зображенні для освітлених та затінених областей окремо та додаванні різниці цих значень до пікселів тіні. Отже, алгоритм цього методу складається з таких кроків:

– розрахувати середні значення для освітлених пікселів $\mathrm{mean}(Q(C))$ та для тіньових $\mathrm{mean}(S(C))$, де $C \in \{R, G, B\}$.

– знайти різницю відповідних середніх значень за формулою:

$$del_C = \mathrm{mean}(Q(C)) - \mathrm{mean}(S(C)), \quad \text{де} \quad C \in \{R, G, B\}.$$

– додати отримані різниці до каналів RGB-зображення:

$$C = C + del_C,\ C \in \{R, G, B\}.$$

Метод простий, але добре працює лише для зображень, що містять тінь на деякій однорідній поверхні.

Другий метод оснований на моделі тіні, наведеній у роботі [1]. Проста модель тіні враховує два типи світла: розсіяне та направлене. Направлене світло надходить безпосередньо від джерела світла, а розсіяне багаторазово відбивається від оточуючих поверхонь. Модель зображення з тінями можна надати формулою

$$I_i = (L_Q t_i \cos\theta_i + L_S) R_i. \tag{3}$$

L_Q та L_S описують інтенсивність освітлених та затінених пікселів. Якщо $t_i = 1$, то об'єкт знаходиться в освітленій області, якщо $t_i = 0$, то в тіні. Коефіцієнт тіні для i-го пікселя визначається як $k_i = t_i \cos\theta_i$, а його коефіцієнт освітленості – як $r = L_Q / L_S$. З урахуванням цих коефіцієнтів формула (3) набуває вигляду:

$$I_i = L_S R_i (k_i r + 1). \tag{4}$$

Якщо тінь виявлена, то кожному i-му пікселю присвоєно значення k_i, яке дорівнює нулю, якщо піксель тіньовий, або одиниці в протилежному випадку. Тоді для отримання безтіньових пікселів необхідно збільшити інтенсивність кожного тіньового пікселя. Для цього, використовуючи формулу (4), отримуємо наступний вираз для розрахунку значень пікселів у безтіньовому зображенні:

$$\widetilde{I}_i = I_i (r + 1) / (k_i r + 1). \tag{5}$$

Отже, алгоритм видалення тіні за даним методом складається з таких кроків:

– обчислити середні значення для освітлених пікселів $\mathrm{mean}(Q(C))$ та для тіньових $\mathrm{mean}(S(C))$, де $C \in \{R, G, B\}$.

– знайти коефіцієнт $r_c = \dfrac{\mathrm{mean}(Q(C))}{\mathrm{mean}(S(C))}$, де $C \in \{R, G, B\}$.

– обчислити нові значення тіньових пікселів для кожного колірного каналу: $\widetilde{C} = (r_c + 1) \cdot C,\ C \in \{R, G, B\}$.

Розглянуті два методи працюють швидко та демонструють прийнятні результати на зображеннях, що містять частково освітлені однорідні поверхні. Загальним недоліком цих методів є те, що в них враховуються лише середні значення інтенсивності і кольору для всього зображення при видаленні тіні. Тому, якщо сцена складається з великої кількості об'єктів з різною освітленістю та кольором, ці методи не дають коректного освітлення тіні та вирівнювання її кольору.

Для більш складних випадків зображень з тінями пропонується використовувати наступні два методи. Один із них застосовує ідеї роботи [9]. Слід відзначити, що в багатьох випадках на зображеннях з тінями інтенсивність затінених областей поступово зростає від тіні до світла. Тому на зображенні можуть бути наявними два види тіньових областей: частково освітлені та неосвітлені. Отже, освітлення області тіні часто приводить до неповного видалення тіні. Для повного видалення тіні необхідно враховувати не тільки інтенсивність, але і колірний тон та наси-

ченість тіньової області. Значення колірних характеристик області тіні повинні бути вирівняні до відповідних характеристик освітлених областей, що її оточують. Алгоритм, що реалізує наведені міркування, складається з таких кроків:

– вихідне *RGB*-зображення конвертується в *Lab*-простір;

– *Lab*-зображення сегментується з використанням алгоритму середнього зсуву у відповідності до кольору пікселів;

– якщо до сегменту потрапляють і освітлені, і тіньові пікселі, то такий сегмент розбивається на два окремих. В результаті тіньові сегменти будуть сусідніми до сегментів освітленої області;

– для кожного тіньового сегменту S_k серед усіх сусідніх освітлених сегментів обирається найближчий за кольором – сегмент Q_k. Нові значення каналів *L*, *a* та *b* сегменту S_k розраховуються за формулами:

$$\widetilde{L}_{S_k} = L_{S_k} + (\mathrm{mean}(L_{Q_k}) - \mathrm{mean}(L_{S_k})),$$

$$\widetilde{a}_{S_k} = a_{S_k} \frac{\mathrm{mean}\,(a_{Q_k})}{\mathrm{mean}\,(a_{S_k})},\ \widetilde{b}_{S_k} = b_{S_k} \frac{\mathrm{mean}(b_{Q_k})}{\mathrm{mean}(b_{S_k})}.$$

– на останньому кроці всі границі між затіненими та освітленими регіонами розмиваються за допомогою фільтра Гауса або обробляються з використанням процедури зафарбовування.

Слід зауважити, що вирівнювання значень кольорів областей, які повністю затінені, до найближчого за кольором сусіднього освітленого сегменту може призвести до появи на зображенні «хибних» кольорів, тобто після корекції колір області буде суттєво відрізнятися від початкового, і сцена не буде виглядати природньо. Для попередження цього ефекту необхідно перевіряти різницю кольорів між сегментами S_k та Q_k і, якщо вона перевищує деякий поріг, вирівнювання значення кольору сегменту S_k не виконується. Однак на практиці не вдалось знайти універсального значення різниці кольорів, тому цей поріг налаштовується для кожного конкретного зображення.

Ще один метод видалення тіней – константний, оснований на припущенні, що тіньова область відрізняється від освітленої лише на значення деякої константи [3]. Головна ідея полягає у знаходженні значення цієї константи та освітленні тіні з її використанням. Для цього після виявлення тіні знаходять границі тіні (в роботі для цього використовується метод Кенні [10]) та визначають два масиви пікселів: масив *S* містить тіньові пікселі, що знаходяться вздовж границі тіні, масив *Q* містить нетіньові пікселі, сусідні до границі тіні. Відзначимо, що на відміну від базового методу, де в масив обираються пікселі, що безпосередньо сусідні до границі тіні, в даній роботі для покращення результатів видалення, зокрема для зображень з нечіткими границями тіні, масиви *Q* та *S* будуються з пікселів, які розташовані в межах смуги шириною δ уздовж границі тіні. Величина δ може варіюватися в залежності від характеру тіні. Крім того, якщо масиви *Q* та *S* містять різну кількість елементів, то їх розміри вирівнюються так, щоб їх довжини були рівні. Значення константи знаходять за формулою:

$$K_C = \min_{a_c} \left\| Q(C) - (S(C) + a_c) \right\|^2, \text{ де } C \in \{R, G, B\}.$$

Далі здійснюється видалення тіні з зображення шляхом додавання значення константи до відповідного каналу кожного пікселя тіні. Для подальшого згладжування переходу між освітленими та тіньовими областями в даній роботі пропонується застосувати медіанний фільтр або процедуру зафарбовування границі, використовуючи інформацію, представлену в інших частинах зображення. Якщо на зображенні присутні декілька тіньових областей, то описана процедура повторюється для пошуку константи для кожного регіону. Це дозволило отримати кращі результати, в порівнянні з використанням лише одного значення константи K_C для всіх тіньових регіонів. Варто зауважити, що пошук різних констант для різних тіньових областей збільшив час обробки зображення, але якість результуючого зображення при цьому суттєво вище.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Описані вище методи реалізовані в комп'ютерній системі, яка може виконувати такі функції: виявлення тіней, видалення тіней, кластеризація, обробка границь, збір статистики. Програма розроблена на мові C++ з використанням бібліотеки комп'ютерного зору OpenCV. Вікно програми складається з області керування та області виводу. Область керування містить кнопки та прапорці для вибору методів та параметрів. Всі засоби управління програмою згруповані в панелі відповідно до свого призначення. Область виводу поділяється на три частини: в першій відображається вихідне зображення, в другу виводиться результат виявлення тіні (бінарна маска тіні), в третю частину виводиться результуюче зображення. Відзначимо, що обрати можна не тільки методи виявлення та видалення тіні, а й методи обробки границь (медіанний фільтр, фільтр Гауса, операція зафарбування), а також задати деякі параметри. На рис. 1 наведено вікно програми з вихідним зображенням та результатами його обробки.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Представлена комп'ютерна система була протестована на низці зображень. Приклади виявлення тіней програмою наведені на рис. 2, приклади видалення тіней різними методами – на рис. 3.

Крім якості обробки зображень була проаналізована й швидкодія реалізованих методів. Результати вимірювання часу виявлення та видалення тіней наведені в табл. 1.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Тестування програми на різних зображеннях показало, що перший метод виявлення тіні з використанням простору *Lab* добре працює на зображеннях з чіткими границями тіні. Більш складні види тіней краще визначає другий метод. Він є більш універсальним, але потребує більше часу. При видаленні тіней перші два методи дають гарні результати для зображень, які містять деяку однорідну поверхню (об'єкт), на яку частково падає тінь. *Lab*-метод успішно видаляє тіні при слабкіших обмеженнях на зображення. Найбільш універсальним показав себе константний метод, який дав задовільні результати видалення на досить складних зображеннях.

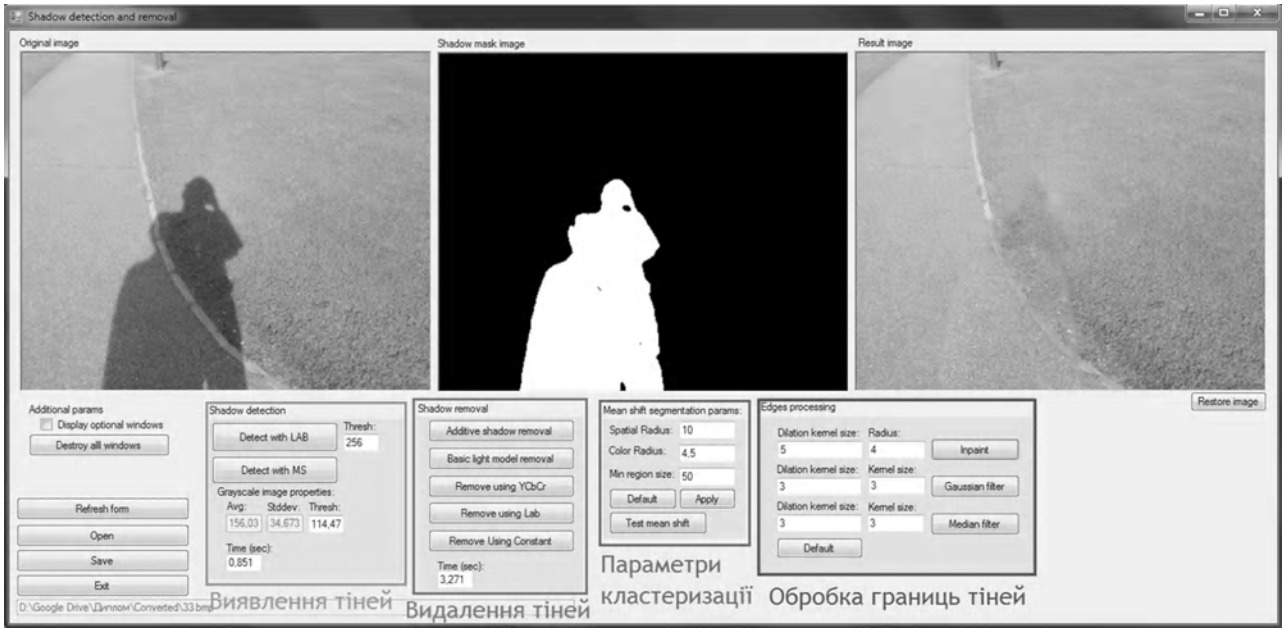
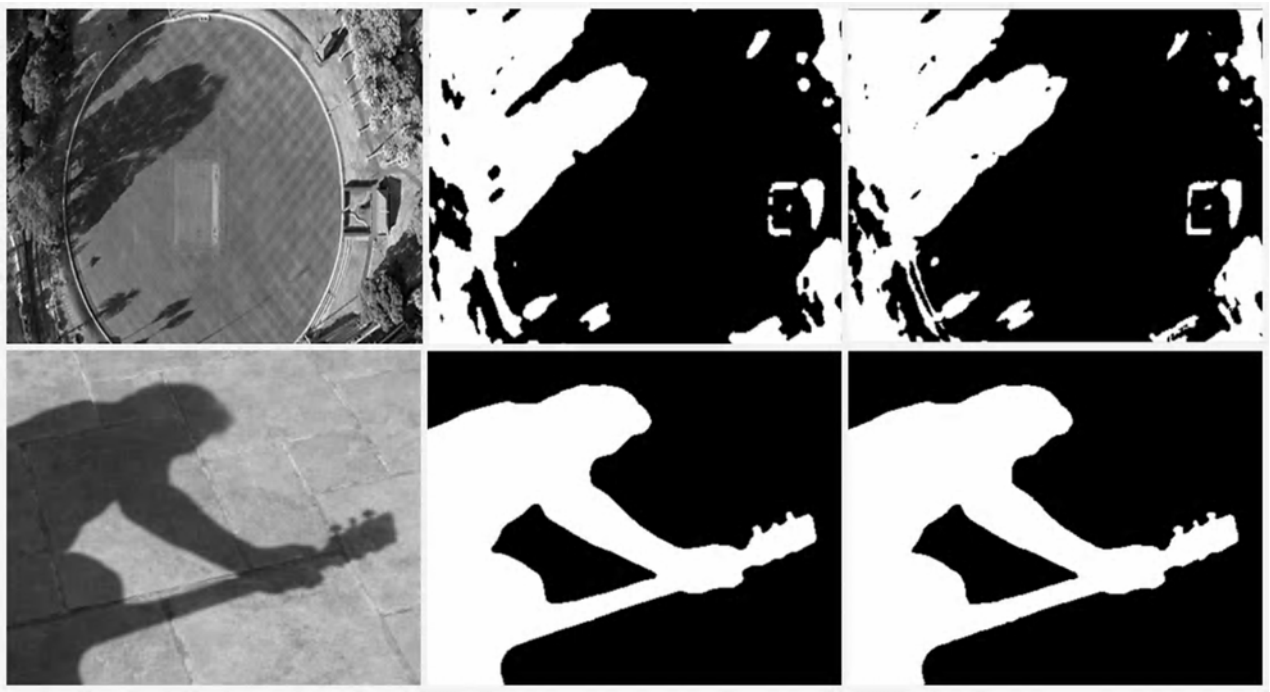


Рисунок 1 – Вікно програми



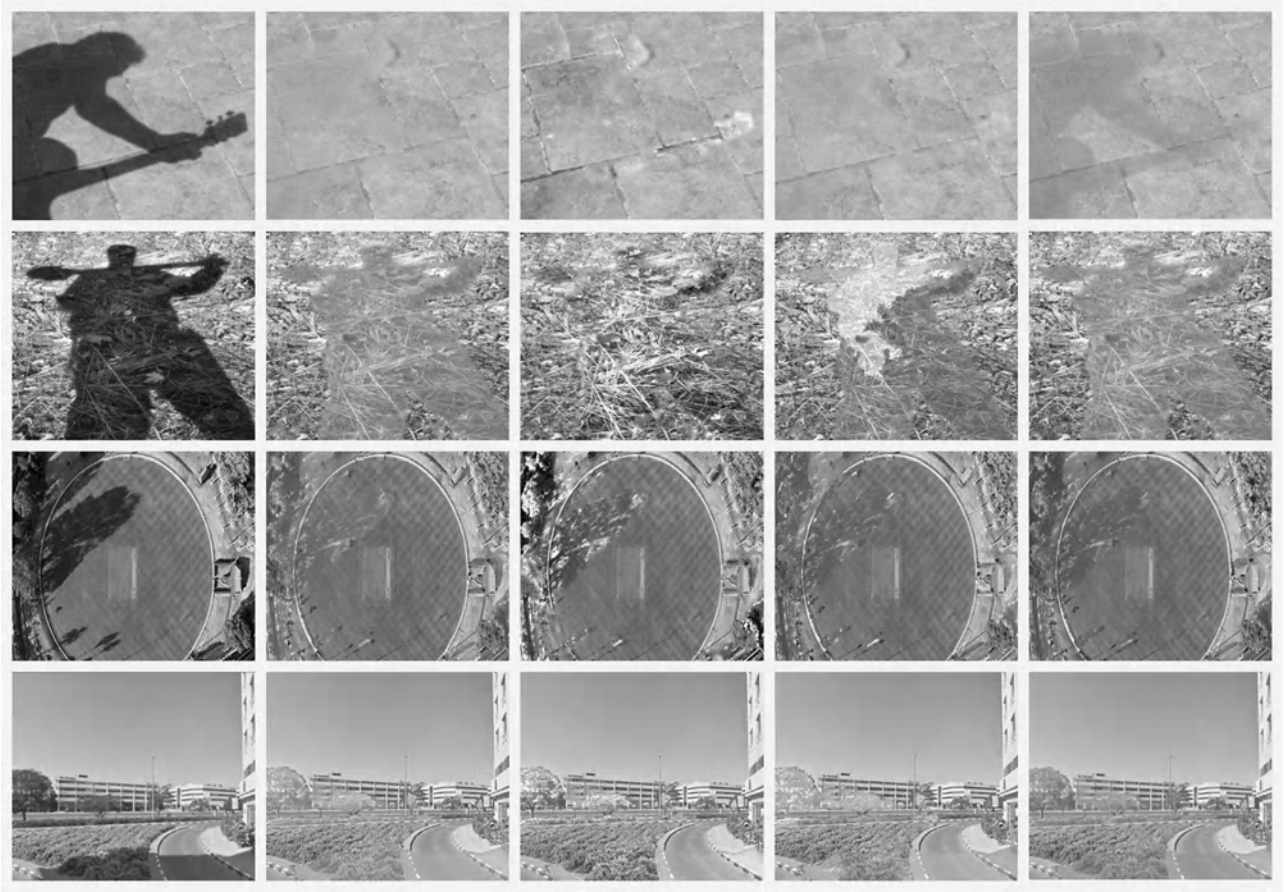
а б в

Рисунок 2 – Результати виявлення тіней:
а – вихідне зображення, б – виявлення методом з переходом до *Lab*-простору, в – виявлення методом з видаленням текстури

Аналіз швидкодії методів показав, що швидше працює *Lab*-метод виявлення тіней, а для видалення тіней – адитивний та метод з використанням математичної моделі тіні, в основі яких лежать нескладні алгоритми. Найбільш затратним за ресурсами та часом виявився метод видалення тіней з переходом до *Lab*-простору, що зумовлено використанням процедури кластеризації, а також аналізом та обробкою кожного з регіонів тіні окремо.

ВИСНОВКИ

Запропоновано комп'ютерна система, яка здійснює автоматичне виявлення та видалення тіней на цифровому зображенні. Реалізовані в системі методи локалізації та перетворення тіньових ділянок з запропонованими модифікаціями ефективно працюють на зображеннях різних типів. В залежності від типу зображення та тіні можливий вибір відповідного методу та налаштування параметрів його роботи. Практична цінність системи полягає в тому, що вона може бути застосована для попередньої обробки зображень з метою запобігання помилкам в подальшій роботі алгоритмів комп'ютерного зору. Надалі передбачається пошук шляхів для покращення результатів виявлення та видалення тіней з нечіткими границями.



а б в г д

Рисунок 3 – Приклади видалення тіней: а– вихідне зображення, б – адитивний метод, в – метод на основі моделі тіні, г – *Lab*-метод, д – константний метод

Таблиця 1 – Оцінка швидкодії реалізованих методів

Метод	Середній час (с)	Мінімальн. час (с)	Максим. час (с)
Виявлення тіньових областей			
Перехід до *Lab*-простору	0,085	0,07	0,098
Видалення текстури	2,17212	0,662	6,432
Видалення тіней			
Адитивний метод	0,013	0,011	0,015
Метод на основі моделі тіні	0,014	0,011	0,015
Перехід до *Lab*-простору	4,607	2,773	7,270
Константний метод	2,214	0,363	8,530

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках науково-дослідної роботи кафедри комп'ютерних технологій Дніпропетровського національного університету імені Олеся Гончара «Дослідження математичних моделей фізичних процесів методами ідентифікації та рекурентного аналізу із застосуванням інформаційних технологій» (шифр 0113U004203).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Deb K. Shadow Detection and Removal Based on YCbCr Color Space / K. Deb, A.H. Suny // Smart Computing Review. – 2014. – Vol. 4, № 1. – P. 23–32.
2. Finlayson G. D. Removing Shadows from Images / G. D. Finlayson, S. D. Hordley, M. S. Drew // In: Proceedings of 7 th European Conference on Computer Vision – Part IV, ECCV'02, London, UK, Springer-Verlag, 2002. – P. 823–836.
3. Fredembach C. Simple Shadow Removal / C. Fredembach, G. D. Finlayson // In: Proceedings of 18th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'06 IEEE Computer Society, 2006. – P. 832–835.
4. Finlayson G. D. On the Removal of Shadows from Images / G. D. Finlayson, S. D. Hordley, C. Lu, M. S. Drew // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2006. – Vol. 28, № 1. – P. 59–68.
5. Arbel E. Texture-Preserving Shadow Removal in Color Images Containing Curved Surfaces [Electronic resource] / E. Arbel, H. Hel-Or. – Access mode: http://cs.haifa.ac.il/hagit/papers/CONF/CVPR07_ArbelHelOr-shadowRemoval.pdf.
6. Murali S. Shadow Detection and Removal from a Single Image Using LAB Color Space/ S. Murali, V. K. Govindan // Cybernetics and Information Technologies. – 2013. – Vol. 13, № 1. – P. 95–103.
7. Image Shadow Removal in Mathematica [Electronic resource]. – Access mode: http://mathematica.stackexchange.com/questions/7414/image-shadow-removal-in-mathematica.
8. Blajovici C. Shadow detection and removal from a single image [Electronic resource] / C. Blajovici, P. J. Kiss, Z. Bonus, L. Varga. – Access mode: http://www.inf.u-szeged.hu/projectdirs/ssip2011/teamF/ShadowRemoval/Documentation/Shadow%20detection%20and%20removal%20from%20a%20single%20image.pdf

9. Suny A. H. A Shadow Detection and Removal from a Single Image Using LAB Color Space/ A. H. Suny, N. H. Mithila // IJCSI International Journal of Computer Science Issues. – 2013. – Vol. 10, № 2. – P. 270–273.
10. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection [Electronic resource] / J. Canny. – Access mode: https://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2016.
Після доробки 28.12.2016.

Сердюк М. Е.[1], Беркут В. Г.[2]
[1]Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, Днепр, Украина
[2]Студент магистратуры кафедры компьютерных технологий Днепропетровского национального университета имени Олеся Гончара, Днепр, Украина

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ЛОКАЛИЗАЦИИ И УДАЛЕНИЯ ТЕНЕЙ В ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Актуальность. Наличие затененных участков на цифровых изображениях может вызывать проблемы в процессах распознавания, отслеживания, классификации объектов. Поэтому выявление и удаление теней является важным этапом предварительной обработки изображений, которая применяется во многих алгоритмах компьютерного зрения.

Цель. Целью работы является поиск эффективных методов автоматического выявления и удаления теней и разработка программной системы, которая реализует соответствующую обработку изображений.

Методы. В работе рассмотрено несколько подходов к процессу выявления и преобразования затененных участков, проанализирована применимость их к теням разных типов. Для локализации теней в работе использован метод с переходом к цветовому пространству *Lab* и метод с предварительным удалением текстуры. Для удаления теней использовано четыре метода: аддитивный, на основе математической модели тени, с переходом к *Lab*-пространству, константный. Предложены модификации некоторых этапов с целью улучшения практических результатов.

Результаты. Разработана компьютерная система, в которой реализовано автоматическое выявление и устранение теней с использованием указанных методов, которые выбираются в зависимости от характера затененных областей. Некоторые параметры методов доступны для настройки. Система протестирована на ряде изображений. Проанализированы качество и скорость работы реализованных методов. Приведены результаты обработки изображений разными методами.

Выводы. Реализованные в представленной компьютерной системе методы локализации и удаления теней с предложенными модификациями эффективно работают на изображениях разных типов. Дополнительная настройка параметров позволяет улучшить результаты в некоторых сложных случаях. Система может быть использована для предварительной обработки изображений с целью предотвращения ошибок в дальнейшей работе алгоритмов компьютерного зрения.

Ключевые слова: выявление тени, удаление тени, обработка изображений, цветовое пространство *Lab*, сегментация, модель тени.

Serdiuk M. E.[1], Berkut V. G.[2]
[1]PhD, Associate Professor, Associate Professor of Computer Technologies Department, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipro, Ukraine
[2]Graduate student of Computer Technologies Department, Oles Honchar Dnipropetrovsk National University, Dnipro, Ukraine

THE COMPUTER SYSTEM OF SHADOW LOCATING AND REMOVAL IN DIGITAL IMAGES

Context. Presence of shaded areas in digital images may cause problems in processes of objects recognition, tracking, classification. Thus shadows identification and removal are important pre-processing stages, which are used in many computer vision algorithms.

Objective. The work objective is to find effective methods for automatic shadow detection and removal and development of a software system that implements the appropriate image processing.

Method. In this paper we have discussed several approaches to the process of identifying and converting shaded areas, analyzed their applicability for different types of shadows. For shadow localization two methods are used: the method with the transition to the *Lab* color space and the method with preliminary removal of texture. For shadow removing four methods are used: additive method, method based on a mathematical model of shadows, method with the transition to the *Lab*-space, constant method. We have proposed some stages modifications to improve the practical results.

Results. Computer system with automatic detection and elimination of shadows, using the above methods, was developed. The choice of methods is carried out depending on the type of shaded areas. Some options of methods are available for configuration. The system was tested on series of images. We have analyzed quality and speed of the implemented methods. Image processing results by different methods are shown.

Conclusions. Implemented in the presented computer system methods of shadow locating and removing with the proposed modifications work effectively in different types of images. Additional settings allow to improve the results in some difficult cases. The system can be used for image pre-processing in order to avoid errors in further work of the computer vision algorithms.

Keywords: shadow detection, shadow removal, image processing, *Lab* color space, segmentation, shadow model.

REFERENCES

1. Deb K., Suny A. H. Shadow Detection and Removal Based on YCbCr Color Space, *Smart Computing Review*, 2014, Vol. 4, No. 1, pp. 23–32.
2. Finlayson G. D., Hordley S. D., Drew M. S. Removing Shadows from Images, *In: Proceedings of 7th European Conference on Computer Vision. Part IV, ECCV'02*. London, UK, Springer-Verlag, 2002, pp. 823–836.
3. Fredembach C., Finlayson G. D., Fredembach C. Simple Shadow Removal, *In: Proceedings of 18th International Conference on Pattern Recognition, ICPR'06. IEEE Computer Society,* 2006, pp. 832–835.
4. Finlayson G. D., Hordley S. D., Lu C., Drew M. S. On the Removal of Shadows from Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* 2006, Vol. 28, No. 1, pp. 59–68.
5. Arbel E., Hel-Or H. Texture-Preserving Shadow Removal in Color Images Containing Curved Surfaces [Electronic resource]. Access mode: http://cs.haifa.ac.il/hagit/papers/CONF/CVPR07_ArbelHelOr-shadowRemoval.pdf.
6. Murali S., Govindan V. K. Shadow Detection and Removal from a Single Image Using LAB Color Space, *Cybernetics and Information Technologies*, 2013, Vol. 13, No. 1, pp. 95–103.
7. Blajovici C., Kiss P. J., Bonus Z., Varga L. Image Shadow Removal in Mathematica [Electronic resource]. Access mode: http://mathematica.stackexchange.com/questions/7414/image-shadow-removal-in-mathematica.
8. Shadow detection and removal from a single image [Electronic resource]. Access mode: http://www.inf.u-szeged.hu/projectdirs/ssip2011/teamF/ShadowRemoval/Documentation/Shadow%20detection%20and%20removal%20from%20a%20single%20image.pdf
9. Suny A. H., Mithila N. H. A Shadow Detection and Removal from a Single Image Using LAB Color Space, *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, 2013, Vol. 10, No. 2, pp. 270–273.
10. Canny J. A Computational Approach to Edge Detection [Electronic resource]. Access mode: https://perso.limsi.fr/vezien/PAPIERS_ACS/canny1986.pdf.

УДК 004.056.53

Трифонова К. О.

Магістр, ст. викладач кафедри інформатики та управління захистом інформаційних систем інституту інформаційної безпеки, радіоелектроніки та телекомунікацій Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ПОРУШЕННЯ ЦІЛІСНОСТІ ЦИФРОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ ШУМОМ ПЕРЛІНА

Актуальність. На сьогоднішній день інформатизація є одним з пріоритетних напрямків розвитку всіх економічних галузей. Процес впровадження нових інформаційних технологій в усі сфери життя суспільства неможливий без вирішення питання інформаційної безпеки. Складовою частиною якого, є розробка методів визначення автентичності цифрових зображень, побудова яких в багатьох областях має визначальне значення. Все це робить тему даної роботи надзвичайно актуальною.

Мета. Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язані наступні задачі. Виконано дослідження параметрів цифрового зображення, наявність або відсутність характерних ознак яких надає можливість встановити порушення цілісності цифрового зображення для поданого способу фальсифікації. Запропоновано використовувати для виявлення фальсифікації наступну форму сингулярних чисел, як параметрів цифрового зображення, що однозначно визначають матрицю цифрового зображення – дискретну функцію швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку. На основі поданої форми параметрів цифрового зображення розроблено спосіб підвищення ефективності метода виявлення фальсифікації.

Метод. У роботі представлено метод виявлення фальсифікації цифрового зображення, розроблений на основі загального підходу, що базується на використанні матричного аналізу, теорії збурень, та надає можливість для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового сигналу. Під фальсифікацією цифрового зображення у роботі розуміється порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

Результати. З метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, проведено розрахунковий експеримент для цифрових зображень, що зберігались без втрат, з визначення помилок першого та другого роду.

Висновки. Наукова новизна роботи полягає в наступному: представлено спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації, в результаті генерації шуму Перліна, на основі застосування замість дискретної функції сингулярних чисел блоку, дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення. Результатом роботи є програмний продукт для виявлення порушення цілісності цифрового зображення, на основі шуму Перліна, що може бути використаний для доповнення комплексної системи виявлення порушення цілісності цифрових зображень.

Ключові слова: цифрове зображення, фальсифікація, шум Перліна, сингулярний розклад.

НОМЕНКЛАТУРА

F – матриця цифрового зображення;

$F_{k,p}$ – блок матриці цифрового зображення;

Σ – діагональна матриця сингулярних чисел матриці зображення;

U – ортогональна матриця лівих сингулярних векторів матриці зображення;

V – ортогональна матриця правих сингулярних векторів матриці зображення;

$\Omega(F_{k,p})$ – дискретна функція сингулярних чисел блоку матриці зображення;

$\overline{\Psi}(F_{k,p})$ – дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку;

$\Psi(F_{k,p})$ – дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку в логарифмічному масштабі;

$\Phi(F_{k,p})$ – дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

ВСТУП

Завдяки значному росту обчислювальної потужності комп'ютерів, останнім часом, та активному розвитку розрахункових методів комп'ютерної графіки, що постійно збагачують інструментарій різних графічних редакторів, задача реалізації реалістичної фальсифікації цифрового зображення стала надзвичайно простою. Отже, задача доказу справжності, виявлення порушення цілісності цифрового зображення, розв'язок якої в багатьох областях життєдіяльності людини, таких як: судова експертиза, медична діагностика, військова розвідка, електронний документообіг та інші, має вирішальне значення, стає складнішою рік від року.

Об'єктом дослідження в роботі виступає процес виявлення порушення цілісності цифрового зображення.

Предметом дослідження є параметри цифрового зображення, що застосовуються для виявлення порушення цілісності цифрового зображення.

Метою даної роботи є підвищення ефективності метода виявлення фальсифікації цифрового зображення. Під фальсифікацією цифрового зображення у роботі розуміється порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В роботі виконується дослідження цифрових зображень, що збережені в форматі без втрат, наступних типів. Перший – цифрові зображення, що містили небо та хмари, отримані сучасними цифровими фотокамерами. Другий – цифрові зображення, що отримані в результаті генерації шуму Перліна для моделювання візуально реалістичного природного явища, хмар та неба. Третій – цифрові зображення, змодельовані при заміщенні частини основного зображення штучною областю, яка отримана в результаті генерації шуму Перліна.

© Трифонова К. О., 2017

DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-15

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати наступні задачі:

1) визначити характерні ознаки параметрів зображення, наявність або відсутність яких надає можливість встановити порушення цілісності цифрового зображення для поданого способу фальсифікації;

2) на основі визначених ознак параметрів цифрового зображення розробити спосіб підвищення ефективності метода виявлення фальсифікації.

З метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, необхідно визначити помилки першого та другого роду.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На даний час, для розв'язку поставленої задачі ведеться активна робота з розробки методів виявлення фальсифікації цифрових зображень [1–4].

Найбільшу увагу приділено дослідженню фальсифікації, що реалізовано за допомогою афінного перетворення переносу, як найбільш простому та найпоширенішому способу фальсифікації [1, 2]. Наступним за поширеністю способом фальсифікації є порушення цілісності цифрового зображення в результаті виконання композиції двох афінних перетворень: переносу та розтягненню [3] або повороту деякої прямокутної області зображення [4].

Одним з найскладніших способів фальсифікації для дослідження та виявлення, вважаються порушення цілісності цифрового зображення, що засновані на моделюванні візуально реалістичних природних явищ, які є невід'ємною частиною практично будь-якої природної сцени: такі об'єкти як хмари та небо.

З точки зору комп'ютерної графіки, хмара представляє собою сукупність значення кольору та прозорості в спостережуваній точці. Прозорість, в свою чергу, безпосередньо визначає існування хмари. Величина прозорості може бути оцінена через величину щільності. Таким чином, завдання моделювання хмари представляє собою задачу визначення аналітичної форми для розрахунку величини щільності в даній точці простору при заданих умовах [5].

На сьогоднішній день запропоновано та реалізовано розмаїття методів моделювання хмар [5–10]. За способом представлення об'єкта, методи моделювання хмар можна класифікувати на дві категорії.

До першої категорії відносять методи моделювання хмар, що розглядають об'єкт з функціональної точки зору.

В роботі [7–9] запропоновано метод моделювання хмар засобами симуляції динаміки газу та рідини в заданому об'ємі, характеризується високою обчислювальною складністю або вимагає великих витрат апаратури для зберігання даних та виконує візуалізацію з низьким рівнем деталізації.

До другої категорії відносять методи моделювання хмар, що розглядають об'єкт з структурної точки зору.

В роботі [10] представлено метод моделювання хмар та хмарного шару за допомогою шаблонів. На основі випадкового розподілу або вручну хмарний шар моделюється з підготовлених шаблонів для різних типів хмар. Основним недоліком такого методу є можливість моделювання обмеженої кількості типів хмар та необхідність застосування сторонніх програм для виконання моделювання.

Одним з найпоширеніших методів моделювання візуально реалістичних хмар, що реалізовані в розповсюджених та загальнодоступних графічних редакторах, є метод заснований на реалізації шуму Перліна.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В [1] на основі теорії збурень та матричного аналізу розроблено загальний підхід, що надає можливість для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового сигналу.

Відповідно до даних основ, запропоновано математичні параметри, що несуть в собі інформацію про стан, а їх збурення – інформацію про зміну стану цифрового сигналу. Різноманітні способи збурення (зокрема, різні способи порушення цілісності) цифрового сигналу призводять до різних характерних збурень математичних параметрів, що сигналізують про відповідний вплив.

Нехай $F=(f_{y,x})$ $R\times C$ матриця, $R\geq C$ з елементами $f_{y,x}$, $y=\overline{1,R}$, $x=\overline{1,C}$. Сингулярний розклад матриці F [11]:

$$F=U\Sigma V^T. \quad (1)$$

Стовпці $u_1,...,u_C$ матриці U називаються лівими сингулярними векторами матриці F. Стовпці $v_1,...,v_C$ матриці V називаються правими сингулярними векторами матриці F. Величини $\sigma_1,...,\sigma_C$ – сингулярними числами. Для $R<C$ будують сингулярний розклад F^T [11].

Сингулярний розклад матриці F у загальному випадку не є єдиним. Відповідно до [12] вектор називають лексикографічно позитивним, якщо його перша ненульова компонента є позитивною. Сингулярний розклад $F=U\Sigma V^T$ називають нормальним, якщо стовпці матриці U лексикографічно позитивні та діагональні елементи матриці Σ знаходяться в не зростаючому порядку. У відповідності до теореми [12] матриця має єдиний нормальний сингулярний розклад, якщо її сингулярні числа попарно різні та відмінні від нуля. Таким чином сингулярні числа та сингулярні вектори, отримані в результаті нормального сингулярного розкладу, однозначна визначають матрицю.

Отже, набір сингулярних векторів та сингулярних чисел, що отримані в результаті нормального сингулярного розкладу матриці цифрового зображення несуть в собі всю інформацію про стан цифрового сигналу [1].

Для розв'язку задачі виявлення порушення цілісності цифрового зображення, що заснована на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, розглянемо наступні форми представлення параметрів матриці цифрового зображення: дискретна функція сингулярних чисел блоку матриці зображення; дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення; дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

Дискретна функція сингулярних чисел блоку $F_{k,p}=(f_{y,x})$, $y=\overline{(k-1)n+1,kn}$, $x=\overline{(p-1)n+1,pn}$,

розміром $n \times n$, матриці зображення $F = (F_{k,p})$, $k = \overline{1, \left[\frac{R}{16}\right]}$, $p = \overline{1, \left[\frac{C}{16}\right]}$, розміром $R \times C$, визначена наступним чином:

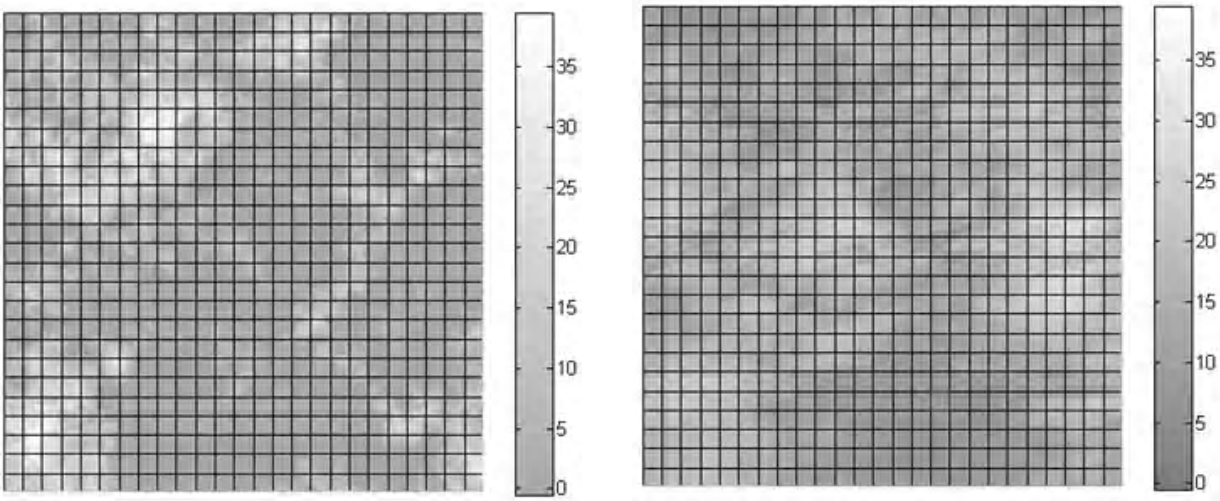
$$\Omega_i(F_{k,p}) = \sigma_i, \quad i = \overline{1, n}. \tag{2}$$

Розглянемо два цифрових зображення. Перше F^P, розміром 400×400, отримано в результаті моделювання візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, за допомогою генерації шуму Перліна (рис. 1а). Друге зображення F^I – цифрова фотографія розміром 400×400, що збережена в форматі без втрат *png* (рис. 1б). Для цифрових зображень побудована сітка, що розділяє матрицю зображення на блоки розміром 16×16. Окремо виділені блоки $F^P_{14,8}$ та $F^I_{21,16}$, що використовуються для подальшої демонстрації результатів дослідження.

Для наведених блоків матриць цифрового зображення (рис. 1) графік дискретної функції сингулярних чисел має наступний вигляд (рис. 2).

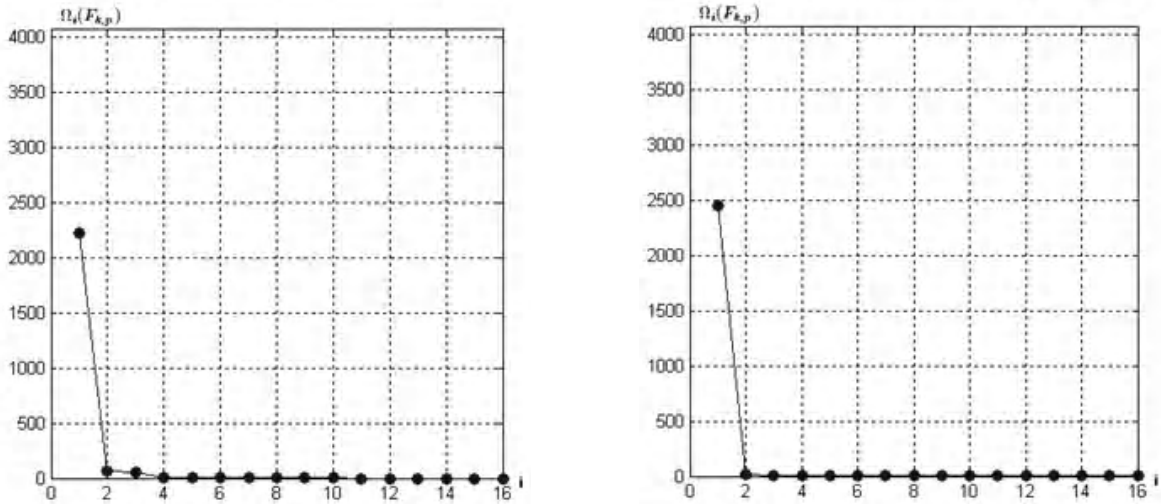
У відповідності до геометричної інтерпретації сингулярного розкладу матриці, сингулярні числа представляють собою довжини півосей еліпсоїду. Відношення найменшої до найбільшої довжини півосей еліпсоїду, тобто відношення найменшого до найбільшого сингулярних чисел визначає число обумовленості матриці, що пов'язано з ексцентриситетом. Таким чином, визначене число обумовленості матриці, представляє ступінь сплющеності еліпсоїду лише відносно одної найменшої півосі.

Поняття числа обумовленості можливо розширити, в результаті дослідження ступеня відхилення кожної півосі від найменшої півосі, для блоку $n \times n$ матриці цифрового зображення.



а б

Рисунок 1 – Дослідження параметрів цифрового зображення а – F^P; б – F^I



а б

Рисунок 2 – Дослідження дискретної функції сингулярних чисел блоку 16×16 матриці зображення а – $F^P_{14,8}$; б – $F^I_{21,16}$

Отже, дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку $F_{k,p}=(f_{y,x})$, $y=\overline{(k-1)n+1,kn}$, $x=\overline{(p-1)n+1,pn}$, розміром $n\times n$, матриці зображення $F=(F_{k,p})$, $k=\overline{1,\left[\frac{R}{16}\right]}$, $p=\overline{1,\left[\frac{C}{16}\right]}$, розміром $R\times C$, визначена наступним чином:

$$\overline{\Psi}_i(F_{k,p})=\frac{\sigma_i}{\sigma_n},\quad i=\overline{1,n}. \tag{3}$$

Для подальшого дослідження використана дискретна функція відношення сингулярних чисел блоку в логарифмічному масштабі:

$$\Psi_i(F_{k,p})=\log_{10}\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_n}\right),\quad i=\overline{1,n}. \tag{4}$$

Так, для блоків матриць зображення (рис. 1а та б) графіки дискретної функції відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення мають наступний вигляд (рис. 3).

Для дослідження швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення визначена похідна функції (4). Оскільки функція дискретна, для виконання чисельного диференціювання, застосовано розділену різницю першого порядку.

Дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку $F_{k,p}=(f_{y,x})$, $y=\overline{(k-1)n+1,kn}$, $x=\overline{(p-1)n+1,pn}$, розміром $n\times n$, матриці зображення $F=(F_{k,p})$, $k=\overline{1,\left[\frac{R}{16}\right]}$, $p=\overline{1,\left[\frac{C}{16}\right]}$, розміром $R\times C$, визначена наступним чином:

$$\Phi_i(F_{k,p})=\frac{\Psi_{i+1}(F_{k,p})-\Psi_i(F_{k,p})}{(i+1)-i},\quad i=\overline{1,n-1}, \tag{5}$$

$$\Phi_i(F_{k,p})=\log_{10}\left(\frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_n}\right)-\log_{10}\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_n}\right),\quad i=\overline{1,n-1}, \tag{6}$$

$$\Phi_i(F_{k,p})=\log_{10}\left(\frac{\sigma_{i+1}}{\sigma_i}\right),\quad i=\overline{1,n-1}. \tag{7}$$

Так, для блоків матриць зображення (рис. 1а та б) графіки дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення мають наступний вигляд (рис. 4).

Таким чином, основні кроки методу виявлення порушення цілісності цифрового зображення шумом Перліна наступні:

а) побудова матриці цифрового зображення $F=(F_{k,p})$, $k=\overline{1,\left[\frac{R}{16}\right]}$, $p=\overline{1,\left[\frac{C}{16}\right]}$, розміром $R\times C$;

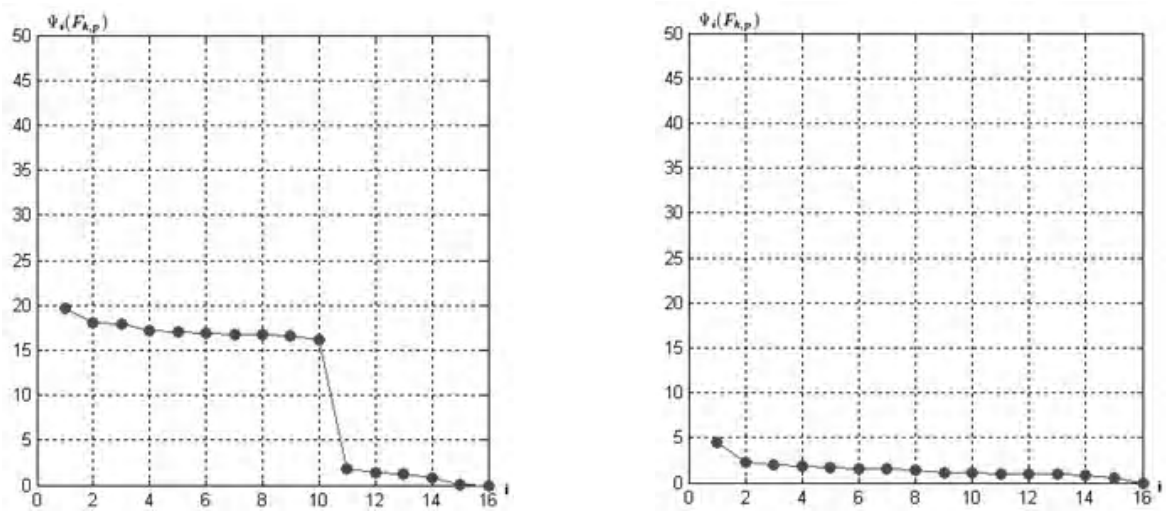
б) розбиття отриманої матриці стандартним чином на блоки розміром 16×16 $F_{k,p}=(f_{y,x})$, $y=\overline{16\cdot(k-1)+1,16\cdot k}$, $x=\overline{16\cdot(p-1)+1,16\cdot p}$;

в) побудова дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел для кожного блоку матриці зображення $\Phi_i(F_{k,p})$, $i=\overline{1,15}$;

г) виділення в матриці зображення блоків, для яких виконується умова:

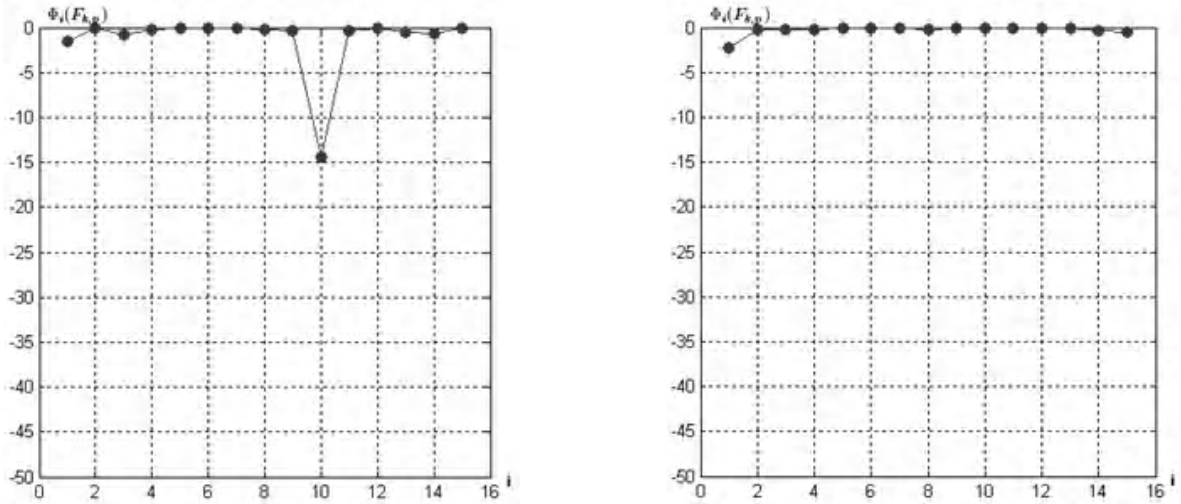
$$\overline{\overline{F}}=\left\{F_{k,p}\,\middle|\,\max_{i=1}^{15}\left(\left|\Phi_i(F_{k,p})\right|\right)>10,k=\overline{1,\left[\frac{R}{16}\right]},p=\overline{1,\left[\frac{C}{16}\right]}\right\}, \tag{8}$$

представляють собою блоки, що є результатом порушення цілісності цифрового зображення.



а б

Рисунок 3 – Дослідження дискретної функції відношення сингулярних чисел блоку 16×16 матриці зображення, що збережено в форматі без втрат а – $F^{P}_{14,8}$; б – $F^{I}_{21,16}$



а б

Рисунок 4 – Дослідження дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку 16×16 матриці зображення, що збережено в форматі без втрат

а – $F^{P}_{14,8}$; б – $F^{I}_{21,16}$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

З метою перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, в результаті розрахункового експерименту виконано тестування 500 цифрових зображень, що зберігались в форматі без втрат.

Помилкою першого роду являється випадок, коли цифрове зображення, що отримано цифровою фотокамерою, вважається цифровим зображенням, отриманим в результаті генерації шуму Перліна.

Помилкою другого роду являється випадок, коли цифрове зображення, що отримано в результаті генерації шуму Перліна, вважається цифровим зображенням, що отримано цифровою фотокамерою.

Розглянемо матрицю цифрового зображення $F^t = (F^t_{k,p})$, $k = \overline{1, \left[\frac{R}{16}\right]}$, $p = \overline{1, \left[\frac{C}{16}\right]}$, $t = \overline{1,500}$, розміром $R \times C$. Для кожного блоку матриці побудована дискретна функція швидкості зміни відношення сингулярних чисел та визначено її найбільше значення $\max\limits_{i=1}^{15}\left(\left|\Phi_i(F^t_{k,p})\right|\right)$, $k = \overline{1, \left[\frac{R}{16}\right]}$, $p = \overline{1, \left[\frac{C}{16}\right]}$. Серед усіх найбільших за модулем значень дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел для всього цифрового зображення визначено найменше значення наступним чином:

$$Z^t_{\min} = \min_{k=1,p=1}^{\left[\frac{R}{16}\right],\left[\frac{C}{16}\right]}\left(\max_{i=1}^{15}\left(\left|\Phi_i\left(F^t_{k,p}\right)\right|\right)\right). \qquad (9)$$

Для розрахункового експерименту побудована координатна площина, вісь абсцис – $t = \overline{1,500}$, номер цифрового зображення, вісь ординат – $Z^t_{\min}$, що отримано за допомогою (9). Кожне зображення на площині представлено точкою з координатами $\left(t, Z^t_{\min}\right)$.

Точки квадратної форми відповідають цифровим зображенням, отриманим в результаті генерації шуму Перліна, точки круглої форми – цифрові зображення отримані цифровою фотокамерою (рис. 5). Отже, в результаті розрахункового експерименту встановлено, що помилки першого та другого роду склали 2%.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На основі отриманих результатів дослідження форм представлення параметрів цифрового зображення, що однозначно визначають цифровий сигнал, – сингулярних чисел, розглянемо метод виявлення фальсифікації, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна.

Розглянемо цифрові зображення неба та хмар, що отримані сучасними цифровими фотокамерами. Нехай частина основного зображення (ОЗ), замінюється штучною областю, яка отримана в результаті генерації шуму Перліна (ЗО) (для більшої наочності одержуваних нижче висновків ніяка подальша обробка зображення не виконується).

Таким чином побудоване цифрове зображення, приклад якого на основі зображення (рис. 6а), демонструє порушення цілісності цифрового зображення, представлено на (рис. 6б) зберігається без втрат.

Графіки дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриць ОЗ та зображення, що містить ЗО, наочно демонструють під області порушення цілісності даного типу (рис. 6д,е).

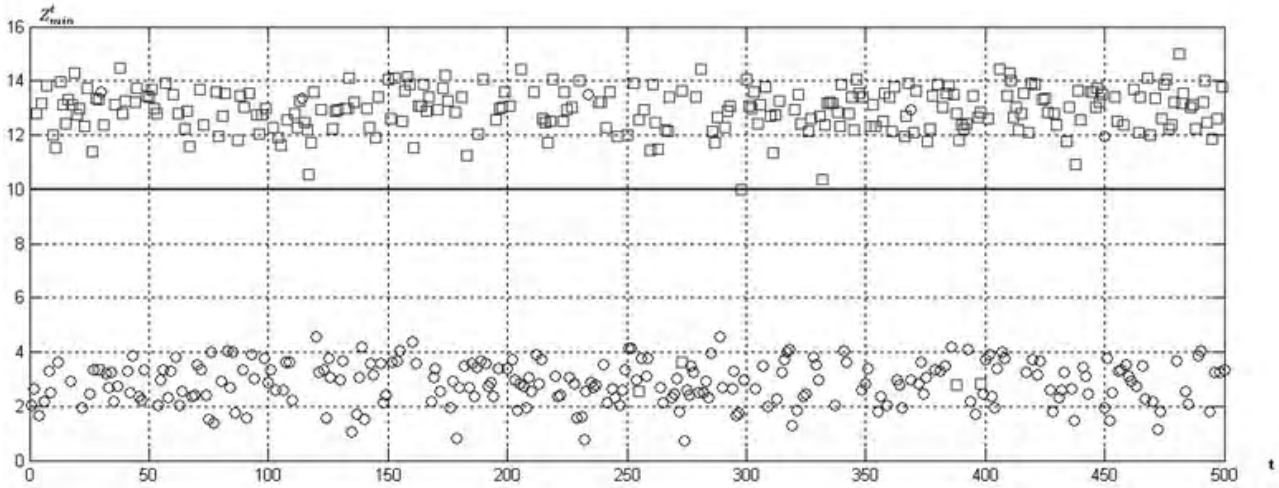


Рисунок 5 – Відображення цифрових зображень, отриманих цифровою фотокамерою та в результаті генерації шуму Перліна на координатній площині залежності t від $Z^t_{\min}$

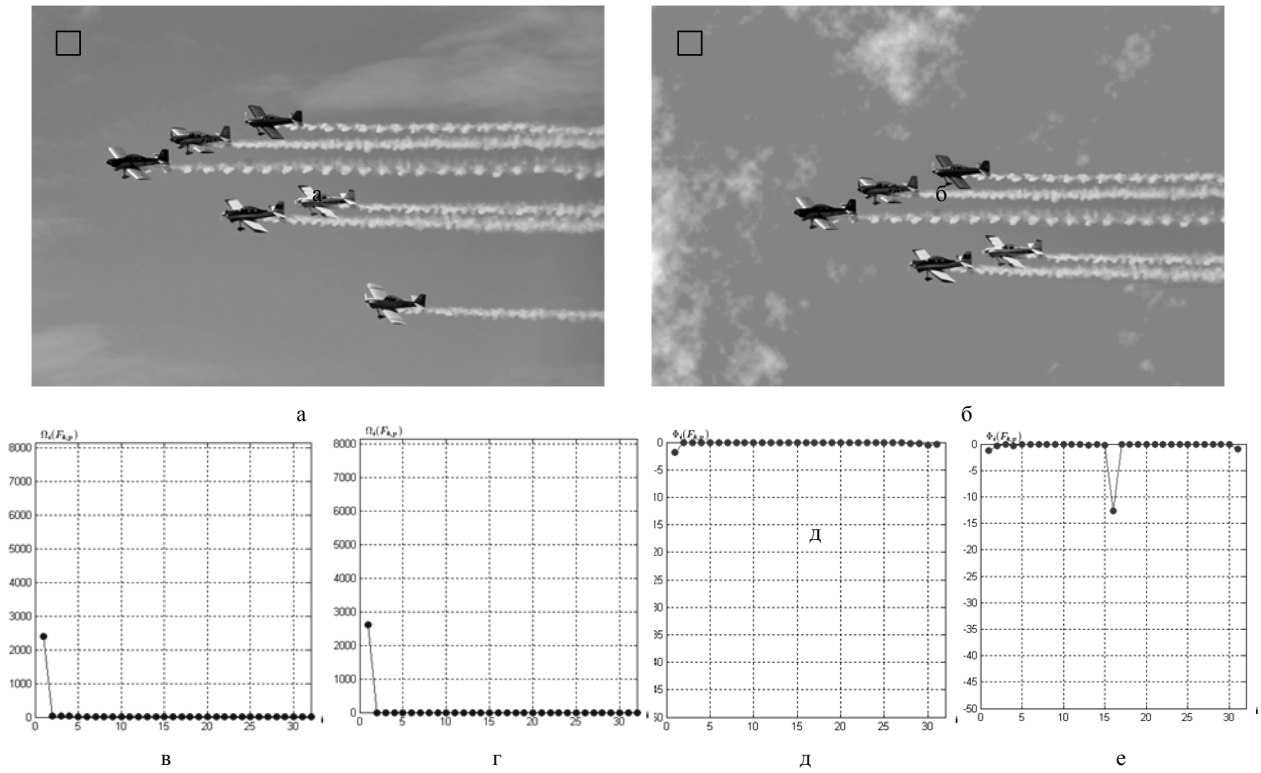


Рисунок 6 – Приклад порушення цілісності цифрового зображення результаті генерації шуму Перліна:

а – ОЗ F^I; б – ОЗ з ЗО F^P; в – $\Omega(F^I_{2,2})$; г – $\Omega(F^P_{2,2})$; д – $\Phi(F^I_{2,2})$; е – $\Phi(F^P_{2,2})$

6 ОБГОВОРЕННЯ

Таким чином, спосіб підвищення ефективності методу виявлення фальсифікації, що заснована на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, представляє собою використання замість дискретної функції сингулярних чисел блоку, дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел блоку матриці зображення.

ВИСНОВКИ

В результаті даної роботи для підвищення ефективності метода виявлення фальсифікації цифрового зображення, на основі порушення цілісності цифрового зображення, що засновано на моделюванні візуально реалістичного природного явища, хмар та неба, в результаті генерації шуму Перліна, запропоновано використовувати нову форму представлення параметрів цифрового зображення.

На основі дискретної функції швидкості зміни відношення сингулярних чисел представлено основні кроки методу виявлення фальсифікації цифрового зображення розглянутого типу.

В результаті перевірки ефективності модифікованого методу виявлення фальсифікації, розрахунковий експеримент визначив, що на основі запропонованої форми сингулярних чисел блоку матриці, для визначення порушення цілісності цифрового зображення, помилки першого та другого роду складають по 1%.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної тематики кафедри «Інформатики та управління захистом інформаційних систем» Одеського національного політехнічного університету «Розробка методів підвищення ефективності комплексної системи захисту інформації» (№ держреєстрації 0115U000834).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобозева А. А. Матричный анализ – основа общего подхода обнаружения фальсификации цифрового сигнала / А. А. Кобозева, О. В. Рыбальский, Е. А. Трифонова // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2008. – №8 (126),Частина1. – С. 62–72.
2. Трифонова К. О. Підвищення ефективності методу виявлення несанкціонованого втручання «copyraste» в цифрове зображення / К. О. Трифонова // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Автоматика, вимірювання та керування». – 2012. – №741. – С. 227–230.
3. Трифонова Е. А. Метод идентификации и локализации масштабирования в цифровом изображении / Е. А. Трифонова // Информатика и математические методы в моделировании. – 2013. – № 1. – С. 22–34.
4. Трифонова К.О. Адаптація інваріантних до афінних перетворень моментів цифрового зображення для виявлення фальсифікації / К. О. Трифонова, В. В. Мурова // Тези доповідей V міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні управляючі системи та технології». – Одеса. – 20–22 вересня 2016р. – С. 40–41.
5. Подлесный В. В. Метод процедурного моделирования облаков различных типов для авиационного тренажера / В. В. Подлесный // Труды СПИИРАН. – 2013. – №5 (28). – С. 230–238.
6. Подлесный В. В. Выбор метода моделирования облаков для авиационных тренажеров / В. В. Подлесный // МГТУ ГА: Научный Вестник. – 2012. – № 177. – С. 105–111.
7. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware / [M. Harris, W. Baxter, T. Scheuermann, A. Lastra] // Proceedings of Graphics Hardware. – 2003. – P. 92–101.
8. Harris M. Physically-based visual simulation on graphics hardware / M. Harris, G. Coombe, T. Scheuermann, A. Lastra // Proceedings of Graphics Hardware. – 2002. – P. 1–10.
9. Harris M. Real-time cloud rendering / M. Harris, A. Lastra // Proceedings of Eurographics. – 2001. – Vol. 20, № 3. – P. 76–84.
10. Wang N. Realistic and fast cloud rendering / N. Wang // Proceeding Siggraph'03 Acm Siggraph 2003 Sketches & Applications. – 2003. – P. 1–17.
11. Деммель Дж. Вычислительная линейная алгебра. Теория и приложения / Дж. Деммель. – М. : Мир, 2001. – 430 с.
12. Bergman C. Unitary Embedding for Data Hiding with the SVD / C. Bergman, J. Davidson // Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII, SPIE. – 2005. – Vol. 5681. – P. 619–630.

Стаття надійшла до редакції 18.12.2017.

Після доробки 29.12.2017.

Трифонова Е. А.

Магистр, ст. преподаватель кафедры информатики и управления защитой информационных систем института информационной безопасности, радиоэлектроники и телекоммуникаций Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина

МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НАРУШЕНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ШУМОМ ПЕРЛИНА

Актуальность. На сегодняшний день информатизация является одним из приоритетных направлений развития всех экономических отраслей. Процесс внедрения новых информационных технологий во все сферы жизни общества невозможен без решения вопроса информационной безопасности. Составной частью которого является разработка методов определения подлинности цифровых изображений, построение которых во многих областях имеет определяющее значение. Все это делает тему данной работы чрезвычайно актуальной.

Цель. Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи. Выполнено исследование параметров цифрового изображения, наличие или отсутствие характерных признаков которых позволяет установить нарушения целостности цифрового изображения для представленного способа фальсификации. Предложено использовать для выявления фальсификации следующую форму сингулярных чисел, в качестве параметров цифрового изображения, которые однозначно определяют матрицу цифрового изображения – дискретную функцию скорости изменения отношения сингулярных чисел блока. На основании представленной формы параметров цифрового изображения разработан способ повышения эффективности метода обнаружения фальсификации.

Метод. В работе представлен метод обнаружения фальсификации цифрового изображения, разработанный на основании общего подхода, который базируется на использовании матричного анализа, теории возмущений, и предоставляет возможность для решения задачи обнаружения нарушения целостности цифрового сигнала. Под фальсификацией цифрового изображения в работе понимается нарушение целостности цифрового изображения, которое основано на моделировании визуально реалистического природного явления, облаков и неба, в результате генерации шума Перлина.

Результаты. С целью проверки эффективности модифицированного метода выявления фальсификации, проведен вычислительный эксперимент для цифровых изображений, которые хранились без потерь, по определению ошибок первого и второго рода.

Выводы. Научная новизна работы заключается в следующем: представлено способ повышения эффективности метода обнаружения фальсификации, в результате генерации шума Перлина, на основе применения вместо дискретной функции сингулярных чисел блока, дискретной функции скорости изменения отношения сингулярных чисел блока матрицы изображения. Результатом работы является программный продукт для выявления нарушения целостности цифрового изображения, на основе шума Перлина, который может быть использован для дополнения комплексной системы выявления нарушения целостности цифровых изображений.

Ключевые слова: цифровое изображение, фальсификация, шум Перлина, сингулярное разложение.

Tryfonova K. O.
Master of Science, Senior Lecturer, Department of Computer Science and Management Information Systems Protection, Information Security Institute of Radio Electronics and Telecommunications, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

METHOD OF DETECTION INTEGRITY VIOLATIONS OF DIGITAL IMAGE BY PERLIN NOISE

Context. Today informatization is one of the priority directions of economic sectors development. Introduction process of new information technologies in all society spheres is impossible without solving the problem of information security. An integral part of which is the development of methods for determining the authenticity of digital images, the construction of which in many areas is crucial. All this makes the topic of this work is extremely important.

Objective. To achieve the goal the following tasks are solved. Performed the research of digital image parameters, the presence or absence of the characteristic features of which allows to establish integrity violations of the digital image for the present forgery type. It is proposed to use for forgery detection ensuing form of singular values, as a digital image parameters, that uniquely define a matrix of digital image – a discrete function of the speed change ratio of block singular values. Based on developed form digital image parameters, was architected a way of increasing the efficiency of forgery detection method.

Method. This paper presents a method for forgery detection of the digital image, developed on the basis of a common approach, which is use matrix analysis, perturbation theory, and provides an opportunity to solve the problem of detection integrity violations of the digital signal. Under the digital image forgery in the work refers to a integrity violation of the digital image, which is based on realistic visual simulation of natural phenomena, clouds and sky, as a result of Perlin noise generation.

Results. In order to test the effectiveness of the modified forgery detection method, computational experiments performed for digital images that are stored without losses, to determine errors of the first and second type.

Conclusions. The scientific novelty of the work is as follows: presented method of increasing the efficiency of the method of falsification detection, resulting in the generation of Perlin noise, based on the application instead of a discrete function of singular values of the block, a discrete function rate of change of the relationship matrix of singular values of image block. The result of work is a program product for detecting violation of the integrity of the digital image, based on Perlin noise, which can be used to supplement the complex detection systems integrity violation of the digital image.

Keywords: digital image, forgery, Perlin noise, singular decomposition.

REFERENCES

1. Kobozeva A. A., Ry'bal'skij O. V., Trifonova E. A. Matrichny'j analiz – osnova obshhego podxoda obnaruzheniya fal'sifikacii cifrovogo signala, *Visnik Sxidnoukraïns'kogo nacional'nogo universitetu im. V. Dalya*, 2008, No. 8(126), Chastina1, pp. 62–72.
2. Trifonova K. O. Pidvishhennya efektivnosti metodu viyavlennya nesankcionovanogo vtruchannya «copypaste» v cifrove zobrazhennya, *Visnik Nacional'nogo universitetu «L'vivs'ka politexnika» «Avtomatika, vimiryuvannya ta keruvannya»*, 2012, No. 741, pp. 227–230.
3. Trifonova E. A. Metod identifikacii i lokalizacii masshtabirovaniya v cifrovom izobrazhenii, *Informatika i matematicheskie metody' v modelirovanii*, 2013, No. 1, pp. 22–34.
4. Trifonova K. O., Murova V. V. Adaptaciya invariantnix do afinnix peretvoren' momentiv cifrovogo zobrazhennya dlya viyavlennya fal'sifikacïï, *Tezi dopovidej V mizhnarodnoï naukovo-praktichnoï konferencïï «Informacijni upravlyayuchi sistemi ta texnologiï»*. Odesa, 20–22 veresnya 2016 r, pp. 40–41.
5. Podlesny'j V.V. Metod procedurnogo modelirovaniya oblakov razlichny'x tipov dlya aviacionnogo trenazhera, *Trudy' SPIIRAN*, 2013, No. 5(28), pp. 230–238.
6. Podlesny'j V. V. Vy'bor metoda modelirovaniya oblakov dlya aviacionny'x trenazherov, *MGTU GA: Nauchny'j Vestnik*, 2012, No. 177, pp. 105–111.
7. Harris M., Baxter W., Scheuermann T., Lastra A. Simulation of cloud dynamics on graphics hardware, Proceedings of Graphics Hardware, 2003, pp. 92–101.
8. Harris M., Coombe G., Scheuermann T., Lastra A. Physically-based visual simulation on graphics hardware, *Proceedings of Graphics Hardware*, 2002, pp. 1–10.
9. Harris M., Lastra A. Real-time cloud rendering, *Proceedings of Eurographics*, 2001, Vol. 20, No. 3, pp. 76–84.
10. Wang, N. Realistic and fast cloud rendering, *Proceeding Siggraph'03 Acm Siggraph 2003 Sketches & Applications*, 2003, pp. 1–17.
11. Demmel', Dzh. Vy'chislitel'naya linejnaya algebra. Teoriya i prilozheniya. Moscow, Mir, 2001, 430 p.
12. Bergman S., Davidson J. Unitary Embedding for Data Hiding with the SVD, *Security, Steganography, and Watermarking of Multimedia Contents VII, SPIE,* 2005, Vol.5681, pp. 619–630.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 519.8: 005.31

Гусев В. Б.

Канд. физ.-мат. наук, зав. лабораторией, Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, г. Москва, Российская Федерация

АНАЛИЗ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ И РЕФЛЕКСИВНЫХ ПРОЦЕДУР ВЫВОДА

Актуальность. При принятии решений достаточно распространена ситуация, когда сложные объекты управления функционируют в условиях неопределенности и характеризуются наличием нескольких критериев выбора, а также наличием параметров, плохо поддающихся измерению или имеющих качественный характер. В таких ситуациях для получения оценок и принятия решений разумно применять экспертные подходы. Это в свою очередь требует разработки специальных методов формализации рассматриваемых объектов и систем управления, а также соответствующих процедур численной обработки экспертных данных.

Цель. Целью работы является разработка процедур расчета оценок для последствий взаимодействия факторов управления на основе экспертных данных и метода выбора рациональных решений при наличии нескольких критериев.

Метод. Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры многозначного логического вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимного влияния факторов и метод принятия решений на основе сбалансированного учета нескольких критериев.

Результаты. Предложенный метод принятия решений включает две составляющие: процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора. В ситуации двухкритериальности введен гибкий критерий, формирование которого основано на балансировке (учете степени важности) максиминного и минимаксного значений исходных критериев и на использовании релевантного подмножества учитываемых факторов. В качестве примера приведен расчет рационального выбора структуры нематериальных активов предприятия.

Выводы. Специфика рассмотренного подхода, обладающего принципиальной новизной, заключается в учете неопределенности, заключенной, как в свойствах экспертных данных, так и в наличии нескольких критериев выбора. Применение алгебры многозначной логики в процедуре рефлексий позволяет наиболее адекватно учитывать экспертные данные при оценивании вариантов принятия управленческих решений. Гибкий критерий является атрибутом самоорганизации управляемой системы. Разработанный метод экспертного анализа факторов управления, учитывающий последствия их взаимодействия, позволяет оценивать и выделять наиболее значимые факторы с точки зрения заданных критериев, принимать рациональные решения как для оперативного реагирования на сложившуюся ситуацию, так и при долгосрочном и стратегическом планировании. Численный пример представляет информативную демонстрацию эффективности предложенного подхода.

Ключевые слова: экспертные данные, многозначный логический вывод, оценки взаимного влияния факторов, транзитивное замыкание, управление нематериальными активами предприятия.

НОМЕНКЛАТУРА

C – группа критериев;

i – индекс критерия, $i \in C$;

M – множество факторов;

U – управляющая группа факторов, $U \subset M$;

$r \in U$ – стратегия выбора управления, $r \in U$;

$fi(r)$ – критерий i для стратегии r;

$\Delta yj(r), j \in [M]$ – оценки факторов для стратегии r;

$sij, i \in C; j \in [M]$ – веса линейной свертки оценок;

U^l – множество стратегий r, включающих l факторов из множества U;

$U1^l$ – множество стратегий, для которых реализуется максимум 1-го критерия, $U1^l = \arg\max_{r \in U^l} f1(r)$;

$U12^l$ – часть множества парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 1-й критерий, $U12^l = \arg\min_{r \in U1^l} f2(r)$;

© Гусев В. Б., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-16

U_{21}^{l} – часть множества парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 2-й критерий, $U_{21}^{l} = \arg\max_{r \in U_2^l} f_1(r)$;

$f_1^{\max}$ – экстремальное значение критерия $f_1(r)$ в задаче $\max_{r \in U^l} f_1(r)$;

$f_2^{\max}$ – экстремальное значение критерия $f_2(r)$ в задаче $\min_{r \in U_1^l} f_2(r)$;

$\hat{f}(r)$ – критерий для смешанной стратегии;

α – относительная частота решений U_{21}^{l} по отношению к решениям U_{12}^{l};

$\mathbf{A}$ – экспертная матрица с коэффициентами a_{ij};

$\mathbf{x}$ – вектор оценок состояния;

$\oplus$ – логическая сумма;

$\otimes$ – логическое произведение;

$\Delta\bar{\mathbf{x}}$ – транзитивное замыкание оценок взаимодействия.

ВВЕДЕНИЕ

Действие одних факторов на другие затрагивает различные аспекты. В результате сложения эффекта от всех цепочек воздействий, исходящих от каждого фактора-причины и заканчивающихся факторами-следствиями, формируется системный эффект, определяемый полной совокупностью возникающих косвенных связей.

При принятии решений можно выбирать интерпретацию применяемых числовых данных, как оценки интенсивности взаимодействия факторов. Конкретный аспект взаимодействия обладает своей спецификой и требует соответствующего математического аппарата.

Отличительной чертой экспертного подхода является включение в анализ набора факторов, достаточно полно определяющих причинно-следственные связи рассматриваемого объекта. Используемые данные основываются на мнении экспертов и могут не иметь отражения в официальной статистике, дополняя их для целей анализа. Получаемые в результате анализа полные оценки степени взаимовлияний факторов можно использовать при сравнении различных сценариев развития с целью выбора управляющих воздействий при долгосрочном планировании.

Целью работы является разработка метода формирования критериев выбора рациональных решений в условиях неопределенности, основанных на оценках взаимодействия управляемых и управляющих факторов, а также разработка процедур расчета соответствующих оценок. Предметом рассмотрения является метод экспертного анализа, использующий рефлексивные процедуры многозначного логического вывода для получения транзитивного замыкания оценок взаимного влияния факторов. В качестве примера приведен расчет рационального выбора структуры нематериальных активов предприятия.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Схема примитивных (прямых) взаимодействий факторов представляется экспертной матрицей $\mathbf{A}$. Коэффициент a_{ij} этой матрицы означает оценку сверху первичного прироста фактора i, вызываемого приращением фактора j (аналог пропускной способности канала, направленного от фактора j к фактору i). Задачей анализа транзитивного замыкания взаимодействий из рассматриваемой совокупности факторов является расчет оценок полного взаимовлияния факторов, учитывающих как прямые, так и косвенные воздействия, а также получение выводов об эффективности механизмов управления с точки зрения их воздействия на целевые показатели с индексами $i \in C$. Исходный этап анализа – подготовка экспертных данных, представляющих первичные оценки степени взаимовлияния рассматриваемых факторов друг на друга. Результат анализа – полные оценки степени взаимовлияний факторов, учитывающие расширенный набор цепочек трансакций. Применяемые в модели оценки представляются в баллах и интерпретируются как значения истинности в многозначной логике. Для операций над оценками используются соответствующие действия многозначной логики.

В процедуре поиска управляющих решений рассматриваются несколько критериев с индексами $i \in C$, а среди факторов множества M выделяется управляющая группа $U \subset M$. Будем обозначать $[M]$ множество индексов, соответствующих элементам M. Пусть значения критериев $f_i(r), r \in U$ рассчитываются как линейная свертка оценок факторов $\Delta y_j, j \in [M]$ с заданными весами $s_{ij}, i \in C; j \in [M]$

$$f_i(r) = \sum_{j \in [M]} \Delta y_j(r) \cdot s_{ij}.$$

Для критериев группы C ищется множество стратегий (векторов приращений оценок факторов), обладающих экстремальными свойствами на множестве значений факторов управляющей группы U.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Принятие решений при управлении сложными объектами требует учета большого числа одновременно действующих факторов. Поскольку исчерпывающий количественный анализ всего действующего набора этих факторов весьма затруднителен, имеет смысл исследовать их системное влияние на качественном уровне с применением моделей причинно-следственных влияний и методов сценарного анализа [1, 2]. Исходная система взаимных влияний в результате рефлексивного наложения всех косвенных воздействий формирует систему полных влияний как их транзитивное замыкание [3].

Результаты рефлексий оценок взаимодействий могут быть использованы в качестве подсказок при рациональном выборе набора управляющих факторов и принятии решений в ситуации, когда требуется учитывать значения более одного критерия [4, 5]. При этом, по аналогии

с матричными играми [6, 7], приходится применять идею смешанных стратегий [8]. Если применить принцип равноважности критериев, то в работе показано, что можно перейти к одному взвешенному критерию, структура которого (набор управляющих факторов) зависит от исходных данных.

Свойство гибкости критерия присуще саморазвивающимся системам [9]. Понятия саморазвития, самоорганизации привлекают внимание известных исследователей [10]. К саморазвивающимся системам относятся также социально-экономические и организационные системы [11]. Яркими примерами нестабильных саморазвивающихся систем с автономным управлением являются национальная и мировая экономические системы, демонстрирующие циклический характер развития, плохо предсказуемые спады и кризисы. Тем не менее, в условиях изменяющейся (возможно дестабилизирующей поведение системы) внешней среды саморазвивающиеся системы могут обладать потенцией поддерживать в течение определенного времени установившийся режим функционирования. Последнее обеспечивается внутренними механизмами выбора, как управляющих воздействий, так и критериев принятия решений в соответствии с состоянием самой системы и внешней среды [6].

В качестве примера применения метода анализа рассматривается выбор на уровне национальной экономической системы ведущих факторов управления нематериальными активами. Нематериальные активы (НМА) играют все большую роль в развитии экономики, основанном на инновациях, высоких технологиях, интеллектуальном багаже. Обычно к НМА предприятия причисляют типы активов, представляющие собой долгосрочные вложения в приобретение прав на имущество и не имеющее материальной формы, но приносящее предприятию доход [12, 13].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Предлагаемый метод включает процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора.

Рассмотрим ситуацию с двумя критериями $C = \{1,2\}$. При этом, по критерию 1 (например, доходу) мы ищем максимум, а по критерию 2 (затратам) – минимум. Обозначим U^l – множество стратегий r, включающие l факторов из множества U. Определим две группы стратегий, согласно которым будет вычисляться экстремум: минимаксную (гарантированный доход) и максиминную (неизбежные потери).

Стратегия 1. Обозначим для минимаксной задачи $U1^l = \arg\max_{r \in U^l} f1(r)$ – множество стратегий, для которых реализуется максимум 1-го критерия, $U12^l = \arg\min_{r \in U1^l} f2(r)$ – часть множества Парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 1-й критерий. Обозначим экстремальные значения критериев в этой задаче $f1^{\max} = \max_{r \in U^l} f1(r)$ и $f2^{\max} = \min_{r \in U1^l} f2(r)$.

Стратегия 2. Аналогично для максиминной задачи $U2^l = \arg\min_{r \in U^l} f2(r)$ – множество стратегий, для которых реализуется минимум 2-го критерия, $U21^l = \arg\max_{r \in U2^l} f1(r)$ – часть множества Парето для 2-х-критериальной задачи, где приоритетным является 2-й критерий. Обозначим экстремальные значения критериев в этой задаче $f2^{\min} = \min_{r \in U^l} f2(r)$ и $f1^{\min} = \max_{r \in U2^l} f1(r)$.

Смешанная стратегия. Выбор управляющего решения должен учитывать результаты двух рассмотренных стратегий. Для этого можно использовать смешанную стратегию, ориентированную на чистый эффект от выбора управляющего решения. Поскольку критерии инвариантны относительно выбора масштабного коэффициента для весов $sij, i \in C; j \in [M]$, смешанную стратегию

$$\hat{f}(r) = f1(r) + \alpha \cdot f2(r)$$

будем определять по принципу равновесия гарантированного дохода и неизбежных потерь

$$\hat{f}(U12^l) = \hat{f}(U21^l),$$

то есть

$$f1(U12^l) + \alpha \cdot f2(U12^l) = f1(U21^l) + \alpha \cdot f2(U21^l),$$

откуда

$$\alpha = (f1(U12^l) - f1(U21^l))/(f2(U21^l) - f2(U12^l))$$

или

$$\alpha = (f1^{\min} - f1^{\max})/(f2^{\max} - f2^{\min}).$$

Если $f2^{\max} \neq f2^{\min}$.

Если $f2^{\max} = f2^{\min}$, тогда $\hat{f}(r) = f2(r)$.

Если $f1^{\max} = f1^{\min}$, тогда $\hat{f}(r) = f1(r)$.

Здесь весовой коэффициент α трактуется как относительная частота решений $U21^l$ по отношению к решениям $U12^l$. Таким образом, критериальная функция смешанной стратегии $\hat{f}(r)$ зависит от количества факторов l, определяющего выбор конфигурации решающего правила, а решение и значение критерия определяются также количеством факторов l. Следовательно, при использовании смешанной стратегии необходимо получить оптимальные значения критерия при различных l и выбрать то, которое соответствует максимальному значению критерия. Смешанная стратегия позволяет сформировать критерий, отвечающий актуальным, краткосрочным целям развития и выделить группу факторов, наиболее соответствующих этому критерию.

Для формирования обобщающего критерия, соответствующего долгосрочным целям, может быть использован метод нелинейной свертки частных критериев на основе экспертных данных (комплексного оценивания [5]).

В процедуре рефлексий с логическим выводом при оценивании результатов взаимного влияния факторов рассматриваемым факторам могут быть приписаны численные значения показателей (оценки) состояния x_i. Прирост факторов, определяемый непосредственным действием действующих механизмов, будем характеризовать как результат примитивных взаимодействий. Наблюдаемые результаты взаимодействий факторов (полные взаимодействия) определяются как примитивными, так и косвенными влияниями. Примитивные влияния могут отличаться по степени (интенсивности) и характеру действия. Последний определяется свойствами группового воздействия: независимым или совместным. При групповом воздействии его результат оценивается по свертке оценок влияния компонент группы.

Оценки интенсивности и надежности (риска) взаимодействия могут представляться в балльной шкале. Значения коэффициентов a_{ij} матрицы примитивных взаимодействий **A**, назначаемые экспертным способом, находятся в интервале от $a_{\min}$ до $a_{\max}$. Знаки коэффициентов определяются характером влияния – положительным или отрицательным. Для обозначения совместного воздействия факторов кроме численного значения используются символы групп влияния.

Операции над оценками (компонентами вектора оценок состояния $\mathbf{x}$ и матрицы **A**) следующие: логическая сумма $\oplus$ (аналог конъюнкции, или логической суммы в булевой алгебре), логическое произведение $\otimes$ (аналог дизъюнкции, или логического произведения в булевой алгебре).

Результат однократного воздействия факторов переводит приращение $\Delta\mathbf{x}$ их начального вектора состояния $\mathbf{x}$ в состояние $\mathbf{y} \oplus \Delta\mathbf{y}$, определяемое как действие логической векторной операции

$$\Delta\mathbf{y} = \mathbf{A} \otimes \Delta\mathbf{x}, \qquad (1)$$

где знаком $\otimes$ обозначена векторная операция логического умножения матрицы на вектор.

Свойствами операций многозначной логики обладают следующие правила. Результат независимого примитивного воздействия фактора j на фактор i представляется формулой логического умножения

$$y_{ij} = a_{ij} \otimes \Delta x_j = \min(|a_{ij}|,\ |\Delta x_j|)\ \mathrm{sign}(a_{ij}\,\Delta x_j).$$

Результат совместного взаимно дополнительного (комплементарного) воздействия группы факторов g, когда для результата требуется воздействие всех факторов группы, представляется формулой

$$\Delta y_{ig} = \min_j\{|\Delta y_{ij}|\}\ \mathrm{sign}(\prod_j \Delta y_{ij}),\ j \in g.$$

Для обозначения совместного воздействия факторов кроме численного значения используется символ группы влияния.

Результат взаимно компенсирующего (субституционального) воздействия факторов j и k на фактор i, когда для результата достаточно любого из действующих факторов, представляется формулой логической суммы

$$\Delta y_{ij} \oplus \Delta y_{ik} = \max(|\Delta y_{ij}|, |\Delta y_{ik}|)\ \mathrm{sign}(\Delta y_{ij} + \Delta y_{ik} \pm \varepsilon),$$

где $0 < \varepsilon < 1$ – добавка, позволяющая оценить разброс результатов в результате вычислительной неоднозначности операции sign.

Будем считать, что номенклатура компонент векторов $\mathbf{x}$ и $\mathbf{y}$ совпадают (матрица $\mathbf{A}$ квадратная). Тогда итеративное применение операции (1) отражает изменение состояния в модельном времени. Для расчета транзитивного замыкания оценок взаимодействия $\Delta\overline{\mathbf{x}}$ можно использовать итеративную процедуру, использующую операцию (1) при замене $\Delta\mathbf{y}$ на $\Delta\mathbf{x}$.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Приведем рассматриваемый перечень факторов малого предприятия, взаимовлияние которых мы будем рассматривать.

1. Бренды.
2. Знания.
3. Технологии.
4. Образование.
5. Предпринимательская активность.
6. Климат благоприятствования НТП.
7. Экспорт и импорт услуг.
8. Международные ценные бумаги.
9. Лицензии на осуществление вида деятельности.
10. Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций.
11. Цена фирмы.
12. Права пользования природными ресурсами.
13. Лицензии на использование опыта специалистов.
14. Расходы на НИОКР.
15. Обучение специалистов.
16. Реклама.
17. Патенты.

Экспертную оценку прямого взаимного влияния факторов представляем в виде таблицы с экспертными оценками a_{ij}, где значения оценок лежат в интервале от 0 до 10. Оценки, имеющие совпадающий буквенный индекс, являются комплиментами.

Заметим, что оказывать влияние мы можем лишь на часть факторов, поэтому составим список факторов, которые возможно изменить. Это 12 факторов: Бренды, Знания, Технологии, Образование, Предпринимательская активность, Экспорт и импорт услуг, Лицензии на осуществление вида деятельности, Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций, Лицензии на использование опыта специалистов, Расходы на НИОКР, Обучение специалистов, Реклама и Патенты.

Среди этих факторов будем искать те, изменение которых повлечет наилучший результат. В качестве оценки наилучшего результата будем считать значения для оценки затрат на осуществление данного результата и капитализации, получаемой в результате. Для этого составим экспертные оценки стоимости и прибыли в зависимости от каждого фактора. Будем получать значения для этих критериев путем произведения выходного вектора на вектор оценки.

Таблица 1 – Матрица оценок прямых зависимостей факторов друг от друга

Факторы \ №№	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**
1. Бренды.		4	6								5					5	
2. Знания.				7									3		5		
3. Технологии.		4		5								3		4	3		
4. Образование.															7		
5. Предпринимательская активность.						6	3		4								
6. Климат благоприятствования НТП.													5				
7. Экспорт и импорт услуг.					7			3	4	5							6
8. Международные ценные бумаги.										8							
9. Лицензии на осуществление вида деятельности.	8a				6a												7
10. Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций.					5b		6b										
11. Цена фирмы.	7						6										8
12. Права пользования природными ресурсами.					4												
13. Лицензии на использование опыта специалистов.					6c												8c
14. Расходы на НИОКР.						7d									6d		
15. Обучение специалистов.						5											
16. Реклама.	6e					5e											7
17. Патенты			8f	4f								2					

Таблица 2 – Коэффициенты свертки Sij

Номер фактора	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Капитализация $S1j$	5	0	3	0	0	0	6	5	4	5	7	3	2	0	0	0	6
Стоимость $S2j$	6	0	6	0	0	0	3	0	4	5	0	4	5	4	3	6	4

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Процесс поиска наилучшего вектора устроим таким образом: среди векторов приращений с определенным количеством изменяемых факторов (1–4) будем искать те, которые определят минимальные затраты при максимальной капитализации и те, которые будут соответствовать максимальной капитализации при минимальных затратах.

Таким образом, получаем 8 пар (стоимость, капитализация) значений для различного количества изменяемых исходных параметров. В каждой из таблиц указаны стоимости реализации и полученное при этом приращение капитала, а также номера управляющих факторов, при которых достигаются данные значения. В двух последних строках таблицы приводятся значения весового коэффициента α и критериальной функции смешанной стратегии $\hat{f}(r)$.

Оптимальное значение 48,6 смешанного критерия достигается при количестве управляющих факторов $l = 3$ и весовом коэффициенте $\alpha = 0{,}84$ факторов сценария (2).

Графический вид результатов представлен на рис. 1.

В результате проведенного анализа отметим, что при увеличении количества управляющих факторов относительное изменение критериальных факторов достаточно невелико. При этом, при переходе от простых стратегий к более сложным (количество управляющих факторов l меняется от 1 до 4), объем капитала возрастает, а разность между ним и стоимостью уменьшается. Таким образом, выбор рациональной стратегии управления НМА может заключаться в компромиссе между этими стратегиями.

Основными факторами, влияющими на результат в случае использовании стратегии (1) являются 3, 5, 10 и 17, то есть Технологии, Предпринимательская активность, Лицензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций и Патенты соответственно. В случае использовании стратегии (2) основополагающими факторами являются 1, 2, 3, 14 и 16, то есть Бренды, Знания, Технологии, Расходы на НИОКР и Реклама.

При использовании смешанной стратегии основными (с весом 1) факторами, влияющими на результат, являются 5, 10, 17 (Предпринимательская активность, Ли-

Таблица 3 – Результаты расчетов

Количество управляющих факторов l		1		2		3		4	
Стратегия		1	2	1	2	1	2	1	2
Управляющие факторы U^l		5	1	10, 17	1, 16	5, 10, 17	1, 3, 16	3, 5, 10,17	1, 2, 14, 16
Капитализация	$f_1^{\max}$	216	74	261	74	279	79	284	86
	$f_1^{\min}$								
Стоимость	$f_2^{\max}$	174	30	242	30	273	36	279	54
	$f_2^{\min}$								
α		–0,98611		–0,88208		–0,84388		–0,88	
$\hat{f}(U_{12}^l)$	$\hat{f}(U_{21}^l)$	44,41667	44,41667	47,53774	47,53774	48,62025	48,62025	38,48	38,48

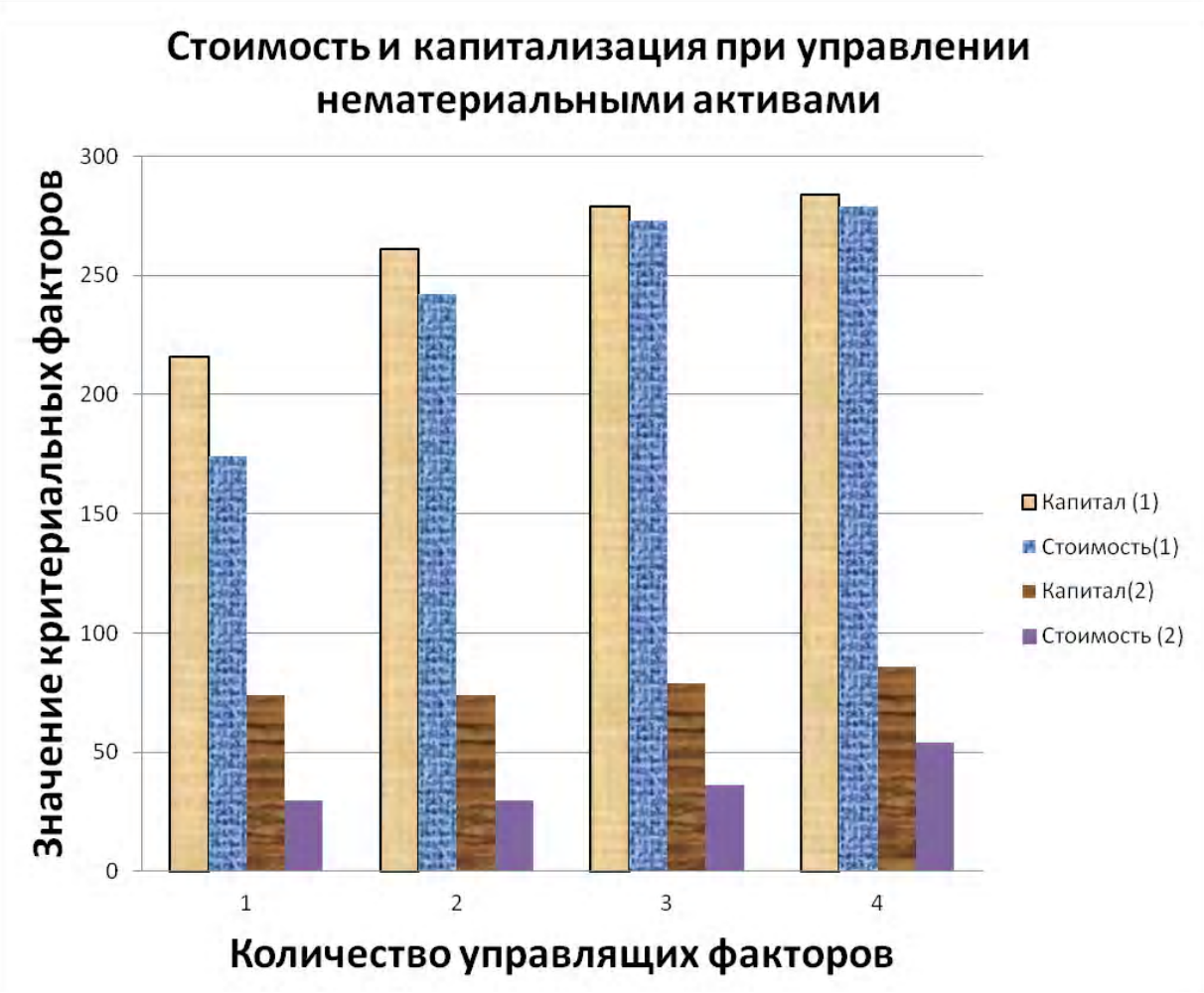


Рисунок 1 – Результаты анализа стратегий управления нематериальными активами предприятия

цензии на осуществление внешнеторговых и квотируемых операций и Патенты); и с весом 0,84 – факторы 1, 3, 16 (Бренды, Технологии, Реклама).

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный метод принятия решений включает две составляющие, обладающие принципиальной новизной: процедуру рефлексий для расчета транзитивного замыкания первичных оценок и процедуру формирования взвешенного критерия для сбалансированного учета нескольких критериев, учитывающих различные аспекты выбора. Специфика рассмотренной задачи заключается в наличии неопределенности, заключенной, как в свойствах экспертных данных, так и в наличии несколь-

ких критериев выбора. Применение алгебры многозначной логики в процедуре рефлексий позволяет наиболее адекватно учитывать экспертные данные при оценивании вариантов принятия управленческих решений. Формирование взвешенного критерия основано на балансировке (учете степени важности) максисминного и минимаксного значений исходных критериев. Процесс балансировки осуществлялся для различных количеств учитываемых факторов. При этом обнаружено, что наилучший результат реализуется на собственном подмножестве множества управляющих факторов (в рассмотренном примере в выбранном смешанном критерии учитывались 3 фактора из 12 управляющих факторов). Этот эффект можно объяснить тем, что в ситуации неопределенности решающее значение имеет лишь ограниченное множество управляющих факторов из всего множества возможных управлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен новый алгоритм исследования взаимовлияния различных факторов (в нашем примере инструментов управления нематериальными активами предприятия). Предложенный метод моделирования и принятия решений, использующий экспертные данные, оценивает устойчивые взаимосвязи с учетом системного эффекта от взаимодействия большого количества факторов, отследить который в ручном режиме не представляется возможным. Анализ различных сценариев управления позволяет выделить набор перспективных факторов НМА с точки зрения их влияния на заданные критерии в долгосрочном периоде. Смешанный сценарий позволяет выделить наиболее перспективные факторы НМА (преимущественно в краткосрочном периоде). Метод позволяет принимать рациональные управленческие решения в области управления нематериальными активами предприятия.

БЛАГОДАРНОСТИ

Даная работа выполнена в рамках плана фундаментальных исследований Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН: «Модели, методы и процедуры выбора управленческих решений при реализации программ развития крупномасштабных региональных и производственно-транспортных систем. Комплексирование методов моделирования, оптимизации и искусственного интеллекта, предназначенных для формирования и реализации программ инновационного развития региональных производственных систем».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В. Б. Принятие решений в сильносвязанных структурах взаимодействия факторов и следствий / В. Б. Гусев // Конгресс по интеллектуальным системам и технологиям «AIS-IT'10» : труды конгресса. Научное издание в 4-х томах. – М. : Физматлит, 2010. – Т. 1. – С. 124–130.
2. Саати Томас Л. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети. Пер. с англ. / Томас Л. Саати ; науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. Изд. 2-е. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.
3. Гусев В. Б. Метод рефлексивного оценивания взаимодействия факторов денежно-кредитной политики / В. Б. Гусев, Н. А. Исаева // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10 часть 9. – С. 2005–2009.
4. Гусев В. Б. Экспертный анализ системного эффекта от взаимовлияний факторов кредитно-денежной политики для поддержки принятия решений на основе рефлексивных процедур линейного оценивания и логического вывода / В. Б. Гусев, Н. А. Исаева // Проблемы управления. – 2014. – № 6. – С. 59–67.
5. Гусев В.Б. Использование непрерывных шкал при оценивании и принятии решений в сложных проблемных ситуациях : научное издание / В. Б. Гусев, В. В. Павельев. – М. : ИПУ РАН, 2013. – 118 с.
6. Нейман Дж. Теория игр и экономическое поведение / Дж. Нейман, О. Моргенштерн. – М. : Наука, 1970. – 418 с.
7. Гермейер Ю. Б. Игры с непротивоположными интересами / Ю. Б. Гермейер. – М. : Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1976. – 381 с.
8. Таха Х. А. Введение в исследование операций. 6-е издание / Х. А. Таха. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2001. – 902 с.
9. Князева Е. Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. / Е. Н. Князева, С. П. Курдюмов. – М. : Наука, 1994. – 238 с.
10. Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов / Дж. Нейман.– М. : Мир, 1971. – 481 с.
11. Вишневский А. Г. Воспроизводство населения и общество : история, современность, взгляд в будущее / А. Г. Вишневский. – М. : Финансы и статистика, 1982. – 287 с.
12. КПМГ. МСФО: точка зрения КПМГ. Практическое руководство по международным стандартам финансовой отчетности, подготовленное КПМГ. – М. : Альпина Паблишер, 2014. – 2832 с. – ISBN 978-5-9614-4604-3.
13. Ernst & Young. Применение МСФО 2011 в 3-х частях / Ernst & Young. – М. : Альпина Паблишер, 2011. – 4000 с. – ISSN 978-5-4295-0019-5

Статья поступила в редакцию 13.12.2017.
После доработки 28.12.2017.

Гусєв В. Б.
Канд. фіз.-мат. наук, зав. лабораторії, Інститут проблем управління ім. В. А. Трапезнікова РАН, м. Москва, Російська Федерація

АНАЛІЗ РІШЕНЬ НА ОСНОВІ ЕКСПЕРТНИХ ДАНИХ І РЕФЛЕКСИВНИХ ПРОЦЕДУР ВИСНОВКУ

Актуальність. Коли рішення є досить часто ситуація, де комплекс об'єкти Office, що діють в умовах невизначеності і характеризуються кілька критеріїв відбору, а також наявність погано вимірюваних параметрів або якісні в природі. В таких ситуаціях щоб отримувати оцінки та прийняття рішень, це розумно застосовувати експерт підходів. Це вимагає розробку спеціальних методів для формалізації розглянутих об'єктів і систем управління, а також відповідних процедур чисельного обробки знань.

Мета. Метою проекту є вдосконалення процедур оцінки впливу взаємодії чинників управління на основі досвіду та вибір методу раціональні рішення, коли у вас є кілька критеріїв.

Метод. Стадії розгляду – метод експертного аналізу, використовує Рефлексивне процедури багатозначних логічного виведення отримати Транзитивне замикання оцінок взаємного впливу факторів та методу прийняття рішень на основі збалансоване врахування кілька критеріїв.

Результати. Запропонованих рішень містить у собі дві складові: порядок розрахунку Транзитивне замикання роздуми первинні оцінки та порядок формування зважений критерії для балансування кілька критеріїв, що брати до уваги різні аспекти виділення. У ситуації dvuhkriterial'nosti представила гнучкий критерію, формування якого ґрунтується на балансування (зареєстрований рівень важливості) і maksiminnogo МініМакс посилання критерії та цінності використання відповідних підмножин включені факторів. Як приклад обчислення раціональним вибором структури нематеріальних активів компанії.

Висновки. Специфіка розглянутий підхід з основних новизна зареєстрованих невизначеності, укладений як експерт дані в властивості і є кілька критеріїв відбору. Використання процедури Багатозначна логіка алгебра роздуми може адекватно брати до уваги досвід при оцінці варіантів для управлінських рішень. Гнучка критерієм є атрибут самоорганізації керовані системи. Метод експертного аналізу, контролю факторів, з урахуванням ефектів їх взаємодії, щоб оцінити і виділити найбільш важливих факторів, з точки зору конкретні критерії, приймати раціональні рішення щодо того, реагувати на ситуацію а також з довгострокове також стратегічне планування. Числовий приклад є інформативним, демонструючи ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: експертні дані, багатозначний логічний висновок, оцінки взаємного впливу факторів, транзитивне замикання, керування нематеріальними активами підприємства.

Gusev Vladislav Borisovich

PhD, Associate Professor, Chief of laboratory, Institute of Control Sciences of V. A. Trapeznikov, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

DECISION ANALYSIS ON THE BASIS OF EXPERT DATA AND REFLEXIVE PROCEDURES OF THE CONCLUSION

Relevance. At decision-making the situation is rather widespread when difficult objects of management function in the conditions of uncertainty and are characterized by existence of several criteria of a choice, and also by existence the parameters which are badly giving in to measurement or having qualitative character. In such situations it is reasonable to apply expert approaches to receiving estimates and decision-making. It in turn demands the development of special methods of formalization of the considered objects and control systems, and also the corresponding procedures of numerical processing of expert data.

Purpose. The purpose of work is development of procedures of calculation of estimates for consequences of interaction of factors of management on the basis of expert data and a method of a choice of rational decisions in the presence of several criteria.

Method. A subject of consideration is the method of the expert analysis using reflexive procedures of a multiple-valued logical conclusion for receiving transitive short circuit of estimates of mutual influence of factors and a decision-making method on the basis of the balanced accounting of several criteria.

Results. The offered method of decision-making includes two components: procedure of reflections for calculation of transitive short circuit of primary estimates and procedure of formation of the weighed criterion for the balanced accounting of several criteria considering various aspects of a choice. The flexible criterion which formation is based on balancing (the accounting of degree of importance) of maximin and minimax values of initial criteria and on use of a relevant subset of the considered factors is entered into double criteria situations. Calculation of a rational choice of structure of intangible assets of the enterprise is given as an example.

Conclusions. Specifics of the considered approach possessing basic novelty consist in the accounting of the uncertainty concluded as in properties of expert data, and available several criteria of a choice. Application of algebra of multiple-valued logic in procedure of reflections allows considering most adequately expert data at estimation of options of adoption of administrative decisions. The flexible criterion is attribute of self-organization of the operated system. The developed method of the expert analysis of factors of management considering consequences of their interaction allows estimating and allocating the most significant factors from the point of view of the set criteria, to make rational decisions as for rapid response to current situation, and at long-term and strategic planning. The numerical example represents informative demonstration of efficiency of the offered approach.

Keywords: expert data, multiple-valued logical conclusion, estimates of mutual influence of factors, transitive short circuit, management of intangible assets of the enterprise.

REFERENCES

1. Gusev V.B. Prinyatie reshenii v sil'nosvyazannyh strukturah vzaimodeistviya faktorov i sledstvii, *Kongress po intellektual'nym sistemam i tehnologiyam «AIS-IT'10»: trudy kongressa. Nauchnoe izdanie v 4-h tomah.* Moscow, Fizmatlit, 2010, Vol. 1, pp. 124–130.
2. Saati Tomas L. ; nauch. red. A. V. Andreichikov, O. N. Andreichikova Prinyatie reshenii pri zavisimostyah i obratnyh svyazyah: Analiticheskie seti. Per. s angl. Izd. 2-e. Moscow, Knizhnyi dom «LIBROKOM», 2009, 360 p.
3. Gusev V. B., Isaeva N. A. Metod refleksivnogo ocenivaniya vzaimodeistviya faktorov denezhno-kreditnoi politiki, *Fundamental'nye issledovaniya*, 2013,No.10 chast' 9, pp. 2005–2009.
4. Gusev V. B., Isaeva N. A. Ekspertnyi analiz sistemnogo effekta ot vzaimovliyanii faktorov kreditno-denezhnoi politiki dlya podderzhki prinyatiya reshenii na osnove refleksivnyh procedur lineinogo ocenivaniya i logicheskogo vyvoda, *Problemy upravleniya*, 2014, No. 6, pp. 59–67.
5. Gusev V. B., Pavel'ev V. V. Ispol'zovanie nepreryvnyh shkal pri ocenivanii i prinyatii reshenii v slozhnyh problemnyh situaciyah: nauchnoe izdanie. Moscow, IPU RAN, 2013, 118 p.
6. Neiman Dzh., Morgenshtern O. Teoriya igr i ekonomicheskoe povedenie. Moscow, Nauka, 1970, 418 p.
7. Germeier Yu. B. Igry s neprotivopolozhnymi interesami. Moscow, Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoi literatury izdatel'stva «Nauka», 1976, 381 p.
8. Taha Hemedi A. Vvedenie v issledovanie operacii. 6-e izdanie. Moscow, Izdatel'skii dom «Vil'yams», 2001, 902 p.
9. Knyazeva E. N., Kurdyumov S. P. Zakony evolyucii i samoorganizacii slozhnyh sistem. Moscow, Nauka, 1994, 238 p.
10. Neiman Dzh. Teoriya samovosproizvodyashihsya avtomatov. Moscow, Mir, 1971, 481 p.
11. Vishnevskii A. G. Vosproizvodstvo naseleniya i obshestvo: Istoriya, sovremennost', vzglyad v budushee. Moscow, Finansy i statistika, 1982, 287 p.
12. KPMG. MSFO: tochka zreniya KPMG. Prakticheskoe rukovodstvo po mezhdunarodnym standartam finansovoi otchetnosti, podgotovlennoe KPMG. Moscow, Al'pina Pablisher, 2014, 2832 p. ISBN 978-5-9614-4604-3.
13. Ernst & Young. Primenenie MSFO 2011 v 3-h chastyah. Moscow, Al'pina Pablisher, 2011, 4000 p. ISSN 978-5-4295-0019-5

УДК 519.63

Дивак М. П.[1], Порплиця Н. П.[2], Маслияк Ю. Б.[3], Пукас А. В.[4], Мельник А. М.[5]

[1]Д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна
[2]Канд. техн. наук, старший викладач кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна
[3]Аспірант кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна
[4]Канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна
[5]Канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна

МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ІЗ РОЗПОДІЛЕНИМИ ПАРАМЕТРАМИ З ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИМ КЕРУВАННЯМ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ІНТЕРВАЛЬНИХ ДАНИХ

Актуальність. В теорії ідентифікації систем розроблено ряд методів для побудови моделей об'єктів з розподіленими параметрами. Основою математичних моделей таких об'єктів являються системи диференціальних рівнянь в частинних похідних або їх різницеві аналоги. Разом з тим, для синтезу різницевого аналога необхідно використовувати методи структурно-параметричної ідентифікації. Переважно такі методи ґрунтуються на випадкових даних експерименту і похибки вимірювань не враховуються. У випадку урахування похибок вимірювань отримуємо дані в інтервальному вигляді. Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації математичних моделей використовують поведінкові моделі медоносних бджіл, які в літературі називають алгоритми бджолиної колонії (АБК). Разом з тим, випадки структурної ідентифікації математичних моделей на основі аналізу інтервальних даних, коли об'єкт з розподіленими параметрами містить просторово розподілені керуючі фактори, в літературі не розглянуто, однак є актуальними для задач моделювання просторового розподілу концентрацій забруднюючих речовин в атмосфері, задач температурно-керованого сушіння тощо.

Мета роботи – адаптація відомих методів АБК для розв'язування задачі структурно-параметричної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами з додатковим урахуванням просторово розподіленого керування.

Метод. Структурну та параметричну ідентифікацію здійснено на основі методу аналізу інтервальних даних. В запропонованому методі оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні роєвого інтелекту, зокрема, на основі алгоритму бджолиної колонії.

Результати. Наведено приклад застосування методу для задачі моделювання процесу сушіння гіпсокартону на завершальній стадії його виробництва. Змодельовано два режими представлення просторово розподіленого керування у вигляді температурного поля сушильної камери. Побудована математична модель адекватно відображає розподіл вологості на листі гіпсокартону при реалізації процесу його сушіння.

Висновки. Запропоновано метод ідентифікації інтервальних моделей об'єктів із розподіленими параметрами для випадку просторово розподіленого керування, в якому оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні роєвого інтелекту. Важливою особливістю запропонованого методу є його можливість достатньо ефективно «обходити» локальні мінімуми, тобто відкидати ті набори структурних елементів моделі, які не забезпечують її задані прогностичні властивості, чи призводять до переускладнення.

Ключові слова: інтервальний аналіз даних, структурно-параметрична ідентифікація, алгоритм бджолиної колонії.

НОМЕНКЛАТУРА

ІСНАР – інтервальна система нелінійних алгебричних рівнянь;

АБК – алгоритм бджолиної колонії;

РО – різницевий оператор;

ІРО – інтервальний різницевий оператор;

$\vec{f}^T(\bullet)$ – вектор невідомих базисних функцій, що визначає структуру різницевого оператора;

$v_{i,j,h,k}$ – модельована характеристика у точці з дискретно заданими просторовими координатами в момент часу k;

i, j, h – дискретно задані просторові координати;

k – часова дискрета;

$\vec{u}$ – вектор вхідних змінних (керуючих факторів);

$\vec{g}$ – вектор невідомих параметрів РО;

$\eta_1(i,j,h,k),\ldots,\ \eta_p(i,j,h,k)$ – відомі функції, які однозначно визначають розподіл керуючих факторів у всіх вузлах вимірювальної сітки;

p – номер керуючого фактору;

$[z^-_{i,j,h,k}; z^+_{i,j,h,k}]$ – інтервал можливих значень модельованої характеристики в точці з дискретними координатами в момент часу k;

$[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ – інтервальні оцінки прогнозованої характеристики;

$\{f_1^s(\bullet); f_2^s(\bullet);\ldots;\ f_{I_s}^s(\bullet)\} \subset F$ – набір структурних елементів, що задає поточну s-у структуру ІРО;

λ_s – поточна структура ІРО;

m_s – кількість елементів у поточній структурі λ_s;

$[I_{\min}; I_{\max}]$ – інтервал, межі якого задають відповідно мінімальне та максимальне значення потенційної кількості структурних елементів у структурі ІРО;

F – множина усіх структурних елементів;

$|F| = L$ – потужність множини F;

$\hat{\vec{g}}^s$ – вектор відомих значень параметрів, оцінений для поточної структури ІРО;

© Дивак М. П., Порплиця Н. П., Маслияк Ю. Б., Пукас А. В., Мельник А. М., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-17

Λ – множина усіх можливих структур ІРО;

$\delta(\lambda_s)$ – функція мети;

$\mathrm{mid}(\bullet), \mathrm{wid}(\bullet)$ – операції визначення центру та ширини інтервалів, відповідно;

MCN – максимальна кількість ітерацій;

LIMIT – максимально можлива кількість ітерацій «незмінності» структури;

S – початкова кількість структур ІРО;

$[\hat{v}^-_{i,j,k}; \hat{v}^+_{i,j,k}]$ – інтервальні оцінки рівня вологості на листі гіпсокартону в точках з дискретно заданими координатами в момент часу *k*;

$\eta_p(i,j,k)$ – функція, яка задає значення температури в сушильній камері в точках з дискретно заданими координатами в момент часу *k*.

ВСТУП

Задачі моделювання об'єктів з розподіленими параметрами є одними з найскладніших, оскільки, крім моделювання часових змін, необхідно одночасно моделювати просторовий розподіл їх характеристик. Під розподіленими параметрами таких об'єктів розуміють їх характеристики, наприклад: тиск, температуру, густину, вологість, рівень концентрації тощо. Такий параметр (характеристику) об'єкта називають його розподіленим параметром. Значення цього параметра відрізняється у різних точках об'єкта, тобто розподілені по ньому. Тоді об'єкт, який характеризується кількома такими параметрами (характеристиками), називають об'єктом з розподіленими параметрами.

В теорії ідентифікації розроблено ряд методів для побудови моделей таких об'єктів. В основі математичних моделей таких об'єктів є система диференціальних рівнянь в частинних похідних або її різницеві аналоги. Разом з тим, для синтезу різницевого аналога необхідно використовувати методи структурно-параметричної ідентифікації. Такі методи розроблені у працях Івахненка О. Г., Степашка В. С. [1, 2], проте передбачається, що дані експерименту є випадковими і не враховуються похибки вимірювань. У випадку урахування похибок вимірювань отримуємо дані в інтервальному вигляді. В цьому випадку задача ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами суттєво ускладнюється, оскільки передбачає оцінювання хоча б одного розв'язку ІСНАР [3, 7, 10]. Для формування загальної структури моделі використовують методи групового урахування аргументів або ж генетичні алгоритми, однак ці методи не придатні у випадку представлення результатів експерименту в інтервальному вигляді.

Останнім часом для розв'язування задач структурної ідентифікації математичних моделей використовують поведінкові моделі медоносних бджіл, які в літературі називають алгоритмами бджолиної колонії (АБК) [4–6]. Проте, якщо математична модель містить вхідні змінні у вигляді просторово розподілених керуючих факторів, зазначена задача суттєво ускладнюється. Тому метою даної праці є адаптація відомих методів АБК для розв'язування задачі структурно-параметричної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами з додатковим урахуванням просторово розподіленого керування.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задачу структурної ідентифікації РО зазвичай розглядають у такому загальному вигляді [6, 7]:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T(v_{0,0,0,0},...,v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0},...,v_{0,j-1,0,0},...,v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \vec{u}) \cdot \vec{g},$$

$$i = 1,...,I,\ j = 1,...,J,\ h = 1,...,H,\ k = 1,...,K, \qquad (1)$$

Однак, у випадку розв'язування задач ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами з просторово розподіленими керуючими факторами (значення керуючих факторів не є сталими для усіх вузлів вимірювальної сітки), доцільно переписати загальний вигляд РО (1) наступним чином:

$$v_{i,j,h,k} = \vec{f}^T(v_{0,0,0,0},...,v_{0,0,h-1,0}, v_{i-1,0,0,0},...,v_{0,j-1,0,0},...,v_{i-1,j-1,h-1,k-1}, \eta_1(i,j,h,k),...,\eta_p(i,j,h,k)) \cdot \vec{g},$$

$$i = 1,...,I,\ j = 1,...,J,\ h = 1,...,H,\ k = 1,...,K,\ p = 1,\ldots,P, \quad (2)$$

Зауважимо, що функція керування може бути задана як аналітично, так і таблично. Наприклад, у випадку двовимірної вимірювальної сітки, розподіл керуючого фактору можна подати у вигляді таблично заданої функції $\eta_1(i,j,k)$ наступним чином (табл. 1).

Наприклад, у табл. 1 значення $\eta_1(0,0,1)$ означає відоме значення фактору керування у вузлі вимірювальної сітки з координатами *i*=0, *j*=0, в момент часу *k*=1.

Загальний вигляд РО (2) отримуватимемо на основі аналізу експериментальних даних, які представлено в інтервальному вигляді та отримано для обмеженої кількості часових дискрет за умов просторово розподілених керуючих факторів впливу. При цьому вектор оцінок $\hat{\vec{g}}$ параметрів $\vec{g}$ та вектор базисних функцій $\vec{f}^T(\bullet)$ у різницевому операторі (2) отримуватимемо із умов забезпечення гарантованої точності моделі:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] \in [z^-_{i,j,h,k}; z^+_{i,j,h,k}],$$

$$i = 1,...,I,\ j = 1,...,J,\ h = 1,...,H,\ k = 1,...,K, \qquad (3)$$

Інтервальні оцінки прогнозованої характеристики з виразу (3) $[\hat{v}_{i,j,h,k}]$ обчислюватимемо на основі такого різницевого оператора:

$$[\hat{v}_{i,j,h,k}] = [\hat{v}^-_{i,j,h,k}; \hat{v}^+_{i,j,h,k}] = \vec{f}^T([\hat{v}_{0,0,0,0}],...,$$
$$...,[\hat{v}_{i-1,0,0,0}],...,[\hat{v}_{0,j-1,0,0}],...,[\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}],$$
$$i = 1,...,I,\ j = 1,...,J,\ h = 1,...,H,\ k = 1,...,K,\ p = 1,\ldots,P. \quad (4)$$

Таблиця 1 – Таблично задана функція

j \ *i*	0	…	I
0	$\eta_1(0,0,1)$	…	$\eta_1(I,0,1)$
⋮	⋮	⋮	⋮
J	$\eta_1(0,J,1)$	…	$\eta_1(I,J,1)$

Беручи до уваги те, що всі обчислення в РО (4) необхідно проводити із застосуванням правил інтервальної арифметики, РО (4) будемо називати ІРО [3, 6–8].

Складність задачі налаштування ІРО (4) полягає в тому, що невідомими є не лише параметри, а і його структура. Для початку введемо ряд позначень, які необхідні для розкриття суті формальної постановки задачі.

Позначимо за λ_s поточну структуру ІРО:

$$\lambda_s = \{f_1^s(\bullet)\cdot\hat{g}_1^s; f_2^s(\bullet)\cdot\hat{g}_2^s;\ldots; f_{m_s}^s(\bullet)\cdot\hat{g}_{m_s}^s\}\subset\Lambda. \quad (5)$$

Множина усіх структурних елементів $F=\{f_1(\vec{v}_{i,j,h,k},\eta_1(i,j,h,k),\ldots,\eta_p(i,j,h,k));\ldots;$ $f_l(\vec{v}_{i,j,h,k},\eta_1(i,j,h,k),\ldots,\eta_p(i,j,h,k));\ldots;f_L(\vec{v}_{i,j,h,k},$ $\eta_1(i,j,h,k),\ldots,\eta_p(i,j,h,k))\}$. Вектор відомих значень параметрів $\hat{\vec{g}}^s$ оцінений для поточної структури ІРО на основі методів параметричної ідентифікації, які ґрунтуються на процедурах випадкового пошуку [9, 10].

Задача структурної ідентифікації полягає у пошуку структури λ_s ІРО у вигляді (4), що задовольняє умови (3) на множині усіх дискрет. Варто зазначити, що параметрична ідентифікація в цьому випадку є етапом структурної ідентифікації. Як відомо, у випадку, коли дані задано в інтервальному вигляді, цей етап полягає у формуванні деякого вектора базисних функцій (поточної структури λ_s ІРО) і знаходженні оцінок параметрів ІРО шляхом розв'язування ІСНАР [3, 7, 10].

Якість поточної структури ІРО оцінюватимемо за значенням показника $\delta(\lambda_s)$, який кількісно визначає наближеність поточної структури до задовільної в сенсі забезпечення умов (3). Значення показника обчислюватимемо за допомогою таких виразів:

$$\delta(\lambda_s)=\max_{i=1,\ldots,I,\,j=1,\ldots,J,\,h=1,\ldots,H,\,k=1,\ldots,K,\,p=1,\ldots,P}\{\Big|\mathrm{mid}(\vec{f}_s^T\times$$

$$\times([\hat{v}_{0,0,0,0}],\ldots,[\hat{v}_{0,0,h-1,0}],[\hat{v}_{i-1,0,0,0}],\ldots,$$

$$[\hat{v}_{1,j-1,0,0}],\ldots,[\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}],\eta_1(i,j,h,k),\ldots,$$

$$\ldots,\eta_p(i,j,h,k))\cdot\hat{\vec{g}}^s)-\mathrm{mid}([z_{i,j,h,k}])\Big|\}, \quad (6)$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}]\cap[z_{i,j,h,k}]=\varnothing$ $\exists\ i=1,\ldots,I$ $\exists\ j=1,\ldots,J$,

$\exists\ k=1,\ldots,K$, $\exists p=1,\ldots,P$;

$$\delta(\lambda_s)=\max_{i=1,\ldots,I,\,j=1,\ldots,J,\,h=1,\ldots,H,\,k=1,\ldots,K,\,p=1,\ldots,P}\{\mathrm{wid}(\vec{f}_s^T\times$$

$$\times([\hat{v}_{0,0,0,0}],\ldots,[\hat{v}_{0,0,h-1,0}],[\hat{v}_{i-1,0,0,0}],\ldots,$$

$$[\hat{v}_{1,j-1,0,0}],\ldots,[\hat{v}_{i-1,j-1,h-1,k-1}],\eta_1(i,j,h,k),\ldots,$$

$$\ldots,\eta_p(i,j,h,k))\cdot\hat{\vec{g}}^s))\cap[z_{i,j,h,k}])\}, \quad (7)$$

якщо $[\hat{v}_{i,j,h,k}]\cap[z_{i,j,h,k}]\neq\varnothing$ $\forall\ i=1,\ldots,I$, $\forall\ j=1,\ldots,J$, $\forall\ h=1,\ldots,H$, $\forall\ k=1,\ldots,K$, $\forall\ p=1,\ldots,P$.

Вираз (6) описує «наближеність» поточної структури до задовільної на початкових ітераціях, тим часом як вираз (7) у випадку $\delta(\lambda_s)=0$ забезпечує виконання умов (3).

Тепер задачу структурної ідентифікації ІРО запишемо формально у вигляді задачі знаходження мінімуму функції $\delta(\lambda_s)$:

$$\delta(\lambda_s)\xrightarrow{\hat{\vec{g}}^s\vec{f}_s(\bullet)}\min,\ m_s\in[I_{\min};I_{\max}],\ \vec{f}_s(\bullet)\in F. \quad (8)$$

Чим менше значення $\delta(\lambda_s)$, тим «краща» поточна структура ІРО. Якщо $\delta(\lambda_s)=0$, то поточна структура ІРО дає можливість побудувати адекватну модель, для якої інтервальні оцінки прогнозованої характеристики належать до інтервалів можливих значень модельованої характеристики.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

До класу об'єктів та процесів з розподіленими параметрами з просторово розподіленим керуючим фактором, можуть належати, наприклад, процес сушіння гіпсокартону під час його виробництва [11, 12], де його розподіленим параметром (характеристикою) є вологість на поверхні листа, а керуючим фактором – розподіл температурного поля в сушильній камері, та процес поширення забруднення автотранспортом атмосфери, де розподіленим параметром є рівень концентрації шкідливих викидів, а керуючим фактором – розподіл інтенсивності автотранспорту у різних точках ділянки, для якої будують модель та ін.

Як в задачах сушіння гіпсокартону, так і при вимірюванні рівня концентрацій шкідливих викидів у атмосферу, спільним є те, що в одному та в іншому випадках експериментальні дані подають в інтервальному вигляді. Для побудови адекватної моделі потрібно забезпечити її точність в межах виміряних даних з інтервальними похибками. Подібні задачі розглянуто у праці [12]. Але там не враховано просторового розподілу факторів керування. У таких випадках задача суттєво ускладнюється і ідентифікація стає не просто складною оптимізаційною задачею з заданими умовами у вигляді інтервальних даних, а ще й задачею, в якій треба врахувати функцію розподілу. Тому функція мети цієї задачі ускладнюється суттєвим чином. Для знаходження оптимальних параметрів функції мети потрібно застосовувати методи ройового інтелекту, притаманного бджолиній колонії.

У працях [6, 12] розглянуто метод структурно-параметричної ідентифікації математичних моделей об'єктів з розподіленими параметрами, який застосовували за умов постійних керуючих факторів впливу. Цей метод побудовано на основі аналогій з харчовою поведінкою колонії медоносних бджіл. Метою цієї праці є удосконалення зазначеного методу структурно-параметричної ідентифікації шляхом урахування функції розподілу керуючих факторів впливу.

Методи ройового інтелекту моделюють колективну поведінку мультиагентних децентралізованих систем. Ці

методи застосовують для розв'язування складних оптимізаційних задач, зокрема багатовимірної оптимізації, дискретної оптимізації, багатокритеріальної оптимізації тощо [4–6]. В основу методів ройового інтелекту покладено біологічний принцип: особини об'єднуються у зграї чи колонії для покращення умов своєї життєдіяльності. Зокрема, кожна особина колонії має більше шансів на виживання у боротьбі з хижаками, загалом колонія може ефективніше проводити пошук їжі, ніж кожна особина самостійно тощо. Таким чином, будь-яка колонія живих організмів у процесі функціонування ефективно вирішує оптимізаційні і, як правило, багатокритеріальні задачі.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вищезгаданий метод структурно-параметричної ідентифікації моделей об'єктів з розподіленими параметрами ґрунтується на основі АБК, запропонованого Д. Карабогою для розв'язування оптимізаційної задачі із складною функцією мети багатьох змінних [4–6]. Основна ідея АБК полягає у моделюванні поведінки колонії медоносних бджіл у процесі пошуку їжі (нектару).

Розглянемо зазначений метод, який побудований на основі поведінкових моделей бджолиної колонії, шляхом детального аналізу схеми його реалізації, наведеної на рис. 1.

На рис. 1 оператор $P(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснює перетворення структури різницевого оператора у вигляді (5) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару робочими бджолами. У контексті задачі структурної ідентифікації це означає, що на поточній ітерації застосування методу структурної ідентифікації потрібно на основі кожної з поточних структур математичної моделі λ_s, які задають координати відомих джерел нектару, згенерувати по одній «новій» $\lambda_s^{'}$, які задаватимуть координати точок в околі цих джерел їжі. Варто зазначити, що згадана «нова» структура означає окіл джерела нектару, тому має бути «близькою» до первинної структури ІРО λ_s. Тобто оператор $P(\Lambda_{mcn}, F)$ здійснює перетворення множини поточних координат джерел нектару в координати точок вїх околі, тобто здійснює перетворення множини поточних структур ІРО Λ_{mcn}, згенерованих на ітерації алгоритму mcn у множину структур ІРО $\Lambda_{mcn}^{'}$. Генеруємо таку «нову» структуру шляхом заміни випадковим чином частини елементів поточної λ_s. Заміну частини елементів здійснюємо наступним чином: чим «гірша» структура λ_s, тим більшу кількість її структурних елементів потрібно замінити. Показник n_s визначає кількість елементів у поточній структурі λ_s, які потрібно замінити.

На рис. 1 оператор попарної селекції $D_1(\lambda_s, \lambda_s^{'})$ «кращої» із структур ІРО λ_s та $\lambda_s^{'}$ за значеннями функції мети відповідно до процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару для робочих бджіл. Оператор $D_1(\lambda_s, \lambda_s^{'})$ реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІРО Λ_{mcn}^1 із поточних множин Λ_{mcn}, $\Lambda_{mcn}^{'}$. Таким чином, отримуємо множину структур ІРО першого ряду формування $\lambda_s^1 \in \Lambda_{mcn}^1, s = 1...S$. Варто зазначити, що розподіл бджіл у популяції задаємо наступним чином: робочі бджоли – 50% популяції; бджоли-дослідники – 50%.

На рис. 1 оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ означає перетворення структури різницевого оператора у вигляді (1) відповідно до процедури дослідження околу відомого джерела нектару бджолами-дослідниками. Оператор $P_\delta(\Lambda_{mcn}, F)$ означає перетворення кожної структури λ_s^1 з множини структур Λ_{mcn}^1 першого ряду формування, згенерованих на ітерації алгоритму mcn, у множини структур ІРО $\Lambda_s^{'}$ (де s=1…S) у спосіб заміни випадковим чином n_s елементів кожної структури , елементами із множини структурних елементів F.

На рис. 1 оператор погрупової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda_s^{'})$ «кращої» структури ІРО із λ_s^1 та множини $\Lambda_s^{'} = \{\lambda_1 ... \lambda_r ... \lambda_{R_s}\}$ за значеннями функції мети відповіднодо процедури запам'ятовування координат та якості джерела нектару для бджіл-дослідників. Оператор погрупової селекції $D_2(\lambda_s^1, \Lambda_s^{'})$ реалізує процес синтезу множини «кращих» структур ІРО Λ_{mcn}^2 із поточних множин Λ_{mcn}^1 та $\Lambda_{mcn}^{''}$ у спосіб селекції структур ІРО λ_s^2 за показниками якості, де $\Lambda_{mcn}^{''} = \{\Lambda_1^{'} \cup \Lambda_2^{'} ... \cup ... \Lambda_s^{'} ... \cup \Lambda_S^{'}\}, s = 1...S$. Таким чином отримуємо множину структур ІРО другого ряду формування Λ_{mcn}^2. Структури ІРО λ_s^2 другого ряду формування на наступній ітерації застосування методу задають координати множини відомих джерел нектару Λ_{mcn}^2, за якими закріплені робочі бджоли популяції.

Лічильник $Limit_s$ для кожної поточної структури ІРО, зміна значень якого імітує процес зменшення кількості нектару відповідно до процедури виявлення вичерпаних джерел нектару. Його значення інкрементуємо кожного разу, якщо під час попарної чи погрупової селекції поточна структура не «оновилася», та обнуляємо в іншому випадку. Збільшення значення лічильника $Limit_s$ імітує процес вичерпування джерела нектару. Водночас використаємо критерій, який дозволяє виявляти вичерпані джерела нектару. Для цього введено константу $LIMIT$, значення якої дослідник задає як один із параметрів методу структурної ідентифікації перед його застосуванням. Таким чином, кожне джерело нектару (структура ІРО λ_s^2), для якого виконується умова $Limit_s \geq LIMIT$, вважаємо вичерпаним. У такому випадку робоча бджола, закріплена за ним, стає бджолою-розвідником та здійснює випадковий пошук «нового» джерела нектару.

На рис. 1 оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ випадковим чином генерує «нову» структуру ІРО з множини всіх структурних елементів відповідно до процедури випадкового пошуку нового джерела нектару. Оператор $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$ означає генерування випадковим чи-

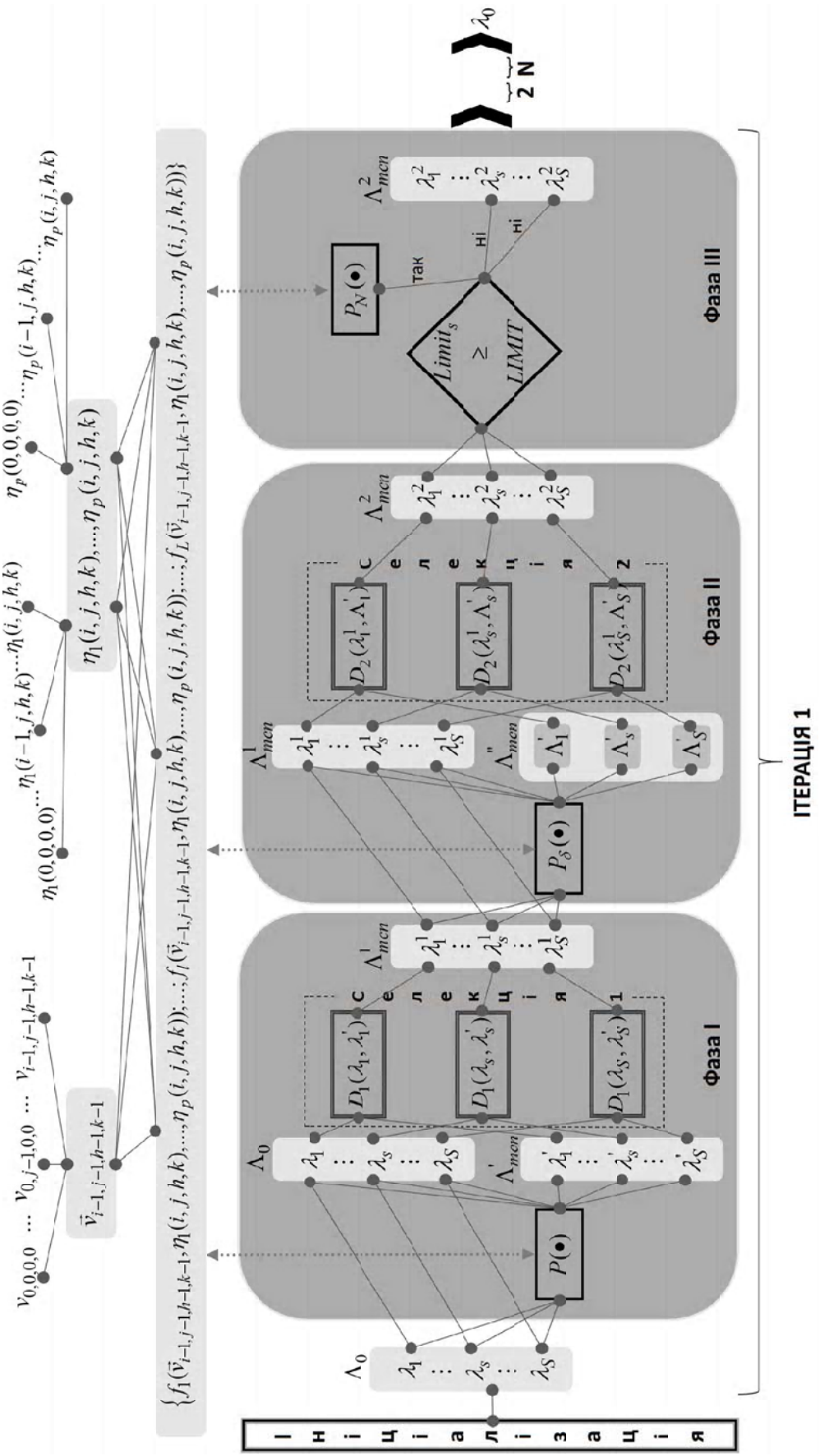


Рисунок 1 – Схема реалізації методу структурно-параметричної ідентифікації ІРО на основі поведінкових моделей бджолиної колонії

ном структури λ_s^2 із множини усіх структурних елементів *F*, де кількість структурних елементів $m_s \in [I_{\min}, I_{\max}]$. Варто зазначити, що при формуванні «нової» структури ІРО оператором $P_N(F, I_{\min}, I_{\max})$, йому будуть доступні всі структурні елементи із множини *F*.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо застосування вищеописаного методу на прикладі процесу сушіння гіпсокартону з урахуванням температурного поля у сушильній камері. Найважливішим етапом виробництва гіпсокартону є етап сушіння листа у сушильній камері. На цьому етапі формується остаточний розподіл вологості на листі, що є визначальним показником для відбракування готової продукції [11, 12]. Допустимий рівень вологості повинен бути в межах від 0,6–0,9% і бажано щоб цей розподіл був якомога рівномірнішим. Очевидно, що забезпечення рівномірного розподілу вологості можна досягнути керуючи температурним полем у сушильній камері. Експериментальне визначення оптимального розподілу температурного поля в сушильній камері для отримання кінцевої продукції високої якості на виробництві призведе до високих витрат. Тому доцільно побудувати математичну модель для дослідження впливу температурного поля у сушильній камері на кінцевий розподіл вологості на листі гіпсокартону.

Дослідження проводилось для листа гіпсокартону таких стандартних розмірів: товщина – 9,5 мм, довжина – 2500 мм, ширина – 1200 мм у точках рівномірно розподіленої вимірювальної сітки з кроком Δx=300 мм по довжині листа та Δy=300 мм по ширині листа. Першу точку було зафіксовано на відстані 200 мм від краю по ширині листа та 150 мм від краю по довжині листа відповідно.

Спочатку було отримано експериментальні дані для випадку, коли значення температури в кожній точці сушильної камери були близькими. Дискретні значення функції температури $\eta_1(i, j, 1)$ в сушильній камері наведено в табл. 2.

Для вимірювання вологості використано прилад GANN compact A, технічні характеристики якого наведено на сайті [13]. Відносна похибка зазначеного приладу знаходиться в межах 5%. Експериментальні дані виміряної вологості, без урахування похибки, представлені у табл. 3.

З урахуванням 5% похибки вимірювань їх доцільно представити в інтервальному вигляді. Наприклад, інтервальне значення вологості в точці з координатами *i*=0, *j*=0 матиме такий вигляд: $[z_{0,0}^-; z_{0,0}^+] = [0,57; 0,63]$. Тепер задамо початкові умови для побудови ІРО в межах похибок вимірювань експериментальних даних:

$$[\hat{v}_{0,0,1}^-; \hat{v}_{0,0,1}^+] = [0,594; 0,606];$$

$$[\hat{v}_{0,1,1}^-; \hat{v}_{0,1,1}^+] = [0,624; 0,636];$$

$$[\hat{v}_{0,2,1}^-; \hat{v}_{0,2,1}^+] = [0,653; 0,667];$$

$$[\hat{v}_{0,3,1}^-; \hat{v}_{0,3,1}^+] = [0,653; 0,667];$$

$$[\hat{v}_{0,4,1}^-; \hat{v}_{0,4,1}^+] = [0,673; 0,687];$$

$$[\hat{v}_{0,5,1}^-; \hat{v}_{0,5,1}^+] = [0,643; 0,657];$$

$$[\hat{v}_{0,6,1}^-; \hat{v}_{0,6,1}^+] = [0,614; 0,626];$$

$$[\hat{v}_{0,7,1}^-; \hat{v}_{0,7,1}^+] = [0,604; 0,616];$$

$$[\hat{v}_{1,0,1}^-; \hat{v}_{1,0,1}^+] = [0,673; 0,687];$$

$$[\hat{v}_{1,1,1}^-; \hat{v}_{1,1,1}^+] = [0,733; 0,747];$$

$$[\hat{v}_{2,0,1}^-; \hat{v}_{2,0,1}^+] = [0,713; 0,727];$$

$$[\hat{v}_{2,1,1}^-; \hat{v}_{2,1,1}^+] = [0,772; 0,778];$$

$$[\hat{v}_{3,0,1}^-; \hat{v}_{3,0,1}^+] = [0,614; 0,626];$$

$$[\hat{v}_{3,1,1}^-; \hat{v}_{3,1,1}^+] = [0,624; 0,636].$$

Таблиця 2 – Дискретні значення функції температури $\eta_1(i, j, 1)$, (C°) у сушильній камері

j \ i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	125	125	125	125	125	125	125	125
1	125	125	125	125	125	125	125	125
2	125	125	125	125	125	125	125	125
3	125	125	125	125	125	125	125	125

Таблиця 3 – Значення виміряної відносної вологості, (%) у точках із заданими координатами *i, j*

j \ i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0,60	0,63	0,66	0,66	0,68	0,65	0,62	0,61
1	0,68	0,74	0,78	0,82	0,85	0,83	0,79	0,71
2	0,72	0,78	0,82	0,85	0,86	0,82	0,78	0,73
3	0,62	0,63	0,68	0,70	0,71	0,67	0,66	0,65

$$[\hat{v}^-_{i,j,k};\hat{v}^+_{i,j,k}] = \hat{g}_1 + \hat{g}_2 \cdot (\eta_p(i-1,j,k)/$$
$$/\eta_p(i-1,j-1,k))[\hat{v}^-_{i-1,j-1,k};\hat{v}^+_{i-1,j-1,k}]\times$$
$$\times[\hat{v}^-_{i-1,j-1,k};\hat{v}^+_{i-1,j-1,k}]+$$
$$+\hat{g}_3 \cdot (\eta_p(i,j,k)/\eta_p(i-1,j-2,k))\times$$
$$\times[\hat{v}^-_{i-1,j-2,k};\hat{v}^+_{i-1,j-2,k}]+$$
$$+\hat{g}_4 \cdot (\eta_p(i,j,k)/\eta_p(i-1,j-1,k)\times$$
$$\times[\hat{v}^-_{i-1,j-1,k};\hat{v}^+_{i-1,j-1,k}]/[\hat{v}^-_{i,j-1,k};\hat{v}^+_{i,j-1,k}]+$$
$$+\hat{g}_5 \cdot (\eta_p(i-1,j,k)/\eta_p(i,j,k))\times$$
$$\times[\hat{v}^-_{i-1,j,k};\hat{v}^+_{i-1,j,k}]+\hat{g}_6 \cdot [\hat{v}^-_{i,j-1,k};\hat{v}^+_{i,j-1,k}],$$
$$i=1,...,I, i=1,...,3, j=1,...,J, j=2,...,7, k=1,2, p=1, \quad (9)$$

де $\hat{g}_1 = 0{,}8993$; $\hat{g}_2 = 0{,}0365$; $\hat{g}_3 = 0{,}0345$; $\hat{g}_4 = -0{,}0307$; $\hat{g}_5 = -0{,}0015$; $\hat{g}_6 = -0{,}3074$ – оцінки параметрів ІРО, отримані на основі застосування процедур випадкового пошуку.

Результати моделювання розподілу вологості для випадку температури в сушильній камері, представленій у табл. 2, наведено на рис. 2 та 3.

З рис. 2 та 3 видно, що при незмінному в координатах температурному полі в сушильній камері рівень вологості гіпсокартону вищий в центрі листа, ніж на його краях, що відповідає фізичним особливостям процесу.

Тепер, із застосуванням отриманої моделі (9) змоделюємо ситуацію розподілу вологості на листі гіпсокартону для іншого температурного поля. Для цього функцію розподіленого керування, яка задає температурне поле в камері, підберемо, виходячи із фізичних міркувань, але у такий спосіб, щоб забезпечити якомога рівномірніший розподіл вологості на листі гіпсокартону.

Дискретні значення функції температури $\eta(i,j,2)$ в сушильній камері, наведено в табл. 4.

У табличному представленні функції $\eta_1(i,j,2)$ видно, що температура в сушильній камері зростає в напрямку до її центру. Початкові умови для цього випадку моделювання було задано у такий спосіб:

$$[\hat{v}^-_{0,0,1};\hat{v}^+_{0,0,1}] = [0,693;0,707];$$

$$[\hat{v}^-_{0,1,1};\hat{v}^+_{0,1,1}] = [0,727;0,7373];$$

$$[\hat{v}^-_{0,2,1};\hat{v}^+_{0,2,1}] = [0,7128;0,7272];$$

$$[\hat{v}^-_{0,3,1};\hat{v}^+_{0,3,1}] = [0,7227;0,7372];$$

$$[\hat{v}^-_{0,4,1};\hat{v}^+_{0,4,1}] = [0,7127;0,7272];$$

$$[\hat{v}^-_{0,5,1};\hat{v}^+_{0,5,1}] = [0,7029;0,7171];$$

$$[\hat{v}^-_{0,6,1};\hat{v}^+_{0,6,1}] = [0,7029;0,7171];$$

$$[\hat{v}^-_{0,7,1};\hat{v}^+_{0,7,1}] = [0,7128;0,7272];$$

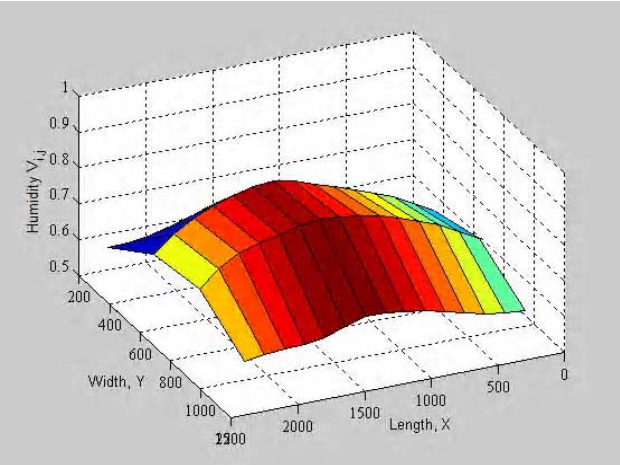


Рисунок 2 – Розподіл вологості на листі гіпсокартону при заданій температурі $\eta_1(i,j,1)$

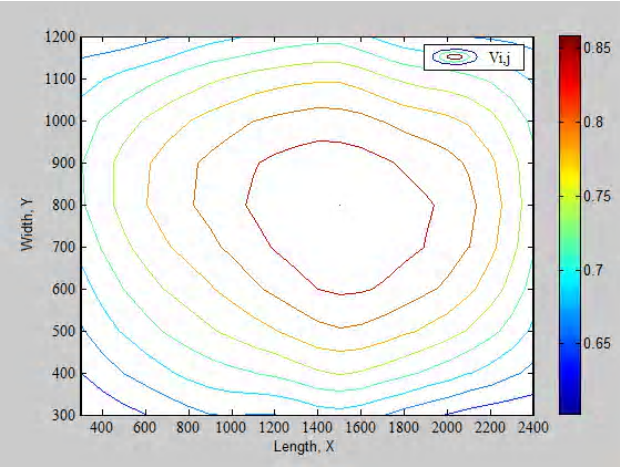


Рисунок 3 – Лінії рівня розподілу вологості на листі гіпсокартону при заданій температурі $\eta_1(i,j,1)$

Таблиця 4 – Дискретні значення функції температури $\eta_1(i,j,2)$, (C°) у сушильній камері

j \ i	0	1	2	3	4	5	6	7
0	120	120	120	120	120	120	120	120
1	120	125	130	135	135	130	125	120
2	120	125	130	135	135	130	125	120
3	120	120	120	120	120	120	120	120

$$[\hat{v}^-_{1,0,1};\hat{v}^+_{1,0,1}]=[0,7029;0,7171];$$

$$[\hat{v}^-_{1,1,1};\hat{v}^+_{1,1,1}]=[0,693;0,707];$$

$$[\hat{v}^-_{2,0,1};\hat{v}^+_{2,0,1}]=[0,7128;0,7272];$$

$$[\hat{v}^-_{2,1,1};\hat{v}^+_{2,1,1}]=[0,7029;0,7171];$$

$$[\hat{v}^-_{3,0,1};\hat{v}^+_{3,0,1}]=[0,7128;0,7272];$$

$$[\hat{v}^-_{3,1,1};\hat{v}^+_{3,1,1}]=[0,693;0,707].$$

Результати моделювання процесу сушіння гіпсокартону у випадку задання значень температури функцією $\eta_1(i,j,2)$ показані на рис. 4 та 5.

6 ОГОВОРЕННЯ

З рис. 4 та 5 видно, що математична модель (9) адекватно відображає розподіл вологості на листі гіпсокартону при реалізації процесу його сушінн. Так як підвищення температури в центрі сушильної камери призводить до зниження рівня вологості у центрі листа гіпсокартону, що повністю узгоджується з особливостями фізичного процесу.

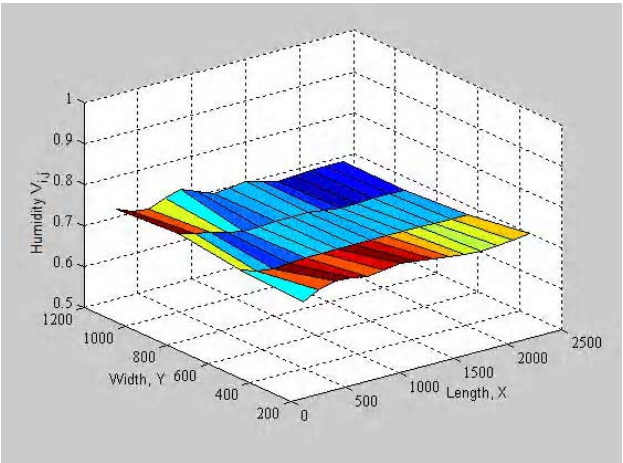


Рисунок 4 – Розподіл вологості на листі гіпсокартону при заданому температурному полі $\eta_1(i,j,2)$

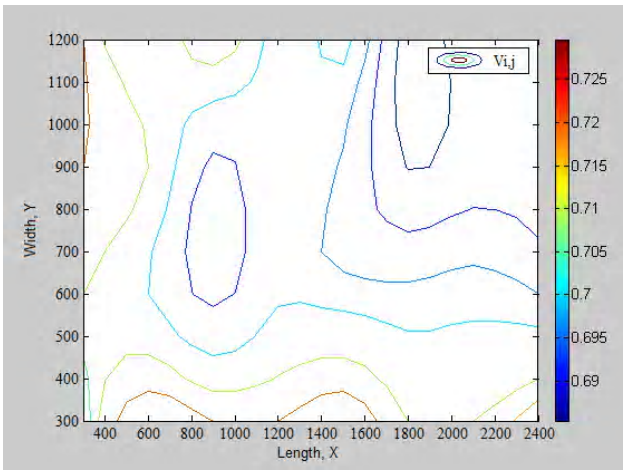


Рисунок 5 – Лінії рівня розподілу вологості на листі гіпсокартону при заданому температурному полі $\eta_1(i,j,2)$

Таким чином, із розглянутого прикладу бачимо, що запропонований метод ідентифікації моделей об'єктів із розподіленими параметрами дає можливість адекватно ураховувати функцію керування об'єктом, яка є також просторово розподілена. Важливою особливістю запропонованого методу є його можливість достатньо ефективно обходити локальні мінімуми, тобто відкидати ті набори структурних елементів моделі, які не забезпечують її задані прогностичні властивості, чи призводять до переускладнення, про що в достатній мірі показано в праці [6].

ВИСНОВКИ

Запропоновано метод ідентифікації інтервальних моделей об'єктів із розподіленими параметрами для випадку просторово розподіленого керування. В запропонованому методі оператори синтезу структури моделі, на відміну від існуючих методів, побудовано на застосуванні роєвого інтелекту, зокрема – на основі алгоритму бджолиної колонії.

Наведено приклад застосування методу для задачі моделювання процесу сушіння гіпсокартону на завершальній стадії його виробництва. Змодельовано два режими представлення просторово розподіленого керування у вигляді температурного поля сушільної камери. Результати моделювання підтверджують адекватність фізичним процесам.

ПОДЯКИ

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Математичне та програмне забезпечення для контролю забруднення атмосфери автотранспортом», що виконується за рахунок коштів загального фонду державного бюджету. Номер державної реєстрації НДР: 0116U005507.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ивахненко А. Г. Индуктивный метод самоорганизации моделей сложных систем / А. Г. Ивахненко. – Киев : Наукова думка, 1981. – 296 с.
2. Степашко В. С. Алгоритмы МГУА как основа автоматизации процеса моделирования сложных объектов на основе процеса моделирования по экспериментальным данным / В. С. Степашко // Автоматика. – 1988. – № 4. – С. 44–45.
3. Дивак М. П. Особливості побудови інтервальної системи алгебричних рівнянь та методу її розв'язку в задачах ідентифікації лінійного інтервального різницевого оператора / М. П. Дивак, Т. М. Дивак // Індуктивне моделювання складних систем. 2009. – Вип. 1. – С. 35–43.
4. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report: TR-06 / D. Karaboga. – Kayseri : Erciyes University, 2005. – 10 p.
5. Karaboga D. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm / D. Karaboga, B. Basturk // Journal of Global Optimization. – 2007. – Vol. 39, Issue 3. – P. 459–471.
6. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony / [N. Porplytsya, M. Dyvak, I. Spivak et al.] // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM), 13th international conference, Polyana-Svalyava, 24–27 February 2015: proceedings. – Lviv : CAD Department of Lviv Polytechnic National University, 2015. – P. 196–199.

7. Дивак Т. М. Структурна та параметрична ідентифікація інтервального різницевого оператора на основі алгоритму оцінювання розв'язку інтервальної системи нелінійних алгебричних рівнянь / Т. М. Дивак // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: I Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів, Тернопіль, 20–21 травня 2011 р. : матеріали. – Тернопіль : ТНЕУ, 2011. – С. 13–14.
8. Застосування інтервального різницевого оператора для апроксимації полів концентрацій шкідливих викидів автотранспорту / І. Ф. Войтюк, Т. М. Дивак, М. П. Дивак та ін. // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2011. – Вип. 37, № 1. – С. 44–52.
9. Растригин Л. А. Введение в идентификацию обьектов управления / Л. А. Растригин, Н. Е. Маджаров. – М. : Энергия, 1987. – 216 с.
10. Дивак Т. М. Метод параметричної ідентифікації макромоделі у вигляді інтервального різницевого оператора із розділенням вибірки даних / Т. М. Дивак // Сучасні комп'ютерні інформаційні технології: II Всеукраїнська школа-семінар молодих вчених і студентів, Тернопіль, 4–5 травня 2012 р. : матеріали. – Тернопіль : ТНЕУ, 2012. – С. 22–23.
11. Лінія виробництва гіпсокартонних листів [Електронний ресурс] / Майстерня своєї справи. – Режим доступу: http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/.
12. Макромодель распределения влажности в листе гипсокартона в процессе его сушения на основе интервального разностного оператора / Н. П. Дывак, А. В. Пукас, Т. Н. Дывак и др. // Управляющие системы и машины. – 2013. – № 2. – С. 72–78.
13. Влагомер бесконтактный GANN compact A [Электронный ресурс] / Интервесп Группа компаний. – Режим доступа: http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann_compact_a.htm/

Стаття надійшла до редакції 10.01.2017.
Після доробки 12.02.2017.

Дывак Н. П.[1], Порплица Н. П.[2], Маслыяк Ю. Б.[3], Пукас А. В.[4], Мельник А. Н.[5]
[1]Д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных информационных технологий Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина
[2]Канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина
[3]Аспирант кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина
[4]Канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина
[5]Канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина

МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ С ПРОСТРАНСТВЕННО РАСПРЕДЕЛЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ИНТЕРВАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Актуальность. В теории идентификации систем разработано ряд методов для построения моделей объектов с распределенными параметрами. Основой математических моделей таких объектов являются системы дифференциальных уравнений в частных производных или их разностные аналоги. Вместе с тем, для синтеза разностного аналога необходимо использовать методы структурно-параметрической идентификации. Преимущественно такие методы основываются на случайных данных эксперимента и погрешности измерений не учитываются. В случае учета погрешностей измерений получаем данные в интервальном виде. В последнее время для решения задач структурной идентификации математических моделей используют поведенческие модели медоносных пчел, которые в литературе называют алгоритмами пчелиной колонии (АБК). Вместе с тем, случаи структурной идентификации математических моделей на основе анализа интервальных данных, когда объект с распределенными параметрами содержит пространственно распределенные управляющие факторы, в литературе не рассмотрены, однако являются актуальными для задач моделирования пространственного распределения концентраций загрязняющих веществ в атмосфере, задач температурно-управляемой сушки и тому подобное.

Цель работы – адаптация известных методов АБК для решения задачи структурно-параметрической идентификации моделей объектов с распределенными параметрами с дополнительным учетом пространственно распределенного управления.

Метод. Структурную и параметрическую идентификацию осуществлено на основе метода анализа интервальных данных. В предложенном методе операторы синтеза структуры модели, в отличие от существующих методов, построено на применении роевого интеллекта, в частности, на основе алгоритма пчелиной колонии.

Результаты. Приведен пример применения метода для задачи моделирования процесса сушки гипсокартона на завершающей стадии его производства. Смоделировано два режима представления пространственно распределенного управления в виде температурного поля сушильной камеры. Построенная математическая модель адекватно отражает распределение влажности на листе гипсокартона при реализации процесса его сушки.

Выводы. Предложено метод идентификации интервальных моделей объектов с распределенными параметрами для случая пространственно распределенного управления, в котором операторы синтеза структуры модели, в отличие от существующих методов, построено на применении роевого интеллекта. Важной особенностью предложенного метода является его возможность достаточно эффективно «обходить» локальные минимумы, то есть отвергать те наборы структурных элементов модели, которые не обеспечивают ее заданные прогностические свойства, или приводят к переусложнению.

Ключевые слова: интервальный анализ данных, структурно-параметрическая идентификация, алгоритм пчелиной колонии.

Dyvak M. P.[1], Porplytsya N. P.[2], Maslyiak Y. B.[3], Pukas A. V.[4], Melnyk A. M.[5]
[1]D.Sc., Professor, Dean of the Faculty of Computer Information Technology, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine
[2]Ph.D., Senior Lecturer at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine
[3]Post-graduate student at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine
[4]Ph.D., Associate Professor, Head of the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine
[5]Ph.D., Associate Professor at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine

METHOD OF IDENTIFICATION OF MODELS OF OBJECTS WITH DISTRIBUTED PARAMETERS WITH A SPATIALLY DISTRIBUTED CONTROL BASED ON INTERVAL DATA ANALYSIS

Context. There are developed a number of methods to build models of objects with distributed parameters in the system identification theory. The basis of mathematical models of such objects are the systems of partial differential equations or their difference analogs. Therewith, for the synthesis of difference analog the methods of structural and parametric identification must be used. Mainly, such methods

are based on random experimental data and measurement errors are not taken into account. When the measurement errors are taken into account we obtain data in interval form. Recently, for solving the tasks of structure identification of mathematical models the honey bee behavioral models are used, which are called the artificial bee colony algorithms (ABCA) in the literature. At the same time, the cases of structure identification of mathematical models based on interval data analysis when the object with distributed parameters includes spatially distributed control factors are not considered in the literature, but are relevant for the tasks of modeling of spatially distribution of pollutant concentrations in the atmosphere and temperature-controlled drying tasks etc.

Objective is adaptation of known ABCA methods for solving task of structure and parametric identification of models of objects with distributed parameters with spatially distributed control taken into account in addition.

Method. Structure and parametric identification has been implemented based on interval data analysis. In proposed method the operators of model structure synthesis, in contrast to existing methods, are built using the swarm intelligence, particularly based on artificial bee colony algorithm.

Results. An example of applying the method for task of modeling of drywall drying process in the final stage of its production is shown. Two modes of representation of spatially distributed control in kind of temperature field in drying oven were modeled. A mathematical model adequately reflects the humidity distribution in the drywall sheets when implementing its drying process.

Conclusions. The method for identification of interval models of objects with distributed parameters for the case of spatially distributed control was proposed. The operators of model structure synthesis, in contrast to existing methods, are built using the swarm intelligence. An important feature of the proposed method is its ability to efficiently "bypass" local minima, scilicet reject those sets of structural elements of the model that do not provide its prognostic properties, or lead to very high complexity.

Keywords: interval data analysis, structure-parametric identification, artificial bee colony algorithm.

REFERENCES

1. Ivaxnenko A. G. Induktivnyj metod samoorganizacii modelej slozhnyx sistem. Kiev, Naukova dumka, 1981, 296 p.
2. Stepashko V. S. Algoritmy MGUA kak osnova avtomatizacii procesa modelirovaniya slozhnyx ob'ektov na osnove procesa modelirovaniya po e'ksperimental'nym dannym, *Avtomatika,* 1988, No. 4, pp. 44–45.
3. Dyvak M. P., Dyvak T. M. Osoblyvosti pobudovy intervalnoi systemy alhebrychnykh rivnian ta metodu ii rozvjazku v zadachakh identyfikacii liniinoho intervalnoho riznytsevoho operatora, *Induktyvne modeliuvannia skladnykh system*, 2009, Vyp. 1, pp. 35–43.
4. Karaboga D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization: technical report: TR-06. Kayseri, Erciyes University, 2005, 10 p.
5. Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm, *Journal of Global Optimization*, 2007, Vol. 39, Issue 3, pp. 459–471.
6. Porplytsya N., Dyvak M., Spivak I. et al. Mathematical and algorithmic foundations for implementation of the method for structure identification of interval difference operator based on functioning of bee colony, *The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM), 13th international conference, Polyana-Svalyava, 24–27 February 2015: proceedings.* Lviv, CAD Department of Lviv Polytechnic National University, 2015, pp. 196–199.
7. Dyvak T. M. Strukturna ta parametrychna identyfikatsiia intervalnoho riznytsevoho operatora na osnovi alhorytmu otsiniuvannia rozviazku intervalnoi systemy neliniinykh alhebrychnykh rivnian, *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii: I Vseukrainska shkola-seminar molodykh vchenykh i studentiv, Ternopil, 20–21 travnia 2011 r. : materialy*. Ternopil, TNEU, 2011, pp. 13–14.
8. Voitiuk I. F., Dyvak T. M., Dyvak M. P. ta in. Zastosuvannia intervalnoho riznytsevoho operatora dlia aproksymatsii poliv kontsentratsii shkidlyvykh vykydiv avtotransportu, Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh, 2011, Vyp. 37, No.1, pp. 44–52.
9. Rastrigin L. A., Madzharov N. E. Vvedenie v identifikaciyu ob'ektov upravleniya. Moscow, E'nergiya, 1987, 216 p.
10. Dyvak T. M. Metod parametrychnoi identyfikatsii makromodeli u vyhliadi intervalnoho riznytsevoho operatora iz rozdilenniam vybirky danykh, *Suchasni kompiuterni informatsiini tekhnolohii: II Vseukrainska shkola-seminar molodykh vchenykh i studentiv, Ternopil, 4–5 travnia 2012 r. : materialy.* Ternopil: TNEU, 2012, pp. 22–23.
11. Liniia vyrobnytstva hipsokartonnykh lystiv Maisternia svoiei spravy. Access mode: http://msd.in.ua/lin-proizv-gips-karton/.
12. Dyvak N. P., Pukas A. V., Dyvak T. N. i dr. Makromodel' raspredeleniya vlazhnosti v liste gipsokartona v processe ego susheniya na osnove interval'nogo raznostnogo operatora, *Upravlyayushhie sistemy i mashiny*, 2013, No. 2, pp. 72–78.
13. Vlagomer beskontaktnyj GANN compact A. Intervesp Gruppa kompanij. Access mode: http://www.intervesp-stanki.ru/item/gann_compact_a.htm/

УДК 66.041-6: 622.78

Лобов В. Й.[1], Лобова К. В.[2]

[1]Канд. техн. наук, доцент кафедри інформатики, автоматики і систем управління ДВНЗ «Криворізький національний університет», Кривий Ріг, Україна
[2]Студентка ДВНЗ «Криворізький національний університет» Кривий Ріг, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКІСТЮ ВИПАЛЮВАЛЬНИХ ВІЗКІВ КОНВЕЄРНИХ МАШИН

Актуальність. Вирішено актуальну задачу розробки сучасних математичних моделей для дослідження регулювання швидкістю випалювальних візків конвеєрної машини, що дозволяє підтримувати заданий рівень висоти шару котунів та забезпечує оптимальний технологічний процес по випалу котунів і максимальну продуктивність.

Мета роботи – представлення результатів розробки математичної моделі для регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини із реалізацією сучасної SCADA-системи для управління продуктивністю конвеєрної машини шляхом регулювання швидкості переміщення її випалювальних візків, що приводить до зміни висоти шару котунів на цих візках.

Метод. Для оцінювання динамічних характеристик системи електроприводу і моделювання регулювання швидкості переміщення випалювальних візків конвеєрної машини використовувано потужний і універсальний метод дослідження - графічне середовище імітаційного моделювання Simulink, що є додатком до пакету для числового аналізу MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink використовується принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки.

Результати. У запропонованій математичній моделі використовуються вихідні дані конвеєрних машин ОК-306 та LURGI-278. Для побудови математичної моделі автоматизованої системи регулювання швидкості переміщення випалювальних візків конвеєрної машини виконані розрахунки передавальних функцій елементів, що входять у цю систему. У математичній моделі асинхронний двигун представлений спрощеною механічною та електромагнітною ланками зі зворотнім зв'язком по швидкості, які визначені передавальними функціями. У результаті моделювання отримані перехідні процеси при регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках та визначено їх вплив на продуктивність конвеєрної машини.

Для доцільності удосконалення АСУТП фабрики огрудкування за рахунок використання математичної моделі для регулювання швидкості руху випалювальних візків розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі, та дає можливість оперативного диспетчерського управління. Оскільки у системах автоматизованого управління провідні фабрики огрудкування використовують інструментальну систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулювання висоти шару котунів доцільно розробляти з використанням SCADA TRACE MODE 6.

Висновки. На основі використання вихідних даних технологічного процесу випалу котунів на конвеєрній випалювальній машині та виконаних розрахунків у графічному середовищі Simulink MATLAB побудовано математичну модель системи для регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини, що відповідно до технологічного процесу дозволяє досліджувати вплив на процес випалу котунів за рахунок керування висоти шару котунів і продуктивність конвеєрної машини.

Запропоновану сучасну модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі та дає можливість оперативного диспетчерського управління, може бути використано в реальних промислових умовах.

Ключові слова: фабрика огрудування, конвеєрна машина, випалювальні візки, котуни, швидкість, математична модель, SCADA-система, моделювання, результати моделювання.

НОМЕКЛАТУРА

КМ – конвеєрна машина;

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition System;

АД – асинхронний двигун;

$W_{ем}(p)$ – передавальна функція електромагнітної ланки;

β – електромагнітна жорсткість;

$M_{кр}$ – критичний момент асинхронного двигуна;

$s_{кр}$ – критичне ковзання;

f – частота струму в мережі живлення;

$p_н$ – кількість пар обмоток двигуна;

$T_{ем}$ – електромагнітна стала;

$W_{мх}(p)$ – передавальна функція механічної ланки;

$W_{пч}(p)$ – передавальна функція перетворювача частоти;

$K_{пч}$ – коефіцієнт перетворювача;

$U_{пчм}$ – максимальна напруга на виході ланки перетворювача частоти;

$T_{пч}$ – постійна часу перетворювача частоти;

$W_{орс}(p)$ – передавальна функція об'єкта регулювання;

$W_{рс}(p)$ – передавальна функція регулятора струму;

$W_{бс}(p)$ – бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання струму;

T_{μ} – некомпенсована постійна часу;

$K_{зс}$ – коефіцієнт датчика струму;

$U_{рсм}$ – максимальна напруга на вході регулятора;

$I_б$ – базисне значення струму, при використанні перетворювача частоти;

$W_{рш}(p)$ – передавальна функція регулятора швидкості;

$K_{зш}$ – коефіцієнт датчика швидкості;

$U_{ршм}$ – максимальна напруга на вході регулятора швидкості;

$W_р(p)$ – передавальна функція редуктора;

$W_{рм}(p)$ – передавальна функція робочого механізму – привідної зірки конвеєра;

$h_з$ – загальна максимальна висота шару котунів;

$U_{звм}$ – максимальна напруга на виході передавальної функції зворотного зв'язку по висоті;

$U_{квм}$ – максимальна напруга на виході вагів;

$q_{квм}$ – максимальна продуктивність конвеєрних вагів.

© Лобов В. Й., Лобова К. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-18

ВСТУП

Сучасний процес виробництва залізорудних котунів складається з прийому та підготовки шихтових матеріалів, виробництва сирих котунів при дозуванні концентрату, вапняку, бентоніту, тощо, зміцнення котунів і обробки зміцнених котунів. Сирі котуни піддаються термічній обробці на КМ у поєднані з іншими технологічними операціями – завантаження сирих котунів у випалювальні візки, їх транспортування, сушіння, інтенсивний нагрів, високотемпературне випалювання і охолодження шару котунів. Коливання завантаження візків конвеєрної машини сирими котунами коливається у межах ±18–20 %, це викликає нерівномірну висоту шару котунів, тому для підтримки потрібного шару котунів виникає необхідність в розробці автоматичної системи керування швидкістю переміщення візків в продовж зон конвеєрної машини [1–6]. Одночасно потрібно враховувати те, що КМ працює у різних режимах, навантаженнях, різноманітних збуреннях, з сировиною та енергоносіями, що мають різні характеристики. Зміна цих параметрів приводить до коливань аеродинамічного опору шару котунів, що в свою чергу впливає на кількість присосів під візками, а відповідно й на температуру під ними, порушуючи газопроникність шару та якість котунів на виході машини. Від рівності шару котунів також залежить енергетичні показники та продуктивність КВМ, що потребує зменшення коливань висоти шару котунів на візках КМ шляхом регулювання швидкості переміщення випалювальних візків [7–9].

Окрім того, сучасних умовах досить актуальним є використання на верхньому рівні фабрики огрудування АСУТП, яка являє собою багаторівневу людино-машинну систему управління. В ієрархії програмно-апаратних засобів промислової автоматизації фабрики огрудування знаходяться SCADA-системи, які виконують задачі збирання інформації й управління технологічним процесом у реальному часі, та зберігання історії процесу, мають інтерфейс з оператором [8]. Вони займають верхній рівень ієрархії програмно-апаратних засобів автоматизації. Головне призначення SCADA-систем – збір поточної інформації про роботу устаткування з датчиків і контролерів, первинне перетворення та зберігання зібраної інформації, управління технологічним процесом, представлення поточної інформації у вигляді гістограм, таблиць, графіків, забезпечення зв'язку між оператором та технологічним процесом. У той же час, необхідно розрізняти програмне забезпечення SCADA, яке функціонує у складі АСУТП конкретного об'єкта, і набір інструментальних програмних засобів, призначених для розробки спеціалізованого програмного забезпечення. Ці дві різновидності програмного забезпечення тісно пов'язані, тому в подальшому будемо називати їх системами збору даних і оперативного управління. Найбільш популярними серед інструментальних засобів розробки є: WinCC фірми Siemens, Genesis32 фірми Iconics, iFIX фірми Intellution. Вони функціонують під управлінням Windows 98/NT/2000, що обумовлює їх максимальну відкритість і масштабованість.

Сучасні автоматизовані системи управління фабрик огрудування будуються на базі промислових контролерів, які на нижньому рівні АСУТП використовують інформацію з первинних перетворювачів, обробляють інформації, що получено, регулюють технологічні параметри, забезпечують аварійну сигналізацію, захист і блокування. Сформована та оброблена контролерами інформація передається до комп'ютеризованих систем верхнього рівня АСУТП, які мають робочі місця диспетчера, оператора-технолога, де відбувається подальша обробка даних процесу і представлення оператору в інтуїтивно зрозумілому вигляді.

Сьогодення доцільно удосконалювати АСУТП фабрики огрудування за рахунок впровадження сучасної SCADA-системи регулювання швидкістю випалювальних візків, що працює в реальному часі та використовує можливість оперативного диспетчерського управління продуктивності КМ. Тому розробка сучасних математичних моделей для регулювання швидкості випалювальних візків КМ, які підтримують заданий рівень висоти шару котунів та забезпечують оптимальний технологічний процес по продуктивності, є актуальною науковою та практичною задачею.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задача дослідження полягає в розробленні математичної моделі регулювання швидкості переміщення випалювальних візків КМ, що прискорює темпи протікання технологічного процесу, дозволяючи вивчати не тільки основні канали управління процесами випалювання котунів, скорочуючи час освоєння нових процесів, а й вдосконалювати вже існуючі, що змінюють продуктивність КМ. Цілі та методи моделювання спрямовані на підвищення ефективності та продуктивності КМ, якості продукції, забезпечення задач планування і управління, а також звільнення оператора від роботи в шкідливих умов. Це дозволить більш точніше керувати процесом термообробки та газодинамічним режимом шару котунів та реально впливати на якість спечених котунів, мінімізувати витрати палива для забезпечення заданої міцності котунів та збільшити продуктивність КМ. Задача моделювання управління швидкості переміщення випалювальних візків КМ полягає в тому, що для технологічного об'єкта потрібно підібрати такий опис, який у повній мірі відображав дійсне значення продуктивності КМ з точки зору заданої мети моделювання. При розробці системи автоматичного регулювання швидкості переміщення випалювальних візків у продовж всіх зон КМ метою моделювання є дослідження поведінки системи, знаходження оптимальних параметрів регуляторів для роботи системи в необхідному режимі. При цьому удосконалюється керування оператором технологічного процесу випалювання котунів, забезпечуючи їх якість та необхідну продуктивність КМ, завдяки використання регулювання швидкості випалювальних візків КМ, що реалізовано на базі SCADA-системи. Тому метою даної статті є представлення результатів розробки математичної моделі для регулювання швидкості випалювальних візків КМ із реалізацією сучасної SCADA-системи для управління про-

дуктивністю КМ і регулювання висоти шару котунів на візках КМ.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

На сьогоднішній день проводяться масштабні дослідження в області створення ефективних методів та технологій, що дозволяють вирішувати керування технологічним процесом при автоматичному управлінні агрегатами та механізмами, призначених для виробництва котунів, у тому числі й регулюванні швидкості візків КМ, що досить широко висвітлено у вітчизняній і зарубіжній літературі [1–8]. Для управління переміщення випалювальних візків у продовж технологічних зон КМ використовуються електроприводи з електродвигунами постійного або змінного струму. При реалізації цієї мети застосовуються асинхронні електроприводи с параметричним управлінням, для яких використовуються перетворювачі частоти, що включені в статорні ланцюги асинхронного двигуна [9–12]. Технічні та економічні показники перетворювачів частоти грають головну роль у сфери їх застосування і виявляють доцільність їх промислового впровадження в електроприводі управління швидкістю візків КМ та є найбільш широко поширеними на практиці, їх експлуатація буде застосовуватися і в майбутньому для регулювання швидкості КМ [9, 11–12]. Проте, відомі результати досліджень не в повній мірі відображають протікання технологічного процесу випалювання котунів і з великою помилкою визначають продуктивність при регулюванні швидкості візків КМ. Разом з цим, велика кількість різних публікацій присвячено розробці сучасних SCADA-систем для автоматизації агрегатів і механізмів фабрики огрудування. Лідерами промислових SCADA-систем є: фірми AdAstra, що розробила систему Trace Mode [8], Slmeider Electric – Monitor Pro [13], US Data – Factory Link [14], Wonderware – Intouch [15], фірми Iconics – Genesis [16] та ін. За допомогою TRACE MODE 5.04 для Windows NT можливо не тільки розробляти розподілені АРМ операторів технологічного процесу, а й запрограмувати контролери, а також зв'язати АСУТП з корпоративною інформаційною системою підприємства і глобальною мережею Internet.

Відомі SCADA-системи використовуються у галузях господарства, де потрібно забезпечувати операторський контроль за технологічними процесами в реальному часі, які можливо порівняти та зробити обґрунтований вибір на користь той чи іншої системи, що користуються популярністю у фахівців. Так, використовують SCADA-системи відомих західних фірм (Siemens, GE Fanuc, Octagon Systems, PEP, Modicon, Schneider Electric) в автоматичних системах управління газоперекачувальних станцій моніторингу та управління об'єктами енергетики, технології фізико-хімічного поділу сировини, що містить цукор та інших промислових об'єктів [17–25]. У металургійному виробництві та на деяких технологічних дільницях гірничо-збагачувальних підприємствах використовують SCADA систему TRACE MODE, яка є спеціалізованим комплексом рішень для верхніх рівнів АСУ ТП від компанії AdAstra Research Group. SCADA система TRACE MODE здійснює такі функції: управління процесом виробництва; збір даних; архівування даних; віддалене управління обладнанням; тривожна сигналізація; відображення інформації на трендах; генерування звітів. [19, 20, 26]. У той же час, деякі технологічні об'єкти випалу котунів фабрики огрудування потребують удосконалення АСУТП за рахунок застосування сучасних SCADA-систем.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Для моделювання регулювання швидкості палет КМ необхідно використовувати найбільш потужний і універсальний метод дослідження та оцінювання динамічних систем, поведінка яких залежить від випадкових факторів. Враховуючи вище сказане використовуємо графічне середовище імітаційного моделювання Simulink, що дозволяє за допомогою блок-діаграм у вигляді направлених графів, будувати динамічні моделі, включаючи дискретні, безперервні і гібридні, нелінійні і розривні системи. Програма Simulink є додатком до пакету для числового аналізу MATLAB. При моделюванні з використанням Simulink реалізуємо принцип візуального програмування, відповідно до якого, користувач на екрані з бібліотеки стандартних блоків створює модель пристрою і здійснює розрахунки [11]. На рис. 1 зображено математичну модель, розроблену у програмі Simulink на основі наступних розрахунків.

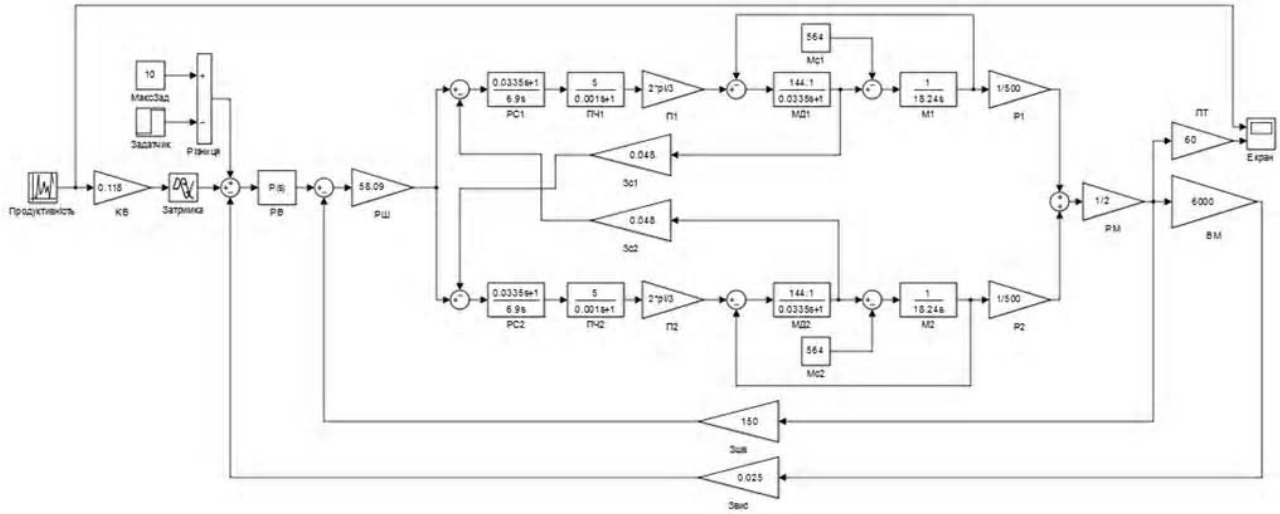


Рисунок 1 – Математична модель процесу регулювання висоти шару котунів

Процес транспортування та регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках потребує електропривод із достатньою потужністю. Потужність електроприводу стрічки візків витрачається на подолання опору руху конвеєра: тертя кочення в ходових роликах візків, тертя ковзання в нижніх поздовжніх, торцевих і бортових ущільнювачах при руху візків, тертя в зачепленнях і тертя при завантаженні котунів на випалювальні візки КМ. Також, необхідно врахувати, що котуни створюють рушійний момент на візках розвантажувальної частини конвеєра, що полегшує роботу приводу. Тому розрахунок потужності електроприводу є першочерговим завданням при побудові системи керування.

У математичній моделі використано вихідні дані конвеєрних машин ОК-306 та LURGI-278 [5–7, 29]. Для моделювання автоматизованої системи необхідно провести розрахунки передавальних функцій елементів, що входять у систему автоматичного регулювання швидкості переміщення випалювальних візків КМ. Так, спрощена математична модель асинхронного двигуна має механічну та електромагнітну ланки зі зворотнім зв'язком по швидкості, які описуються наступними передавальними функціями. Для електромагнітної ланки:

$$W_{\text{ем}}(p) = \frac{\beta}{T_{\text{ем}}p+1} = \frac{144{,}1}{0{,}0335p+1}, \qquad (1)$$

де $\beta = \frac{\text{М}_{\text{кр}}}{s_{\text{кр}}\omega_0}$, $\text{М}_{\text{кр}} = 1432{,}5\ \text{Н}\cdot\text{м}$, $s_{\text{кр}} = 0{,}095$ визначається за каталогом,

$$\omega_0 = \frac{2\pi f}{p_{\text{н}}}, f = 50\ \text{Гц}, p_{\text{н}} = 3;$$

$$\omega_0 = \frac{2\cdot 3{,}14\cdot 50}{3} = 104{,}67\ \text{об/хв},$$

$$\beta = \frac{1432{,}5}{0{,}095\cdot 104{,}67} = 144{,}1.$$

Електромагнітна стала (2), визначається за формулою:

$$T_{ем} = \frac{1}{2\cdot\pi\cdot f\cdot s_k} = \frac{1}{3\cdot 14{,}159\cdot 0{,}095} = 0{,}033\text{с}. \qquad (2)$$

Передавальна функція механічної ланки:

$$W_{\text{мх}}(p) = \frac{1}{Jp} = \frac{1}{18{,}24p}. \qquad (3)$$

Передавальна функція перетворювача частоти має вигляд:

$$W_{\text{пч}}(p) = \frac{\kappa_{\text{пч}}}{T_{\text{пч}}p+1} = \frac{5}{0{,}01p+1}. \qquad (4)$$

де $\kappa_{\text{пч}} = \frac{f}{U_{\text{пчм}}}$, $U_{\text{пчм}} = 10$ В, $\kappa_{\text{пч}} = \frac{50}{10} = 5$ Гц/В. $\text{Т}_{\text{пч}}$ приймається за 0,001 с.

Ланка $\frac{2\pi}{p_{\text{н}}} = \frac{2\cdot 3{,}14}{3} = 2{,}1$ розташовується між перетворювачем частоти і двигуном, потрібна для перетворення частоти напруги живлення у частоту обертання двигуна [11, 30–32].

Для спрощення синтезу регулятора струму можна знехтувати зворотнім зв'язком по швидкості асинхронного двигуна. Тоді передавальна функція об'єкта регулювання має наступний вигляд:

$$W_{\text{орс}}(p) = W_{\text{рс}}\cdot\frac{\kappa_{\text{пч}}}{T_{\text{пч}}p+1}\cdot\frac{2\pi}{p_{\text{н}}}\cdot\frac{\beta}{T_{\text{ем}}p+1}. \qquad (5)$$

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання струму матиме вигляд:

$$W_{\text{бс}}(p) = \frac{\frac{1}{\kappa_{\text{зс}}}}{2\cdot T_{\mu}p\cdot(T_{\mu}p+1)}. \qquad (6)$$

де $T_{\mu} =$ 0,001 с, приймає значення постійної часу перетворювача частоти, а передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку регулювання струму, знаходиться за відношенням між максимальною напругою сигналу на вході регулятора $U_{\text{рсм}}$ та величиною на виході об'єкта регулювання $I_{\text{б}}$:

$$\kappa_{\text{зс}} = \frac{U_{\text{рсм}}}{I_{\text{б}}} = \frac{10}{210} = 0{,}048. \qquad (7)$$

де $I_{\text{б}}$ приймається на 50 % більше від номінального.

Величина номінального струму асинхронного двигуна за каталогом становить 140 А, отже базисне значення струму дорівнює: $I_{\text{б}}$=140·1,5=210А.

Передавальна функція регулятора струму знаходиться за формулою:

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{T_{\text{ем}}p+1}{T_i p}. \qquad (8)$$

$$T_i = \frac{p_{\text{н}}}{4\cdot T_{\mu}\cdot\kappa_{\text{пч}}\cdot\pi\cdot\beta\cdot\kappa_{\text{зс}}} =$$

$$= \frac{3}{4\cdot 0{,}001\cdot 5\cdot 3{,}14\cdot 144{,}1\cdot 0{,}048} = 6{,}9. \qquad (9)$$

$$W_{\text{рс}}(p) = \frac{0{,}0335p+1}{6{,}9p}. \qquad (10)$$

Об'єкт регулювання швидкості складається з перетворювача частоти і асинхронного двигуна, а також редуктора і робочого механізму:

$$W_{\text{орш}}(p) = W_{\text{рш}}\cdot\frac{\frac{1}{\kappa_{\text{пч}}}}{2\cdot T_{\mu}p+1}\cdot\frac{1}{J\text{р}}\cdot W_{\text{р}}\cdot W_{\text{рм}}. \qquad (11)$$

Передавальний коефіцієнт зворотного зв'язку регулювання швидкості:

$$\kappa_{\text{зш}} = \frac{U_{\text{ршм}}}{\nu} = \frac{10}{0{,}067} = 150. \qquad (12)$$

$W_{\text{р}}(p)$ дорівнює передавальному коефіцієнту редуктора і має значення $\kappa_{\text{р}} = \frac{1}{500} = 0{,}002$.

При підключенні двох асинхронних двигунів ділить сумарну частоту обертання навпіл, тому є коефіцієнтом $K_{\text{рм}}$=0,5.

Бажана передавальна функція розімкнутого контуру регулювання швидкості матиме вигляд:

$$W_{\text{бш}}(p) = W_{\text{рш}} \cdot \frac{\frac{1}{\kappa_{\text{зш}}}}{4 \cdot T_{\mu}\, p\,(T_{\mu}\, p + 1)}. \qquad (13)$$

$$W_{\text{рш}}(p) = \frac{\kappa_{\text{зс}} \cdot J \cdot 3 \cdot \kappa_{\text{рм}}}{8 \cdot T_{\mu} \cdot \kappa_{\text{зш}} p \cdot \pi \cdot p_{\text{н}} \cdot \kappa_{\text{р}}} =$$

$$= \frac{0{,}048 \cdot 18{,}24 \cdot 3 \cdot 0{,}5}{8 \cdot 0{,}001 \cdot 150 \cdot 3{,}14 \cdot 3 \cdot 0{,}002} = 58{,}09. \qquad (14)$$

Передавальна функція виконавчого механізму отримує на вході значення частоти обертання електроприводу і формує на виході висоту шару котунів:

$$W_{\text{вм}}(p) = \frac{h_{\text{з}}}{\nu} = \frac{400}{0{,}067} = 5970{,}15. \qquad (15)$$

де $h_{\text{з}}$ = 400 мм.

Формула для знаходження передавальної функції зворотного зв'язку по висоті шару:

$$W_{\text{зв}}(p) = \frac{U_{\text{звм}}}{h_{\text{з}}} = \frac{10}{400} = 0{,}025. \qquad (16)$$

Передавальна функція конвеєрних вагів має вигляд:

$$W_{\text{кв}}(p) = K_{\text{кв}} = \frac{U_{\text{КВМ}}}{q_{\text{квм}}} = \frac{10}{85} = 0{,}118. \qquad (17)$$

де $U_{\text{квм}}$ =10 В; $q_{\text{квм}}$ = 85 кг/с [33].

У моделі (рис. 1) блок *ПРОДУКТИВНІСТЬ* генерує випадкові числа у межах від 55 до 85 кг тривалістю в секунду, моделюючи зміну продуктивності КМ. Блок *КВ* моделює передавальну функцію конвеєрних вагів на основі розрахунків за формулою (17). Блок *ЗАТРИМКА* формує затримку, значення якої приймається в секунду. Ця затримка виникає через те, що конвеєрні ваги розташовані на відстані від краю КМ, тобто потрібен час щоб котуни з позиції вимірювання ваги потрапили на край конвеєра. Також, варто врахувати те, що існує збірний конвеєр, розміщений над конвеєрною стрічкою, що складається з візків КМ, і тому виникає додаткова затримка, що дорівнює часу падіння котунів зі конвеєра на візки. Блок ЗАДАТЧИК формує сигнал задатчика висоти шару у межах від 0 до 10 В для моделювання напруги, яка виникає при переміщенні повзунка на панелі керування висотою шару котунів. Блок *РІЗНИЦЯ* знаходить значення різниці між сигналом блоків *ЗАДАТЧИК* та *МАКС-ЗАД*, значення якого дорівнює 10 В. Блок *РІЗНИЦЯ* інвертує сигнал задатчика у межах від 0 до 10 В, оскільки це необхідно для правильного керування електроприводом. Блок *ЗВИС* моделює зворотній зв'язок по висоті шару котунів. Розрахунок даного блоку виконано за формулою (16). Блок *РВ* моделює регулятор висоти у вигляді Р-регулятора. Значення регулятора висоти обчислюються з використанням компонента програми Simulink – Tune. Блок *ЗШВ* моделює зворотній зв'язок по швидкості. Розрахунок даного блоку наведено у формулі (12). Розрахунок блоку регулятора швидкості *РШ* здійснюється за формулою (14). Сигнал із регулятора швидкості потрапляє на дві однакові лінії на блоки *РС*1 та *РС*2, які моделюють регулятори струму на основі формули (10). Блоки *ЗС*1 та *ЗС*2 моделюють зворотній зв'язок по струму на основі формули (6), при чому блоки під'єднані до протилежних ліній для синхронізації електродвигунів. Блоки перетворювачів частот ПЧ1 та ПЧ2 моделюють зміну сигналу за законом, обчисленим у формулі (4). Блоки перетворення *П*1 та *П*2 моделюють перетворення частоти напруги живлення в частоту обертання двигунів. Групи блоків *МД*1, *Мс*1, *М*1 *та МД*2, *Мс*2, *М*2, охоплені зворотними зв'язками, моделюють передавальні функції асинхронних електродвигунів.

Блоки *МД*1, *МД*2 моделюють електромагнітні складові двигунів, блоки *Мс*1, *Мс*2 формують статичний момент, а блоки *М*1 та *М*2 утворюють механічні ланки. Блоки *Р*1, *Р*2 визначають функцію роботи редуктора, що враховує передавальне число. Блок робочого механізму *РМ* моделює привідну зірку конвеєра випалювальних візків. Зірка ділить сумарну частоту обох асинхронних двигунів навпіл.

Блок виконавчого механізму *ВМ* моделює перетворення частоти обертання привідної зірки у висоту шару котунів, розраховується за формулою (15). Блок *ПТ* перетворює частоту обертання зірки у швидкість конвеєра. Елемент *ЕКРАН* показує графік зміни продуктивності КМ та перехідний процес швидкості випалювальних візків.

Для доцільності удосконалення АСУТП фабрики огрудування за рахунок використання регулювання швидкості руху випалювальних візків розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи, що працює в реальному часі та дає можливість оперативного диспетчерського управління. Оскільки у системах автоматизованого управління провідні фабрики оґрудкування використовують інструментальну систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулювання висоти шару котунів доцільно розробляти з використанням SCADA TRACE MODE 6 [8, 27–28].

Інструментальна система TRACE MODE 6 – це універсальний засіб розробки та налагодження програм для автоматизованих систем управління технологічними процесами і управління виробництвом. Вона складається з інтегрованого середовища розробки та налагоджувального монітору реального часу – профайлера. Інструментальна система інсталюється на робочому місці розроб-

ника АСУТП. У ній створюється набір файлів, які називаються проектом TRACE MODE.

Інтегроване середовище включає повний набір засобів розробки систем автоматизації технологічних процесів, та управління бізнес-процесами виробництва. Доступні засоби створення: операторського інтерфейсу SCADA, розподілених систем керування, промислової бази даних реального часу, програм для промислових контролерів. За допомогою виконавчих модулів TRACE MODE проект АСУТП запускається на виконання в реальному часі. TRACE MODE дозволяє створювати проект відразу для декількох виконавчих модулів – вузлів проекту. Кожному вузлу проекту відповідає одна інсталяція виконавчого модуля. Окрім цього, інтегроване середовище розробки дозволяє поступово нарощувати функціональність АСУТП, починаючи з простого моніторингу та візуалізації технологічного процесу на одному персональному комп'ютері SCADA/HMI і закінчуючи реалізацією складних контурів управління, організацією розподілених обчислень, підключенням додаткових робочих місць і економічних модулів: облік і технічне обслуговування обладнання, облік і управління персоналом та управління виконанням виробництва.

Перевагами даної SCADA-системи також є те, що в систему інтегровано більше десяти різних редакторів проектування автоматизованих систем керуванням виробництва та управління персоналом. Ці компоненти системи полегшують написання програми та дозволяють об'єднувати різні рівні автоматизації виробництвом без потреби використання інших програмних засобів. Крім того, система TRACE MODE на даний момент є універсальною системою, вона вміщує більше 2500 драйверів для різноманітних пристроїв та засобів автоматизації, а для тих яких немає можливість за допомогою вбудованого редактору без особливих навичок програмування написати програму драйвера.

Присутність унікальної технології автоматичної побудови автоматизованих систем дозволяє декількома рухами створити зв'язки між вузлами розподіленої системи управління, між джерелами даних SCADA і каналами, створити джерела даних за відомою конфігурації контролера та інше. При цьому, інтерфейс програми є інтуїтивно зрозумілий та простий, що дозволяє програмісту скоротити час на написання програми, а вбудовані редактори ведуть постійну перевірку програми, забезпечуючи безпомилковість написання програми [16–22].

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

На основі даних та розрахунків у графічному середовищі Simulink, що входить в пакет для числового аналізу MATLAB, побудовано математичну модель системи регулювання швидкістю випалювальних візків КМ, що відповідно до технологічного процесу забезпечує керування висотою шару котунів і в результаті продуктивністю КМ.

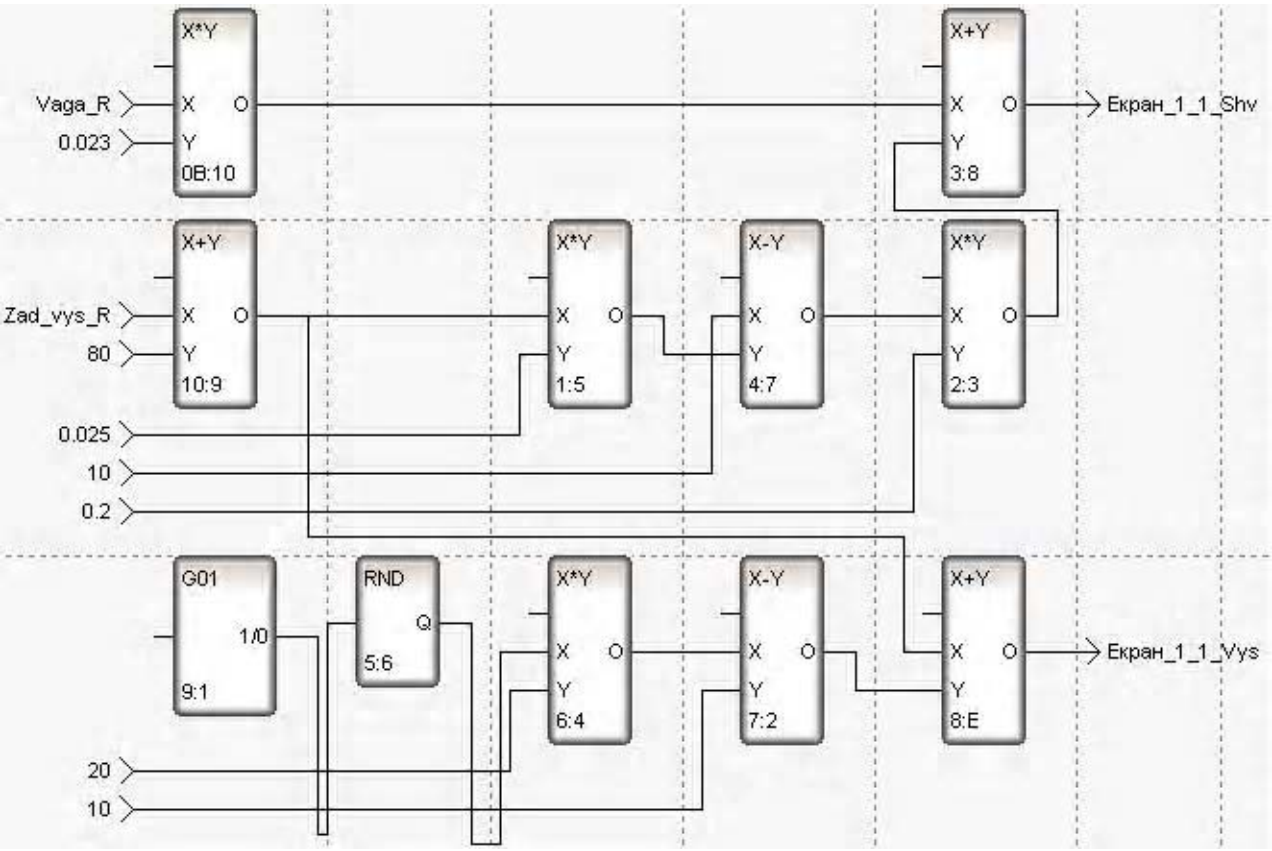
Запропонована система та розроблене для неї програмне забезпечення використовувалося для дослідження протікання технологічного процесу при управлінні швидкістю випалювальних візків і визначення можливості практичного застосування на фабриках огрудування. Для побудови моделі процесу регулювання висоти шару котунів при зміні швидкості переміщення візків проведені розрахунки передавальних функцій елементів моделі, використовуючи вихідні дані випалювальних машин ОК-306 та LURGI-278 [6, 29, 33].

Для демонстрації роботи інтерфейсу SCADA-системи розроблено програмне забезпечення з використанням SCADA TRACE MODE 6. Програма написана графічною мовою програмування FBD та зображена на рис. 2а. Окремо створені канали зв'язку для передачі даних між програмою та екраном, які показані на рис. 2б. Вхідна змінна програми Zad_vys_R отримує по каналу Zad_vys значення висоти шару, виставлене на шкалі повзунком поля «Задатчик висоти шару сирих котунів, мм» екрану. Вхідна змінна Vaga_R по каналу Vaga отримує значення продуктивності, згенеровано випадково у межах від 55 до 85 кг.

Програма виконує алгебраїчні операції над вхідними змінними, генерує похибку, яка для даної системи регулювання приймається в межах 10 мм, для моделювання виміряних даних датчиком висоти, формує вихідні сигнали Екран_1_1_Shv, Екран_1_1_Vys, які по каналам Shv, Vys потрапляють на екран у поля «Швидкість конвеєра палет, м/хв» та «Висота шару котунів, мм».

Кожен канал передачі даних має свої параметри, налаштування та обмеження. Канал Vaga передає дані про продуктивність КМ у програму та на екран. Зображення налаштувань каналу наведене на рис. 3,а. У полі ВП встановлюється значення верхньої межі каналу 85 кг, а в поле НП встановлюється значення нижньої межі 55 кг. При демонстрації роботи системи на цей канал подаються дані з генератора випадкових чисел, який генерує число у межах від 0 до 100 кожної секунди. У полі обробки даних встановлені параметри множника 0,3 та зміщення 55. Ці параметри розраховані за формулою у полі масштабування для переведення значень генератора у межах 0–100 В значення ваги у межах 55–85 кг. У полі розмірність для каналу Vaga обрано значення кг. Параметри каналу Vys зображені на рис. 3б. Канал передає дані про висоту шару котунів на конвеєрі у програму та на екран. Значення поля ВП встановлене у 390, оскільки максимальне значення задатчика становить 300 мм, висота постілі розраховується та приймається висотою в 80 мм, найвище значення похибки становить 10 мм, тому в сумі ці дані дають максимальне значення верхньої межі каналу 320 мм. Значення поля НП встановлене у 170 мм, оскільки при мінімальних значеннях задатчика висоти шару 100 мм, постілі 80 мм та найнижчого значення похибки 10 мм підсумкове значення нижньої межі дорівнює 170 мм. Розмірність каналу виставлена в мм. Канал Shv має параметри, зображені на рис. 3в. Його призначення – передавання даних про швидкість переміщенні випалювальних візків КМ у програму та на екран. Значення поля ВП приймається за 4, НП – 1, на основі даних аналізу КМ. Розмірність каналу має значення м/хв.

Параметри каналу Zad_vys зображено на рис. 3г. Канал призначений для передачі задатчика рівня сирих котунів із екрану до програми. Тут поля ВП та НП мають значення відповідно 300 та 100, оскільки саме на такий рівень сирих котунів розрахована машина LURGI-278. Поля ВГ та НГ приймають значення верхнього та ниж-



а

б

Рисунок 2 – Програмне забезпечення (а) і канали для передачі даних (б) SCADA-системи

нього попереджувального рівня, встановлені на рівнях 240 та 220. Оскільки номінальна висота котунів на КМ становить 320 мм, то безпечне відхилення від цього рівня приймається у межах 20 мм. ВА та НА – верхній та нижній аварійний рівень, мають значення 280 та 120. При виході установки висоти за межі цих рівнів є ризик перевантаження електроприводу. Значення розмірності каналу в мм. На старті встановлюється номінальне значення висоти 240 мм, яке можна змінювати під час роботи системи.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Проведені експерименти підтвердили працездатність і практичну застосовність запропонованої математичної моделі системи автоматичного регулювання швидкістю випалювальних візків КМ. У результаті моделювання получено перехідні процеси зміни продуктивності КМ при регулювання швидкості візків КМ. Графіки вхідних і вихідних сигналів, зображено на рис. 4.

З отриманих графіків видно, що в залежності від зміни продуктивності КМ змінюється швидкість переміщення візків зі встановленою затримкою. При сигналі на задатчику 8В, що відповідає виставленій висоті рівня 240 мм без постілі, швидкість електроприводу, а відповідно і швидкість переміщення візків, регулюється в межах від 3,2 до 3,8 м/с.

При проведені моделювання встановлено значення регулятора висоти шару котунів у випалювальних візках, воно дорівнює 1,051. Це значення обчислене з використанням компонента програми Simulink – Tune. Коефіцієнти блоків перетворення *П*1 та *П2* моделюють перетворення частоти напруги живлення в частоту обертання асинхронних двигунів і мають значення 2,09, а значення блоків *Р*1, *Р2,* що визначають функцію роботи редуктора, яка враховує передавальне число, становить 0,002. Блок робочого механізму *РМ* моделює привідну зірку конвеєра та її передавальна функція становить 0,5, а блок *ПТ,* що перетворює частоту обертання зірки у швидкість конвеєра, має значення 60.

Приклад роботи SCADA-системи зображено на рис. 5. У верхній частині екрану зображено конвеєр палет та збірний конвеєр у горизонтальній площині. На основі попередньо зроблених розрахунків, продуктивність КМ коливається у межах 55–85 кг/с. Над зображенням конвеєра випалювальних візків розміщено поле «Висота шару котунів, мм». У нього виводиться значення висоти шару котунів, виміряна датчиком рівня. Значення може коливатись у межах 170–390 мм, у залежності від заданого рівня, з урахуванням висоти шару постілі, яка становить 80 мм, та похибки, величиною 10 мм. Під зображен-

Рисунок 3 – Налаштування каналів Vaga (а), Vys (б), Shv (в) і Zad_vys (г)

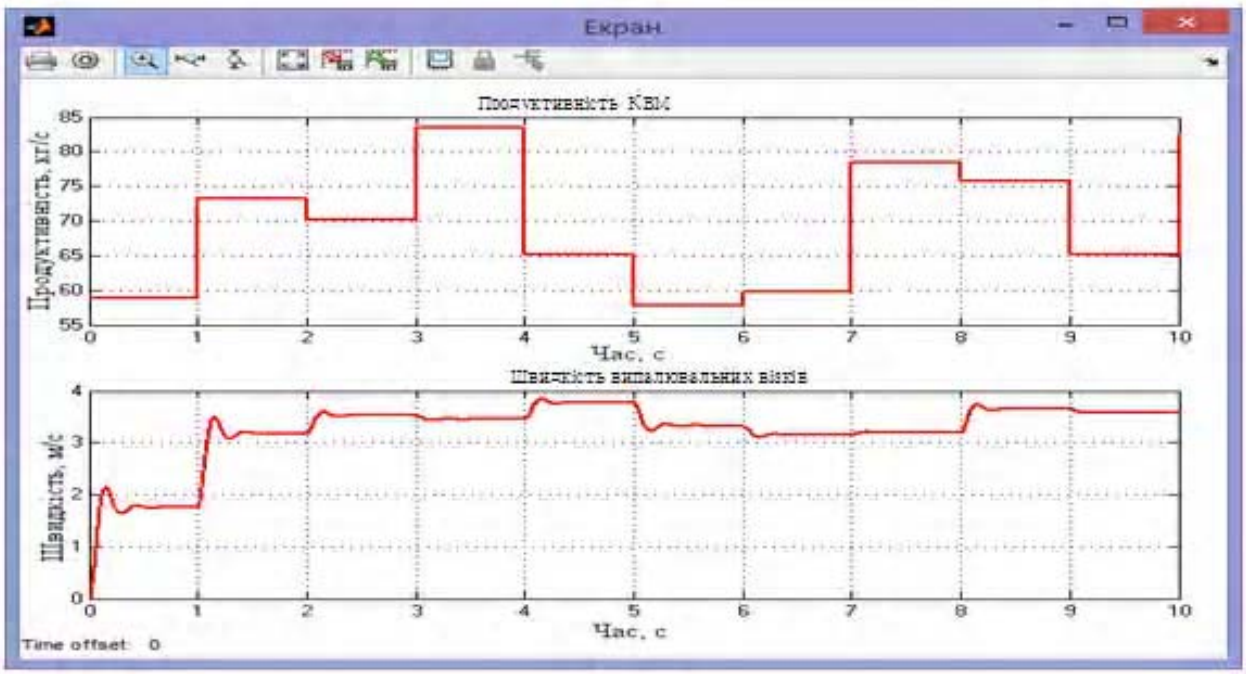


Рисунок 4 – Перехідні процеси продуктивності КМ і регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках КМ

ням конвеєра візків знаходиться поле «Швидкість руху випалювальних візків, м/хв», яке показує значення швидкості візків на основі даних, виміряних датчиком швидкості. Швидкість не перевищує 4 м/с і змінюється в залежності від продуктивності. У нижній частині екрану знаходиться поле «Задатчик висоти шару сирих котунів, мм» із елементом керування у вигляді повзунка зі шкалою. Номінальне значення висоти шару котунів становить 320 мм, з яких 80 мм складає висота постілі, тому дана область на шкалі має зелений колір. Аварійна висота шару, коли є ризик перевантаження електроприводу, на шкалі має червоний колір. У полі жовтого кольору дублюється значення заданої висоти.

На графіку рис. 5 в нижній частині екрану динамічно виводиться значення продуктивності, висоти шару котунів та швидкості випалювальних візків лініями зеленого, червоного та синього кольору відповідно. Вертикальна шкала з лівого краю графіка показує розмірність відображеної величини в залежності від обраного сигналу в нижній частині графіка. Горизонтальна шкала показує час вимірювання параметрів.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз результатів моделювання показав, що запропонована модель забезпечує виконання наступних технічних вимог, що пред'являються до КМ, а саме: регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках зміною швидкості конвеєра, при цьому максимальна висота шару, включаючи постіль, складає 400 мм і коливається у межах, що не перевищують 3%. Максимальна швидкість руху випалюваних візків КМ складає 4 м/хв. Регулювання відбувається на основі аналізу вантажопотоку конвеєра. Кількість котунів на випалювальних візках коливається у межах 20 % при продуктивності 250 т/год, що складає приблизно 55–85 кг/с.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне завдання автоматизації – регулювання швидкості переміщення випалювальних візків вздовж технологічних зон конвеєрної машини, що забезпечує по умовам експлуатації потрібну висоту шару котунів на візках і максимальну продуктивність КМ. Для дослідження технологічних процесів на КМ розроблена математична модель системи автоматичного регулювання швидкості випалювальних візків конвеєрної машини. Для цього використано графічне середовище імітаційного моделювання Simulink пакету для числового аналізу MATLAB.

Для оперативного диспетчерського управління технологічним процесом фабрики огрудкування розроблена сучасна модель інтерфейсу SCADA-системи для регулювання висоти шару котунів на випалювальних візках і продуктивності КМ з використанням інструментальної системи SCADA TRACE MODE 6. Результати досліджень SCADA-системи регулювання висоти шару котунів на візках і продуктивності конвеєрної машини LURGI-278 показало її працездатність, що вказує на можливість використання в промислових умовах. Запропо-

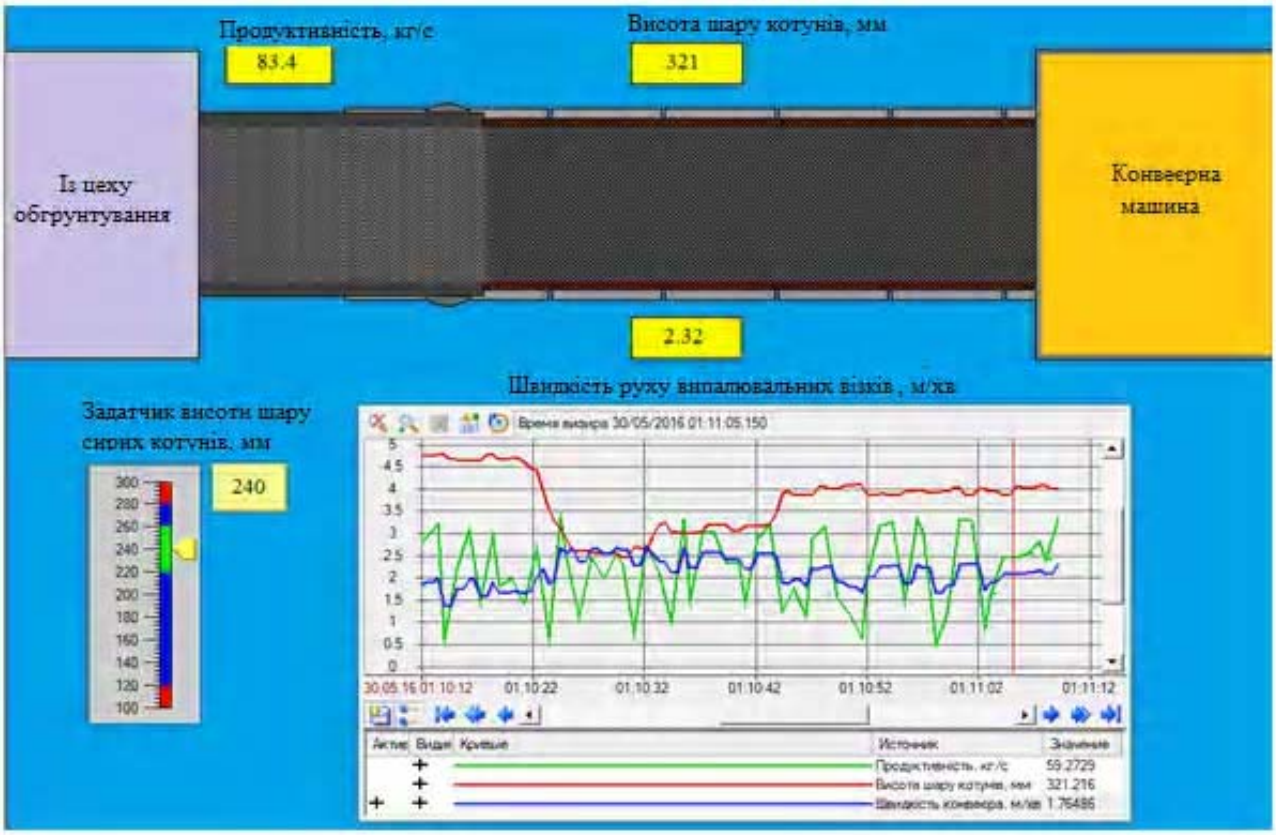


Рисунок 5 – Приклад роботи SCADA-системи при регулюванні висоти шару котунів на випалювальних візках КМ

нована система необхідна для забезпечення виконання технічних вимог при випалюванні котунів на КВ і комфортної роботи оператора з отриманими даними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Пирматов Д. С. Математическая модель тепловой обработки окатышей в обжиговой машине / Д. С. Пирматов // Сборник трудов всероссийской конференции : Новые технологии в научных исследованиях, проектировании, управлении, производстве НТ-2010. – Воронеж, 2010. – № 5 – С. 88–89.
2. Дубинина Т. П. Исследования температурного режима формирования окатышей / Т. П. Дубинина // Качество минерального сырья. – 2011. – С. 292–307.
3. Рубан С. А. Розробка принципів керування температурним режимом процесу випалювання котунів з використанням прогнозуючих ANFIS-моделей / С. А. Рубан, В. Й. Лобов // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2008. – № 1 – С. 69–74.
4. Vyacheslav Lobov Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine / Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No. 4. – P. 34–38.
5. Пирматов Д. С. Оптимизация режима термообработки окатышей в АСУ ТП конвейерной обжиговой машины/ Д. С. Пирматов, В. А. Кривоносов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 3 – С. 38–42.
6. Брагин В. В. Автоматизация процесса термообработки окатышей Лурги-278 ОАО «Северный ГОК»: научный проект / Брагин В. В. – Екатеринбург : ТОРЭКС. 2007. – 60 с.
7. Бережной Н. Н. Математическое моделирование температурного поля окатыша / Н. Н. Бережной, В. М. Серебреников, А. В. Зайцев // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг : КТУ, 2008. – Вип. 20. – С. 188–193.
8. SCADA TRACE MODE в АСУТП обогащения руды Северного ГОКа (Кривой Рог) [Електронний ресурс] // AdAstra Research Group, Ltd. – 2015. – Режим доступу до ресурсу: www.tracemode.ua/apps/news/gok_obogashenie/.
9. Чумак А. С. Дискретная система нечеткого управления электроприводом обжиговой машины/ А. С. Чумак, М. Г. Данилова // Журнал Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 9 – С. 95–97.
10. Чумак А. С. Дискретная система нечеткого управления электроприводом обжиговой машины / А. С. Чумак, М. Г. Данилова // Журнал Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – № 9 – С. 95–97.
11. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя [Електронний ресурс]: electrono.ru/elektricheskie-mashiny/regulirovanie-chastoty-vrashheniya-asinxronnogo-dvigatelya. – Назва з екрану.
12. Система управляемый преобразователь – асинхронный двигатель [Електронний ресурс]: http://model.exponenta.ru/epivod/glv_050.htm. – Назва з екрану.
13. schneider-electric.com.au: Modernize your Monitor Pro software with less risk, less cost and less effort [Електронний ресурс]: schneider-electric.com.au/documents/product-services/en/services/field-services/monitor-pro-modernization-brochure.pdf. – Назва з екрану.
14. fiord.com: Перенос решений из SCADA [Електронний ресурс]: www.fiord.com/images/industry_avt/soft/pcvue/2015%2010%20-%20Migration%20Factory%20Link%20Ru.pdf. – Назва з екрану.
15. wonderware.kz: Описание программного обеспечения [Електронний ресурс]: wonderware.kz/pdf/Wonderware_InTouch_1015.pdf. – Назва з екрану.
16. Швецов Д. SCADA-система GENESIS32 в сквозной автоматизации производства // ИСУП. – 2007. – № 4. – 5 с.
17. Демида Б. Реалізація принципів паралельного збору інформації на прикладі SCADA- системи «TraceMode» / Б. Демида, Д. Зербіно, Д. Пелешко // Вісник Нац. ун-ту «Львівська політехніка» «Комп'ютерні науки та інформаційні технології». – 2005. – № 543. – С. 3–10.
18. adastra.ru: ТРЕЙС Моуді – інтегрована SCADA-і soft logic-система для розробки АСУТП [Електронний ресурс]: adastra.ru. – Назва з екрану.
19. Кузнєцов А. Genesis for Windows – графічна SCADA-система для розробки АСУ ТП // Сучасні технології автоматизації. – 1997. – № 3. – С. 37–41.
20. schneider-electric.com: SCADA Systems [Електронний ресурс]: http://www.schneider-electric.com/solutions/ww/fr/med/20340568/application/pdf/1485_se-whitepaper-letter-scadaoverview-v005.pdf. – Назва з екрану.
21. The Fundamentals of SCADA / Bentley Systems, Incorporated. 2004. – 18 p.
22. Barnes Ken. Review of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems / Ken Barnes, Briam Johnson, Reva Nickelson // Idaho National Engineering and Environmental Laboratory. – 2004. – P. 76.
23. Алексеев М. А. Методы повышения надежности распределенных SCADA систем управления авиацией и ПВО ВС Украины / М. А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Новітні технології – для захисту повітряного простору : восьма наукова конференція Харківського Університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 18–19 квітня 2012 р.: тези доповідей. – Харків : ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 46 –47.
24. Андреев Е. Б. SCADA-системы: взгляд изнутри / Е. Б. Андреев, Н. А. Куцевич, О. В. Синенко. – М. : Издательство «РТСофт», 2004. –176 с.
25. Куцевич Н.А. SCADA-системы. Взгляд со стороны // Промышленные АСУ и контроллеры. – 1999. – № 1. – 4 с.
26. adastra.ru: Крупнейший металлургический завод Китая выбирает TRACE MODE [Електронний ресурс]: www.adastra.ru/news/20040419/. – Назва з екрану.
27. TRACE MODE 6: Интегрированная среда разработки [Електронний ресурс]: http://www.adastra.ru/products/dev/. – Назва з екрану.
28. Trace Mode 6 Быстрый старт. Руководство пользователя. – М. : AdAstra Research Group, Ltd, 2006. – 114 с.
29. Спиваковский А. О. Транспортирующие машины : учеб. пособие для машиностроительных вузов. 3-е изд., перераб. / А. О. Спиваковский, В. К. Дьячков. – М. : Машиностроение, 1983. – С. 487.
30. Масандилов Л. Б. Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. 2-е изд., перераб. и доп. / Л. Б. Масандилов, В. В. Москаленко. – М. : Энергия, 1978. – 96 с.
31. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування : підручник / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – К. : Либідь, 1997. – 544 с.
32. Валюх О. А. Елементи теорії автоматичного керування : навчальний посібник / О. А. Валюх, В. М. Максимів. – Львів : Афіша, 2002. – 123 с.
33. Бессараб В. И. Проектирование и эксплуатация оборудования фабрик окомкования : справ. изд. / В. И. Бессараб. – Металлургия, 1986. – С. 15.

Стаття надійшла до редакції 13.12.2016.
Після доробки 16.01.2016.

Лобов В. И.[1], Лобова К. В.[2]
[1]Канд. техн. наук, доцент кафедры информатики, автоматики и систем управления ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина
[2]Студентка ГВУЗ «Криворожский национальный университет», Кривой Рог, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СКОРОСТЬЮ ОБЖИГОВЫХ ТЕЛЕЖЕК КОНВЕЙЕРНЫХ МАШИН

Актуальность. Решена актуальная задача разработки современных математических моделей для исследования регулирования скоростью обжиговых тележек конвейерной машины, которая позволяет поддерживать заданный уровень высоты слоя окатышей и обеспечивает оптимальный технологический процесс по обжигу окатышей и максимальную производительность.

Цель работы – представление результатов разработки математической модели для регулирования скорости обжиговых тележек конвейерной машины с реализацией современной SCADA-системы для управления производительностью конвейерной машины путем регулирования скорости перемещения ее обжиговых тележек, которая приводит к изменению высоты слоя окатышей на этих тележках.

Метод. Для оценки динамических характеристик системы электропривода и моделирования регулирования скорости перемещения обжиговых тележек конвейерной машины используется мощный и универсальный метод исследования – графическая среда имитационного моделирования Simulink, который является приложением к пакету для численного анализа MATLAB. При моделировании с использованием Simulink используется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты.

Результаты. В предлагаемой математической модели используются исходные данные конвейерных машин ОК-306 и LURGI-278. Для построения математической модели автоматизированной системы регулирования скорости перемещения обжиговых тележек конвейерной машины выполнены расчеты передаточных функций элементов, входящих в эту систему. В математической модели асинхронный двигатель представлен упрощенной механической и электромагнитной звеньями с обратной связью по скорости, котрые определенны передаточными функциями. В результате моделирования получены переходные процессы при регулировке высоты слоя окатышей на обжиговых тележках и определено их влияние на производительность конвейерной машины.

Для целесообразности совершенствования АСУТП фабрики окомкования за счет использования математической модели для регулирования скорости движения обжиговых тележек разработана современная модель интерфейса SCADA-системы, которая работает в реальном времени, и дает возможность оперативного диспетчерского управления. Поскольку в системах автоматизированного управления ведущие фабрики окомкования используют инструментальную систему SCADA TRACE MODE 6, то систему регулирования высоты слоя окатышей целесообразно разрабатывать с использованием SCADA TRACE MODE 6.

Выводы. На основе использования выходных данных технологического процесса обжига окатышей на конвейерной обжиговой машине и выполненных расчетов в графической среде Simulink MATLAB построена математическая модель системы для регулирования скорости обжиговых тележек конвейерной машины в соответствии с технологическим процессом позволяет исследовать влияние на процесс обжига окатышей за счет управления высоты слоя окатышей и производительность конвейерной машины.

Предложенную современную модель интерфейса SCADA-системы, которая работает в реальном времени и дает возможность оперативного диспетчерского управления, может быть использовано в реальных промышленных условиях.

Ключевые слова: фабрика окомкования, конвейерная машина, обжиговые тележки, окатыши, скорость, математическая модель, SCADA-система, результаты моделирования.

Lobov V. Y.[1], Lobova K. V.[2]
[1]PhD, Associate Professor of the Department Informatics, Automation and Control Systems SHEI “Kryvyi Rih National University”, Kryvyi Rih, Ukraine
[2]Student SHEI “Kryvyi Rih National University”, Kryvyi Rih, Ukraine

MODELING SYSTEM OF AUTOMATIC SPEED REGULATION OF CONVEYOR MACHINES ROASTING TRUCKS

Context. Resolves an an actual task of developing advanced mathematical models to study regulation of the roasting trucks speed of the conveyor machine that allows to maintain a predetermined level of height pellet layer and provides optimal process for firing pellets and maximum performance

Objective is a presentation of the mathematical model development results for the regulation roasting trucks speed of the conveyor machine with implementation modern SCADA-system for controlling the conveyor machine performance by regulating its moving speed roasting trucks, which leads to a change of height of the pellet layer on the trucks.

Method. To evaluate the dynamic characteristics of the drive system and the simulation control the speed of movement of the roasting trucks conveyor machine uses a powerful and universal method of research – graphical environment Simulink simulation modeling, which is a supplement to the package MATLAB for numerical analysis. When using Simulink simulation uses the principle of visual programming, in accordance with which the user on the screen of the library of standard blocks and creates a device model performs calculations.

Results. The proposed mathematical model used baseline data of conveyor machines OK-306 and LURGI-278. To construct a mathematical model of the automated speed control system for moving the roasting trucks conveyor machines have calculated transfer functions of elements included in the system. As a result of simulation obtained transients when adjusting the height of the pellet layer on the roasting carts and determine their impact on the performance of the conveyor machine.

For the feasibility of improving the control system pelletizing plant by the use of a mathematical model for the regulation of the speed of roasting trucks designed modern model interface SCADA-system that works in real time, and enables operational dispatch management. As the SCADA TRACE MODE 6, the height of the pellet layer control system should be developed using SCADA TRACE MODE 6 pelletizing plant systems leading automated management tool using the system.

Conclusions. On the basis of the use of the output of the technological process of roasting of the pellets on the conveyor of the burning car and the calculations in a graphical environment Simulink MATLAB built a mathematical model of the system for controlling the speed of the roasting trucks conveyor machine in accordance with technological process allows to investigate influence on pellet burning process by controlling the height of the pellet layer and the performance of the conveyor machine.

The proposed model of a modern SCADA-system interface that works in real time and enables operational dispatch management, can be used in real industrial environments.

Keywords: pelletizing factory, conveyor machine, roasting trucks, pellets, speed, mathematical model, SCADA-system simulation, the simulation results.

REFERENCES

1. Pirmatov D. S. Matematicheskaya model' teplovoy obrabotki okatyshey v obzhigovoy mashine [Tekst], *Sbornik trudov vserossiyskoy konferentsii: Novyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proyektirovanii, upravlenii, proizvodstve NT-2010*. Voronezh, 2010, No. 5, pp. 88–89.
2. Dubinina T. P. Issledovaniya temperaturnogo rezhima formirovaniya okatyshey, *Kachestvo mineral'nogo syr'ya*, 2011, pp. 292–307.
3. Ruban S. A., Lobov V. Y. Rozrobka printsipiv keruvannya temperaturnim rezhimom protsesu vipalyuvannya kotuniv z vikoristannyam prognozuyuchikh ANFIS-modeley [Tekst], Radio Electronics, Computer Science, Control, 2008, No. 1, pp. 69–74.
4. *Vyacheslav Lobov, Karina Lobova, Mykhailo Koltiar* Investigation of temperature distribution along the height of the layer of pellets on conveyor roasting machine, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 4, pp. 34–38.
5. Pirmatov D. S., Krivonosov V. A. Optimizatsiya rezhima termoobrabotki okatyshey v ASU TP konveyyernoy obzhigovoy mashiny, *Inzhenernyy vestnik Dona*, 2013, No. 3, pp. 38–42.
6. Bragin V. V. Avtomatizatsiya protsessa termoobrabotki okatyshey Lurgi-278 OAO «Severnyy GOK»: nauchnyy proyekt. Yekaterinburg, TOREKS. 2007, 60 p.
7. Berezhnoy N. N., Serebrenikov V. M., Zaytsev A. V. Matematicheskoye modelirovaniye temperaturnogo polya okatysha, *Vìsnik Krivoriz'kogo tekhnichnogo universitetu: Zb. nauk. prats'*. Kriviy Rig: KTU, 2008, Vip. 20, pp. 188–193.
8. SCADA TRACE MODE v ASUTP obogashcheniya rudy Severnogo GOKa (Krivoy Rog) [Yelektronniy resurs], *AdAstra Research Group, Ltd*, 2015. Rezhim dostupu do resursu: www.tracemode.ua/apps/news/gok_obogashenie
9. Chumak A. S., Danilova M. G. Diskretnaya sistema nechetkogo upravleniya elektroprivodom obzhigovoy mashiny, *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 9, pp. 95–97.
10. Chumak A. S., Danilova M. G. Diskretnaya sistema nechetkogo upravleniya elektroprivodom obzhigovoy mashiny, *Zhurnal Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2012, No. 9, pp. 95–97.
11. Regulirovaniye chastoty vrashcheniya asinkhronnogo dvigatelya [Yelektronniy resurs]: electrono.ru/elektricheskie-mashiny/regulirovanie-chastoty-vrashheniya-asinxronnogo-dvigatelya. Nazva z yekranu
12. Sistema upravlyayemyy preobrazovatel' – asinkhronnyy dvigatel' [Yelektronniy resurs]: http://model.exponenta.ru/epivod/glv_050.htm. Nazva z yekranu.
13. schneider-electric.com.au: Modernize your Monitor Pro software with less risk, less cost and less effort [Yelektronniy resurs]: schneider-electric.com.au/documents/product-services/en/services/field-services/monitor-pro-modernization-brochure.pdf. Nazva z yekranu.
14. fiord.com: Perenos resheniy iz SCADA [Yelektronniy resurs]: www.fiord.com/images/industry_avt/soft/pcvue/2015%2010%20%20Migration%20Factory%20Link%20Ru.pdf. Nazva z yekranu.
15. wonderware.kz: Opisaniye programmnogo obespecheniya [Yelektronniy resurs]: wonderware.kz/pdf/Wonderware_InTouch_1015.pdf. Nazva z yekranu.
16. Shvetsov D. SCADA-sistema GENESIS32 v skvoznoy avtomatizatsii proizvodstva, ISUP, 2007, No. 4, 5 p.
17. Demida B., Zerbino D., Peleshko D. Realizatsiya printsipiv paralel'nogo zboru informaciї na prikladi SCADA-sistemi "TraceMode", *Vиsnik Nats. un-tu "L'vиvs'ka politekhnika" "Komp'yuterni nauki ta informatssyns texnologiї"*, 2005, No. 543, pp. 3–10.
18. adastra.ru: TREYS Moudi – integrovana SCADA-i soft logic-sistema dlya rozrobki ASUTP [Yelektronniy resurs]: adastra.ru. Nazva z yekranu.
19. Kuznetsov A. Genesis for Windows – grafichna SCADA-sistema dlya rozrobki ASU TP, Suchasni tehnologii' avtomatyzacii', 1997, No. 3, pp. 37–41
20. schneider-electric.com: SCADA Systems [Yelektronniy resurs]: http://www.schneider-electric.com/solutions/ww/fr/med/20340568/application/pdf/1485_se-whitepaper-letter-scadaoverview-v005.pdf. Nazva z yekranu.
21. The Fundamentals of SCADA/ Bentley Systems, Incorporated. 2004, 18 p.
22. Barnes Ken, Briam Johnson, Reva Nickelson Review of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) Systems, *Idaho National Engineering and Environmental Laboratory*, 2004, P. 76.
23. Alekseyev M. A., Sirotkina Ye. I. Metody povysheniya nadezhnosti raspredelennykh SCADA sistem upravleniya aviatsiyey i PVO VS Ukrainy, *Novitni texnologiї tekhnologii zakhistu povitryanogo prostoru: Vos'ma naukova konferentsiya Kharkivs'kogo Universitetu Povitryanikh Sil imenн Ivana Kozheduba, 18–19 kvitnya 2012 r.: tezi dopovidey.* Kharkiv, KHUPS im. I. Kozheduba, 2012, pp. 46–47.
24. Andreyev Ye. B., Kutsevich N. A., Sinenko O. V. SCADA-sistemy: vzglyad iznutri. Moscow, Izdatel'stvo «RTSoft», 2004, 176 p.
25. Kutsevich N.A. SCADA-sistemy. Vzglyad so storony, *Promyshlennyye ASU i kontrollery*, 1999, No. 1, 4 p.
26. adastra.ru: Krupneyshiy metallurgicheskiy zavod Kitaya vybirayet TRACE MODE [Yelektronniy resurs]: www.adastra.ru/news/20040419/. Nazva z yekranu.
27. TRACE MODE 6: Integrirovannaya sreda razrabotki [Yelektronniy resurs]: http://www.adastra.ru/products/dev/. Nazva z yekranu.
28. Trace Mode 6 Bystryy start. Rukovodstvo pol'zovatelya. Moscow. AdAstra Research Group, Ltd, 2006, 114 p.
29. Spivakovskiy A. O., D'yachkov V. K. Transportiruyushchiye mashiny: Ucheb. posobiye dlya mashinostroitel'nykh vuzov. 3-ye izd., pererab. Moscow, Mashinostroyeniye, 1983, P. 487.
30. Masandilov L. B., Moskalenko V. V. Regulirovaniye chastoty vrashcheniya asinkhronnykh dvigateley. 2-ye izd., pererab. i dop. Moscow, Energiya, 1978, 96 p.
31. Popovich M. G., Koval'chuk O. V. Teorнya avtomatichnogo keruvannya: Pidruchnik. Kiev, Libid', 1997, 544 p.
32. Valyukh O. A., Maksimiv V. M. Yelementi teorii avtomatichnogo keruvannya. Navchal'niy posibnik. L'viv, Afisha, 2002, 123 p.
33. Bessarab V. I. Proyektirovaniye i ekspluatatsiya oborudovaniya fabrik okomkovaniya : sprav. Izd. Metallurgiya, 1986, P. 15.

УДК 62-503.57

Хобін В. А.[1], Левінский М. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна
[2]Аспірант кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна

ПРИНЦИПИ, АЛГОРИТМИ І РЕЗУЛЬТАТИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ТИПУ

Актуальність. Самоналагодження параметрів регуляторів є актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу, тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання в замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування діапазон його зміни може перевищувати значення десять. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у системі з такими об'єктами, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

Мета. Підвищення ефективності самолагоджувальної системи керування, яка для ідентифікації змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування використовує складову власного руху.

Метод. Пропонується вдосконалення принципів і алгоритмів роботи самолагоджувальної системи, які підвищують її стійкость і динамічну точность. Для цього в склад вихідної системи включаються нові ланки і зв'язки. Враховуючи наявність у системі нелінійних і нестаціонарних ланок, для її дослідження обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab.

Результати. Сплановані і проведені компютерні експерименти з моделями альтернативних структур системи за умов, які наближені до реальних умов її функціонування. Проведене тестування типовими моделями змін коефіцієнта передачі об'єкта. Отримані графіки і числові показники, що характеризують ефективність роботи самоналагоджувальної системи вихідної і удосконаленої структур.

Висновки. Для підвищення стійкості і динамічної точності системи необхідно зменшити інерційність її контуру самоналагодження, вплив фазових зрушень фільтрованих змінних у цьому контурі на формування оцінок імовірносних характеристик, а також вплив коефіцієнта передачі об'єкта на похибку регулювання контуру самоналагодження.

Ключові слова: самоналагоджувальна САК, коефіцієнт передачі, власний рух, смуговий фільтр, оптимальний параметричний синтез.

НОМЕНКЛАТУРА

A^z – константа, яка визначає запас стійкості лінійної САР;

$\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t,\tau_{oc})$ і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t,\tau_{oc})$ – оцінки середньоквадратичних відхилень змінних на виходах обчислювачів оцінок;

$f_k(t)$ – координатні неконтрольовані збурювання;

$f_p(t)$ – параметричні неконтрольовані збурювання;

$f_n(t)$ – широкосмугові шуми;

k_o – коефіцієнт передачі ОК;

k_m – коефіцієнт передачі моделі ОК;

k_r – коефіцієнт передачі регулятора САР;

L – логічна функція перемикання;

t_n, t_{mod} – моменти часу, відповідні до початку й кінцю моделювання;

$y(t)$ – керована змінна, як функція часу t;

$y^z(t)$ – задане значення керованої змінної;

$\tilde{y}(t)$ – складова $y(t)$, яка характеризує власний рух у замкнутому контурі САР (середньочастотна);

$y_l(t)$ – складова $y(t)$, викликана координатними збуреннями $f_k(t)$ (низькочастотна);

$y_n(t)$ – складова $y(t)$, викликана шумами $f_n(t)$ (високочастотна);

$y_m(t)$ – змінна на виході моделі ОК;

$\tilde{y}_a(t)$, $\tilde{y}_{ma}(t)$ – змінні на виходах смугових фільтрів;

s – оператор диференціювання;

t_{oc} – ковзний інтервал часу усереднення змінних;

W – передатний оператор;

ω_L, ω_H – частоти зрізів смугових фільтрів у низькочастотній і високочастотній області;

σ^z – задане значення середньоквадратичного відхилення;

АЧХ – амплитудо-частотна характеристика;

ОК – об'єкт керування;

САР – система автоматичного регулювання;

САРС – САР самоналагоджувальна;

САК – система автоматичного керування;

ФНЧ – фільтр низької частоти.

ВСТУП

Питання самоналагодження було й залишається актуальним при керуванні об'єктами технологічного типу [1], тому що зміни властивостей сировини й енергоносіїв, деградація устаткування в ході технологічного процесу змінюють не тільки значення керованих змінних, але й характер власного руху систем автоматичного регулювання (САР) у замкнутому контурі. У математичних моделях такі впливи відносять до параметричних збурень і відображають їх у тому числі за допомогою змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування. Для ряду технологічних об'єктів керування (ОК) діапазон його зміни може перевищувати значення десять [2]. При цьому типові САР з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість «у малому» і переходять у позиційний режим роботи. Щоб зберегти компроміс між показниками якості й стійкістю процесів у САР такими ОК, необхідно використовувати самоналагодження параметрів регулятора.

© Хобін В. А., Левінский М. В., 2017
DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-19

Об'єкт дослідження в даній статті – самоналагоджувальна система автоматичного керування об'єктом технологічного типу.

Предмет дослідження – принципи підвищення стійкості і динамічної точності контура самоналагодження.

Мета досліджень – показати можливості вдосконалювання алгоритмів самоналагодження як способу підвищення ефективності систем керування об'єктами технологічного типу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розроблена вдосконалена структура САРС, яка представлена на рис. 1. Вона включає до свого складу елементи вихідної структури, що показані без виділення кольором і додаткові елементи, що виділені кольором. Математична модель системи, яка відповідає цій структурній схемі, представлена двома взаємозалежними системами диференціальних і алгебраїчних рівнянь: (1)–(3) – для САР і (4)–(16) – для блоку самоналагодження.

$$\begin{cases} y_o(t) = W^o(s)\cdot\big(u(t)+f_k(t)\big)\cdot k_o(t)+f_n(t), & (1)\\ y(t) = W^{lf}(s)\cdot y_o(t)+y(t=0)\,, & (2)\\ u(t) = W^r(s)\cdot e(t)\cdot k_r(t)+u(t=0)= & \\ = W^r(s)\cdot\big(y^z-y(t)\big)\cdot k_r(t)+u(t=0). & (3)\end{cases}$$

$$\begin{cases} y_m(t) = W^m(s)\cdot u(t)\,, & (4)\\ \tilde{y}_a(t) = W^{bf}(s)\cdot y(t)\,, & (5)\\ \tilde{y}_{ma}(t) = W^{bf}(s)\cdot y_m(t)\,, & (6)\\ u_L(t) = L\big(\tilde{y}_a(t),\,\tilde{y}_{ma}(t)\big), & (7)\\ \tilde{y}_k(t) = \begin{cases}\tilde{y}_a(t), u_L(t)=1\\ \tilde{y}_a(t=t_k), u_L(t)=0\end{cases}, & (8)\\ \tilde{y}_{mk}(t) = \begin{cases}\tilde{y}_{ma}(t), u_L(t)=1\\ \tilde{y}_{ma}(t=t_k), u_L(t)=0\end{cases}, & (9)\\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc},t) = \sqrt{W^{eo}(s)\cdot\tilde{y}_k^2(t)}\,, & (10)\\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc},t) = \sqrt{W^{eo}(s)\cdot\tilde{y}_{mk}^2(t)}\,, & (11)\\ \sigma_1(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc},t)\cdot u_{sd}(t)\,, & (12)\\ \sigma_2(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc},t)\cdot u_{sd}(t)\cdot k_m(t), & (13)\\ k_m(t) = W^{pr}(s)\cdot e_1(t)+k_m(t=0)= & \\ = W^{pr}(s)\cdot\big(\sigma_1(t)-\sigma_2(t)\big)+k_m(t=0), & (14)\\ u_{sd}(t) = W^{sd}(s)\cdot e_2(t)+u_{SD}(t=0)= & \\ = W^{sd}(s)\cdot\big(\sigma^z-\sigma_1(t)\big)+u_{sd}(t=0), & (15)\\ k_r(t) = A^z/k_o(t). & (16)\end{cases}$$

Ставиться завдання порівняти точність САРС вихідної структури й удосконаленої САРС за показниками

$$I_1 = \int_{t_n}^{t_{\mathrm{mod}}} e^2(t)dt \Big/ \big(t_{\mathrm{mod}}-t_n\big), \qquad (17)$$

$$I_3 = \int_{t_n}^{t_{\mathrm{mod}}} \big(k_o(t)-k_m(t)\big)^2 dt \Big/ \big(t_{\mathrm{mod}}-t_n\big). \qquad (18)$$

при впливі на систему координатних збурень $f_к(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру, тестових змін параметричних збурень $f_p(t)=k_o(t)$ лінійного, гармонійного й стрибкоподібного виду.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Як правило, нормативи й правила виконання технологічних процесів накладають обмеження на алгоритми (способи) самоналагодження [1]. Самоналагодження за рахунок подачі на систему керування штучних тестових сигналів, перевід її в розімкнутий режим або на межу стійкості часто неприйнятні, тому що виникає ризик порушень регламентів. У таких умовах, на наш погляд, кращими є алгоритми самоналагодження, які припускають пасивну ідентифікацію поточних значень змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Вона використовує природно виникаючі рухи керованої змінної $y(t)$ у замкнутому контурі системи керування при впливі на процес зовнішніх неконтрольованих координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру [4]. Така можливість з'являється завдяки тому, що для більшості ОК технологічного типу в спектральному складі керованої змінної $y(t)$ вдається виділити складову власного руху САР (її замкнутого контуру), яка проявляється у вигляді випадкових коливань середньої частоти $\tilde{y}(t)$ на тлі більш низькочастотних коливань $y_l(t)$, викликаних координатними збуреннями $f_k(t)$, і більш високочастотних коливань $y_n(t)$, викликаних шумами $f_n(t)$. Для виділення $\tilde{y}(t)$ доцільно використовувати лінійні смугові фільтри, рекомендації з вибору яких наведені в [5]. Оскільки $\tilde{y}(t)$ – випадковий процес, то змінний у часі коефіцієнт передачі $k_o(t)$ ОК будуть характеризувати не миттєві значення $\tilde{y}(t)$, а його усереднені в часі параметри, зокрема, оцінка дисперсії $\hat{D}_{\tilde{y}}\ (t_{oc},t)$, отримана на ковзному інтервалі часу t_{oc}. В [5] показано, що оцінка $\hat{D}_{\tilde{y}}\ (t_{oc},t)$ пропорційна $k_o^2(t)$ ОК. Після визначення поточних значень $k_o(t)$, може бути обчислений і коефіцієнт передачі $k_r(t)$ регулятора САР, який забезпечує заданий ступінь її стійкості. Самоналагоджувальна САР вихідної структури розглянута в [6], де досліджувався вплив змін спектрального складу координатних збурень і шумів на показники якості її роботи при різних параметрах блоку самоналагодження.

Поряд з позитивними якостями, результати моделювання САРС вихідної структури показують недостатню точність підстроювання коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Перелік причин низької точності розглянемо нижче.

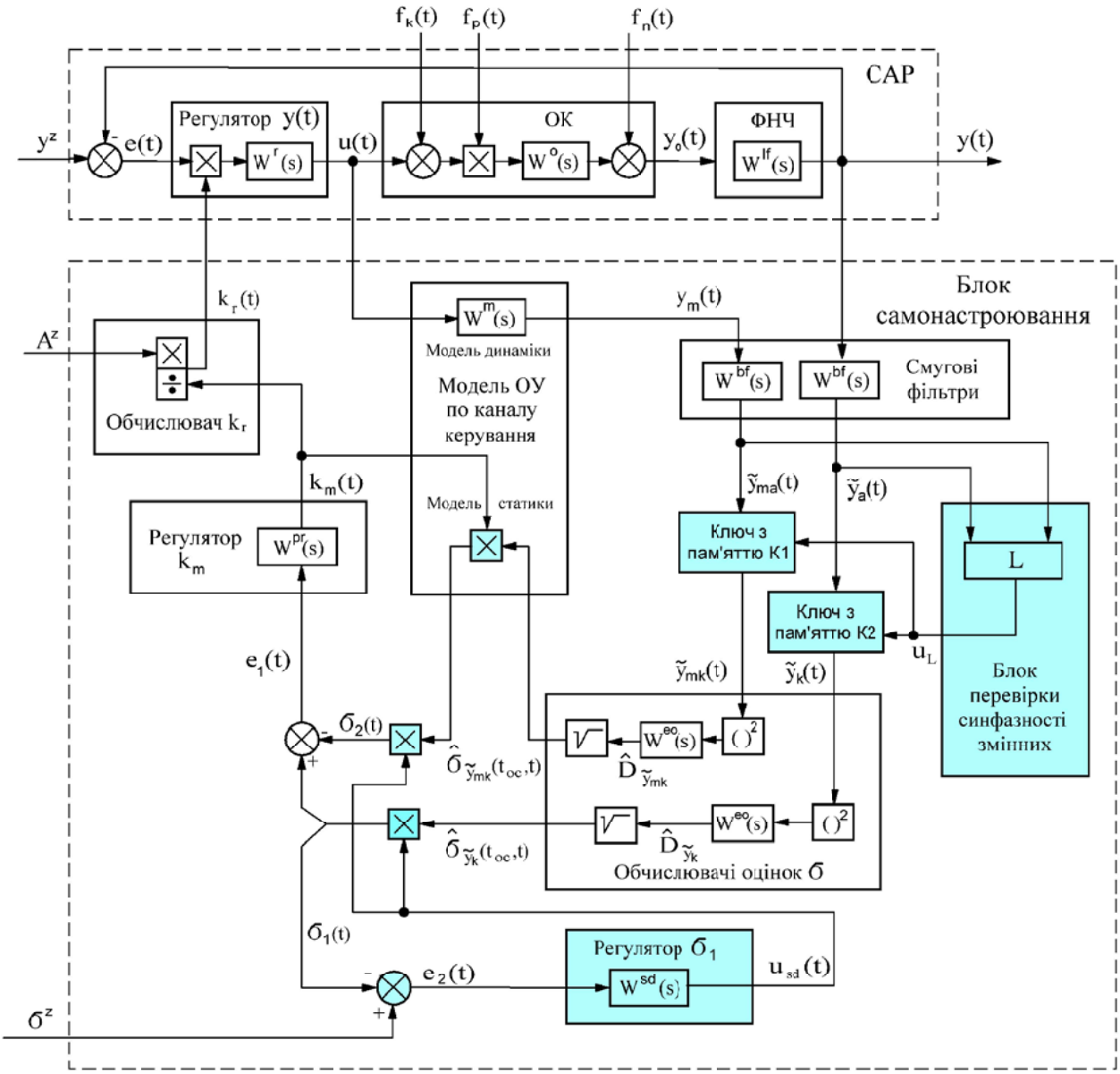


Рисунок 1 – Структурна схема САРС

Перша причина. У ланцюг зворотного зв'язку регулятора k_m входять інерційності смугових фільтрів і обчислювачів оцінок, що змушує обмежувати коефіцієнт передачі регулятора k_m для збереження стійкості контуру самоналагодження. Це неминуче позначається на точності відтворення змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК.

Друга причина. Зміна коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ не викликає фазового зрушення фільтрованих змінних ОК і його моделі $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ у часі, тому що при цьому буде змінюватися амплітуда змінних, але їх фази (знаки) залишаються однаковими. А розбіжність динамічних властивості об'єкта керування і його моделі, тобто неоднакові запізнення й інерційності викличуть фазове зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$. Крім того, у реальних умовах у складі збурень можуть з'являтися, наприклад, східчасті складові. Вони приводять до появи в складі керованої змінної $y(t)$ складових широкого спектрального складу, з яких середньочастотні складові не можуть бути відфільтровані смуговими фільтрами. Це також викликає фазові зрушення між змінними $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$. Важливо, що всі розглянуті фазові зрушення цих змінних змінюють поточну різницю оцінок $e_1(t)$ без змін при цьому коефіцієнта передачі об'єкта керування. САРС вихідної структури не враховує природу появи поточної різниці $e_1(t)$, а саме виникла вона в результаті зміни коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта або в результаті фазових зрушень змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$. Це й зменшує точність визначення коефіцієнта передачі $k_m(t)$ моделі об'єкта керування.

Третя причина пов'язана із змінним коефіцієнтом передачі контуру самоналагодження. При зменшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування зміни керованої змінної $y(t)$, викликані змінами і збурень і керуючих впливів, зменшуються. А це приводить до зменшення абсолютних значень поточної різниці оцінок $e_1(t)$. У випадку збільшення коефіцієнта передачі об'єкта різниця,

навпаки – збільшується. Т.ч., у САРС вихідної структури при змінах коефіцієнта передачі об'єкта $k_o(t)$ змінюється коефіцієнт передачі контуру самоналагодження. При високих коефіцієнтах передачі контуру самоналагодження процеси в ньому будуть мати високу коливальність, а при низьких – будуть повільними. Це, в обох випадках, знижує точність визначення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ об'єкта керування.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розглянемо принципи підвищення ефективності контуру самоналагодження, які реалізуються додатковими елементами САРС. Результати їх застосування будуть проілюстровані нижче в розділі «Результати».

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Досягається за рахунок виключення з контуру регулятора k_m послідовно включених інерційностей смугових $W^{bf}(s)$ і осереднюючих $W^{eo}(s)$ фільтрів. Блок множення, який реалізує модель статики ОК, конкретніше – модель його коефіцієнта передачі $k_m(t)$ переноситься від моделі динаміки ОК $W^m(s)$ до виходу обчислювача оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}$. Контур самоналагодження стає малоінерційним. У результаті поліпшується його динаміка й розширюється запас стійкості, а також знімається проблема установки початкових умов в інерційних ланках. Це дозволяє збільшити коефіцієнт передачі контуру самоналагодження й підвищити динамічну точність відтворення коефіцієнтом передачі $k_m(t)$ моделі змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК при збереженні запасу стійкості контуру.

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Досягається за рахунок включення до складу системи блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю К1, К2. Алгоритм їх функціонування наступний. Коли змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ змінюються синфазно (знаки їх однакові), вплив негативних факторів, розглянутих раніше, мінімальний. У такі інтервали часу блок перевірки синфазності змінних встановлює індикатор u_l=1, замикаються ключі К1, К2 і їх вихідні змінні $\tilde{y}_k(t)$ й $\tilde{y}_{mk}(t)$ повторюють змінні $\tilde{y}_a(t)$ й $\tilde{y}_{ma}(t)$ на входах. Коли синфазність $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ під впливом негативних факторів порушується, блок перевірки синфазності змінних у момент часу t_k встановлює індикатор u_l=0, ключі К1, К2 розмикаються й на їхніх виходах запам'ятовуються й зберігаються на всьому поточному інтервалі порушень синфазності значення $\tilde{y}_a(t=t_k)$, $\tilde{y}_{ma}(t=t_k)$.

3. Стабілізація оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні із одночасним пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі. Досягається за рахунок включення до складу САРС регулятора σ_1 і двох блоків множення, які виконують функцію масштабування. При змінах коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК регулятор , змінюючи керуючий вплив $u_{sd}(t)$, стабілізує значення змінної на заданому рівні . Стабілізація здійснюється масштабуванням оцінки до значення (12). Щоб зберегти пропорційність змінних, також одночасно масштабується й оцінка до значення (13). Т.ч., змінні значення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК вже менше впливають на значення помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження. Тому надалі будемо формулювати цей принцип більш коротко – стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження.

Оскільки в структурі САРС є кілька взаємозалежних контурів регулювання, нелінійні й нестаціонарні ланки, то аналітичне рішення задач її аналізу утруднене. Тому для дослідження системи обране імітаційне моделювання в середовищі Simulink пакета програм Matlab, у якому проведений багатофакторний комп'ютерний експеримент із моделями ОК й збурень, що характерні для об'єктів технологічного типу.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

В комп'ютерних експериментах використовувалися наступні моделі.

Передатні функції «еквівалентного» ОК – інерційної частини ОК й ФНЧ:

$$W^o(s) = \frac{1}{T_o s + 1} \cdot \exp(-\tau_o s),$$

$$W^{lf}(s) = \frac{\omega_{lf}^{\ 2}}{s^2 + 1{,}414 \cdot \omega_{lf} s + \omega_{lf}^{\ 2}}, \qquad (17)$$

де $\tau_0 = 1$, T_o=2 – нормовані значення часу запізнення й постійної часу [7]; ω_{lf}=3 – частота зрізу ФНЧ. В (2) $y(t=0) = y_o(t)$.

Параметричні збурення – змінний коефіцієнт передачі ОК:

$$f_p(t) = k_o(t) = 1 + s_l \cdot t, \qquad (18а)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = 4 \cdot \sin(0{,}005 \cdot t), \qquad (18б)$$

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1 + 6 \cdot \sin(0{,}005 \cdot t), 6 \cdot \sin(0{,}005 \cdot t) \geq 0 \\ 1 + 0{,}55 \cdot \sin(0{,}005 \cdot t), 6 \cdot \sin(0{,}005 \cdot t < 0 \end{cases}, \qquad (18в)$$

або

$$f_p(t) = k_o(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}, \qquad (18г)$$

де s_l = 0,002 або s_l = – 0,002.

Координатні збурення:

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = -5 + \tilde{f}_k(t), \qquad (19а)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, t < 150 + 150 \cdot n \\ 0, t \geq 150 + 150 \cdot n \end{cases}, \qquad (19б)$$

$$f_k(t) = m_{fk} + \tilde{f}_k(t) = \tilde{f}_k(t) - 5 + \begin{cases} 1, t < 300 + 300 \cdot n \\ -1, t \geq 300 + 300 \cdot n \end{cases}, \qquad (19в)$$

де m_{fk} – детермінована складова; $\tilde{f}_k(t)$ – випадкова складова, яка формувалася за допомогою фільтра з передатною функцією $W^{fk}(s) = \omega_{fk}^2 \Big/ \left(s^2 + 1{,}414 \cdot \omega_{fk} s + \omega_{fk}^2\right)$ із сигналу псевдобілого шуму при частоті зрізу $\omega_{fk} = 0{,}5$ рад/с; n – ціла частина від $t_{\text{mod}}/150$, t_{mod} – час моделювання.

Високочастотні шуми $f_n(t)$ формувалися із сигналу псевдобілого шуму за допомогою смугового фільтра з передатною функцією

$$W_1^{fn}(s)=\frac{s^2}{s^2+1{,}414\cdot 6s+6^2}\cdot\frac{8^2}{s^2+1{,}414\cdot 8s+8^2}\,. \quad (20)$$

Передатна функція інерційної частини регулятора $y(t)$:

$$W^r(s)=1+1/T_{iz}s+1/T_{iz}T_{iz1}s^2\,, \quad (21)$$

де T_{iz}=3,15, T_{iz1}=8,33 – постійні часу. Їхні значення, як і $k_r(t=0)=A^z=1{,}63$, відповідають мінімуму інтегрального квадратичного критерію помилки регулювання. Підстави для вибору $W^r(s)$ представлені в [8]. В (3) $u(t=0)=y(t=0)/k_o(t)$.

Передатна функція моделі динаміки ОК:

$$W^m(s)=\frac{1}{(T_m s+1)}\cdot\exp(-\tau_m s), \quad (22)$$

де $\tau_m=1{,}55$; T_m=2 – значення часу запізнення й постійної часу. Первісне значення τ_m дорівнює $\tau_o^{ekv}=1{,}55$ «еквівалентного» ОК з урахуванням ФНЧ (17).

Передатна функція лінійних смугових фільтрів:

$$W^{bf}(s)=\frac{s^2}{s^2+1{,}414\cdot\omega_L s+\omega_L^2}\cdot\frac{\omega_H^2}{s^2+1{,}414\cdot\omega_H s+\omega_H^2}\,, \quad (23)$$

де ω_L, ω_H – частоти зрізу в низькочастотній і високочастотній області фільтрів Баттерворта [9]). Чисельні значення частот зрізів визначаються в процедурі оптимізації.

Індикатор блоку перевірки синфазності змінних:

$$u_L(t)=L(\tilde{y}_a(t),\tilde{y}_{ma}(t))=\begin{cases}1, \operatorname{sgn}(\tilde{y}_a(t)\cdot\operatorname{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)=1\\ 0, \operatorname{sgn}(\tilde{y}_a(t)\cdot\operatorname{sgn}(\tilde{y}_{ma}(t)=-1\end{cases}. \quad (24)$$

Передатна функція осереднюючих фільтрів:

$$W^{oe}(s)=\frac{1}{(T_{oe}s+1)} \quad (25)$$

для експонентного усереднення випадкових процесів $\tilde{y}_k^2(t)$, $\tilde{y}_{mk}^2(t)$ на ковзному інтервалі $t_{oc}=2\cdot T_{oe}$ і розрахунку оцінок $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc},t)$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc},t)$ [10]. Чисельне значення T_{oe} визначається в процедурі оптимізації.

Передатна функція регулятора k_m :

$$W^{pr}(s)=k_{pr}(1+1/T_{izp}s+1/T_{izp}T_{izp1}s^2)\,, \quad (26)$$

де k_{pr}; T_{izp}, T_{izp1} – коефіцієнт передачі й постійні часу. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації. В (14) $k_m(t=0)=k_o(t=0)=1$.

Передатна функція регулятора σ_1:

$$W^{sd}(s)=k_{sd}(1+1/T_{isd}s), \quad (27)$$

де k_{sd}; T_{isd} – коефіцієнт передачі й час ізодрому. Їхні чисельні значення визначаються в процедурі оптимізації. В (15) $u_{sd}(t=0)=1$.

Мета проведення експериментів – визначити точність підтримки керованої змінної на заданому значенні і точність визначення поточних значень коефіцієнта передачі моделі відносно коефіцієнта передачі об'єкта керування при різних варіантах структури САРС.

Слід зазначити, що показник (17) був обраний у якості критерію при оптимізації роботи САРС. Його мінімум забезпечувався добором параметрів (23), (25)–(27) за допомогою програми Design Optimization пакета Matlab. Показник (18) служить для оцінки точності самоналагодження коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ до змінного коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК. Комп'ютерні експерименти передбачали цілеспрямоване імітаційне моделювання варіантів структурних схем по рис. 1 у середовищу Simulink пакета програм Matlab.

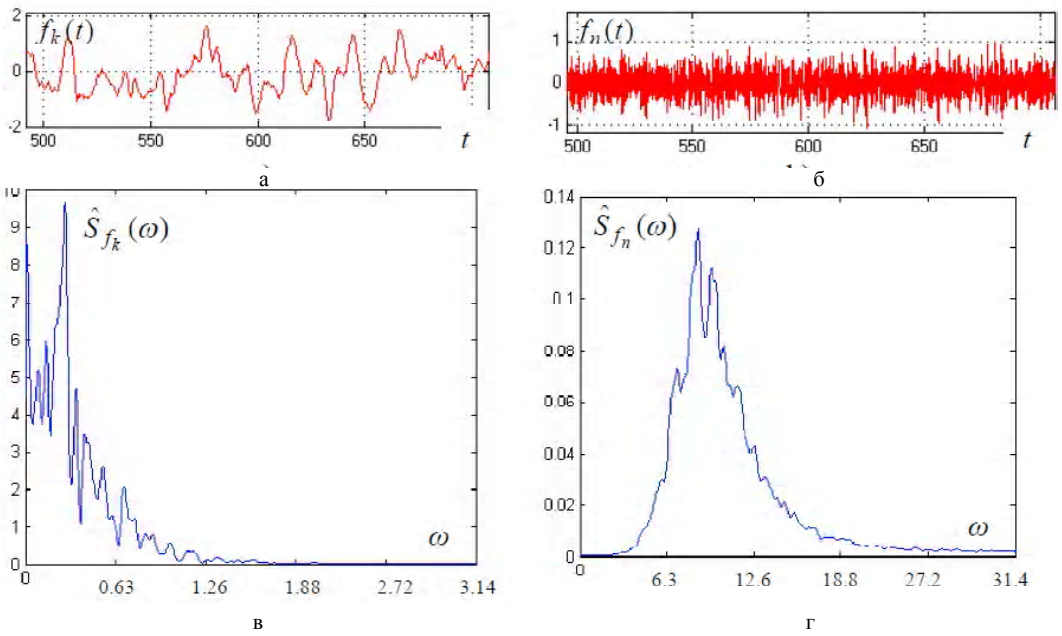


Рисунок 2 – Фрагменти реалізацій у часі (а, б) і оцінки спектральної щільності (в, г) координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$, які впливають на САР

При проведенні комп'ютерних експериментів необхідно було забезпечити попередньо прийняті умови про низькочастотний характер координатних збурень $fk(t)$ і високочастотний характер шумів $fn(t)$ щодо частотної області, де спостерігається власний рух САР об'єктом технологічного типу.

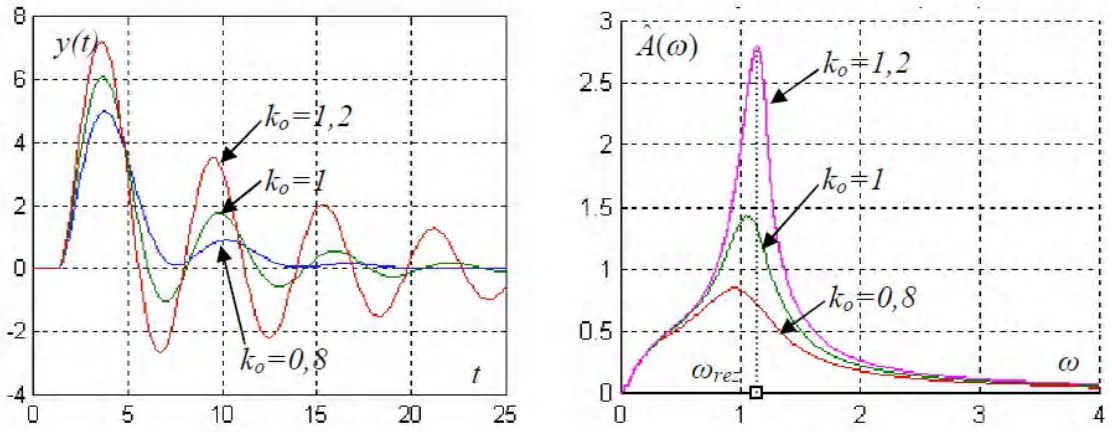
Дані рисунків 2 і 3 підтверджують коректність вибору моделей збурень і шумів для даної САР.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

1. Зменшення інерційності контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 4. Він дозволяє по характеру зміни змінних $k_o(t)$, $k_m(t)$ порівняти стійкість і динамічну точність САРС ви-хідної структури і САРС із малоінерційним контуром самоналагодження.

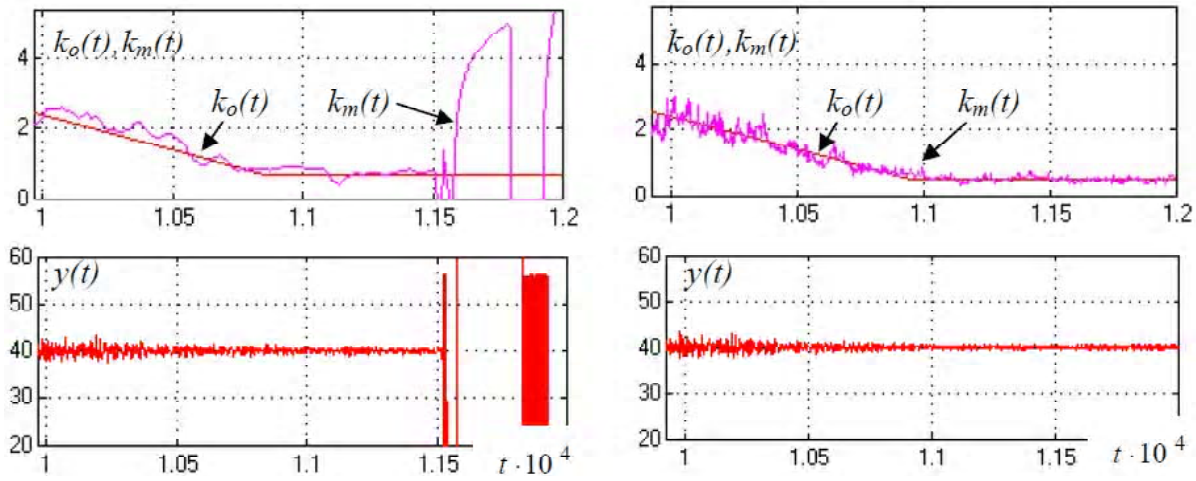
Відзначимо, що даний рисунок відбиває динаміку цих варіантів системи для конкретного прикладу, тобто при впливі координатних збурень (19а), шумів (20) і при збігу динамічних властивостей моделі (22) з ОК (17). Разом з тим, характер реакції змінних САРС на зменшення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК був подібним для всього широкого діапазону функціонування, який розглядався при моделюванні системи. Аналіз рис. 4 показує:

– у САРС вихідної структури зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ у період часу, який передує зоні нестійкої роботи, носять низькочастотний характер у порівнянні зі змінами керованої змінної $y(t)$. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0{,}006$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0{,}1$ Гц (див. рис. 4а). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 103$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 6{,}5$. При зменшенні $k_o(t)$ виникають досить тривалі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 80$ с, на яких $k_m(t)$ під впливом координатних збурень $f_k(t)$ наближається до нуля. На цих відрізках коефіцієнт передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$, який визначається обчислювачем k_r, суттєво зростає. САР стає нестійкою, а САРС непрацездатною;



а б

Рисунок 3 – Перехідні (а) і амплитудо-частотні (б) характеристики САР при різних коефіцієнтах передачі k_o ОК (ω_{rez} – резонансна частота)



а б

Рисунок 4 – Фрагменти змін змінних САРС на зменшення коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК:
а – вихідної структури; б – системи із малоінерційним контуром самоналагодження

– у САРС із малоінерційним контуром самоналагодження зміни коефіцієнта передачі моделі $k_m(t)$ більш високочастотні. Для розглянутого прикладу середньоквадратична частота коливань $k_m(t)$ $f_{k_m}^{ms} = 1/T_{k_m}^{ms} \approx 0{,}04$ Гц, а для $y(t)$ $f_y^{ms} = 1/T_y^{ms} \approx 0{,}12$ Гц (див. рис. 4б). Відповідно, нормовані значення середньоквадратичних періодів $T_{k_m}^{msn} = T_{k_m}^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 16$ і $T_y^{msn} = T_y^{ms} / \tau_o^{ekv} \approx 5{,}3$. Такий же характер мають і зміни коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$. Короткі відрізки часу $T_{k_m}^{ms} / 2 \approx 12{,}5$с, на яких спостерігається ріст $k_r(t)$, змінюються такими ж по тривалості відрізками часу, на яких $k_r(t)$ зменшується. При цьому САР залишається стійкою, тому що ці відрізки менші за час перехідного процесу (див. рис. 3а).

2. Зменшення впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 5. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі на присутність факторів, які викликають фазові зрушення для САРС вихідної структури й САРС із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження.

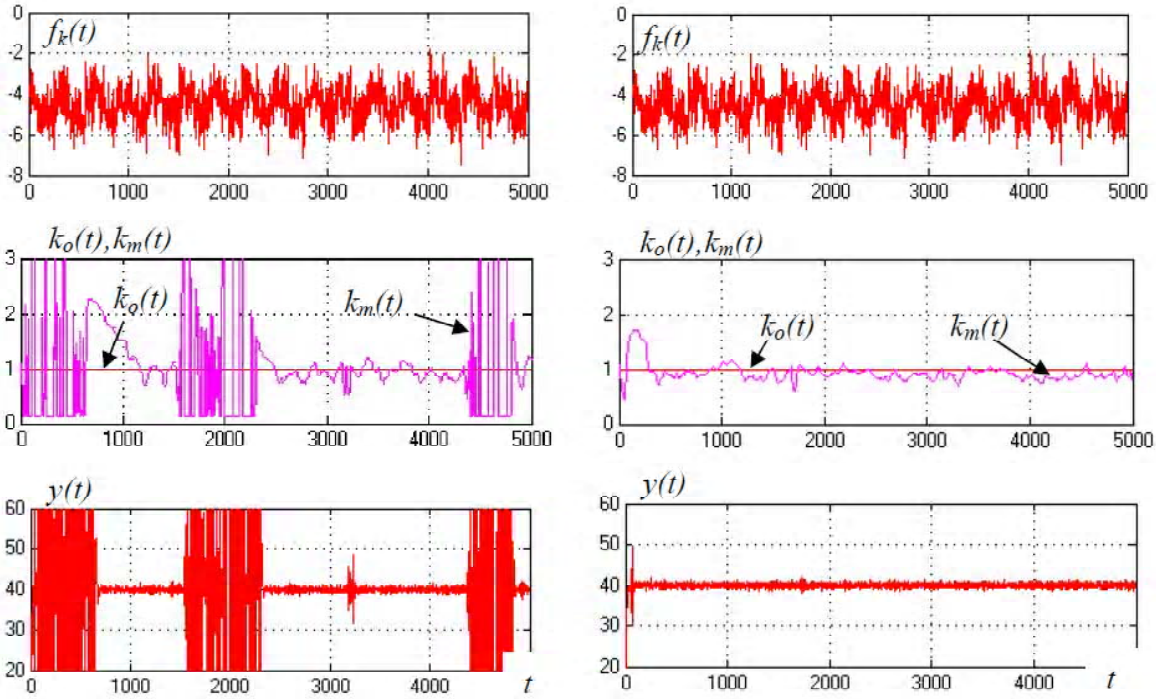
Щоб виключити вплив змін коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК на процес самоналагодження, експеримент проводився при постійному номінальному значенні k_o=1, але в присутності факторів, які викликають фазові зрушення змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, а саме: у складі координатних збурень $fk(t)$ спостерігалися східчасті складові (використана модель $fk(t)$ (19в)) і запізнення в моделі τ_m перевищувало запізнення «еквівалентного» ОК $\tau_m = 1{,}5 \cdot \tau_o^{ekv}$. Процес самоналагодження в САРС вихідної структури нестійкий через зрушені по фазі коливання змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$, які відбиваються в коливаннях помилки регулювання $e_1(t)$ контуру самоналагодження й, у підсумку, у коливаннях коефіцієнта передачі $k_r(t)$ регулятора $y(t)$ САР (див. рис. 5а). При додаванні в стуктуру САРС блоку перевірки синфазності змінних і ключів з пам'яттю несинфазні зміни змінних $\tilde{y}_a(t)$ і $\tilde{y}_{ma}(t)$ блокуються й процес самоналагодження стає стійким (див. рис. 5б).

3. Стабілізація нормованої помилки контуру самоналагодження. Ефект застосування зазначеного принципу ілюструє рис. 6. Він дозволяє порівняти реакції змінних у системі вихідної структури і у САРС зі стабілізацією оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$ і пропорційним масштабуванням $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, які виконують регулятор σ_1 і два блоки множення.

Аналіз рисунку 6 показує:

– у САРС вихідної структури (див. рис. 6а) при збільшенні коефіцієнта передачі $k_o(t)$ ОК зростають абсолютні значення оцінки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, а потім і коливання помилки $e_1(t)$ контуру самоналагодження, що негативно позначається на точності його роботи – зростають коливання $k_m(t)$ відносно $k_o(t)$;

– введення в структуру САРС регулятора σ_1 і блоків множення дозволяє стабілізувати змінну $\sigma_1(t)$ на заданому рівні σ^z (див. рис. 6б). Так як масштабується не тільки $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t_{oc}, t)$, але пропорційно також і $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t_{oc}, t)$, то коливання помилки $e_1(t)$, а значить і коефіцієнт передачі контуру самоналагодження, уже практично не зале-

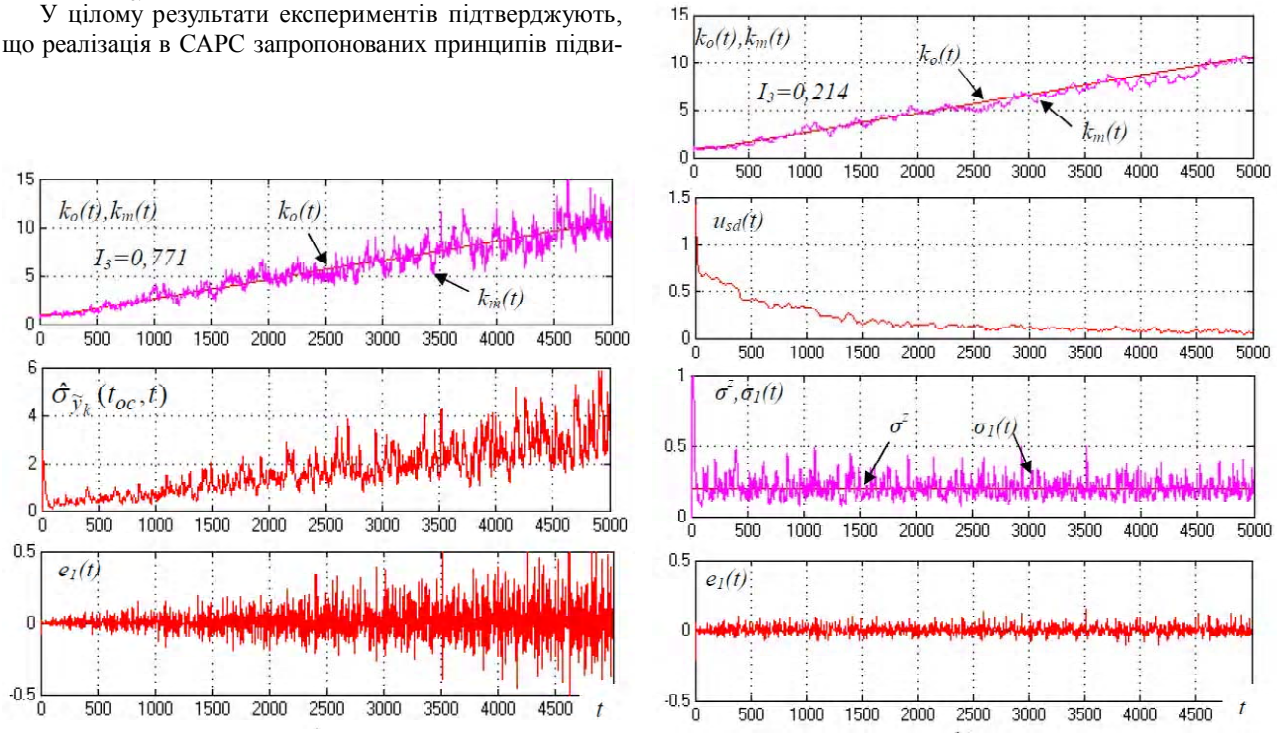


а б

Рисунок 5 – Фрагменти змін змінних САРС на присутність факторів, які викликають фазові зрушення:
а – для вихідної структури; б – для системи із зменшенням впливу фазових зрушень у контурі самоналагодження

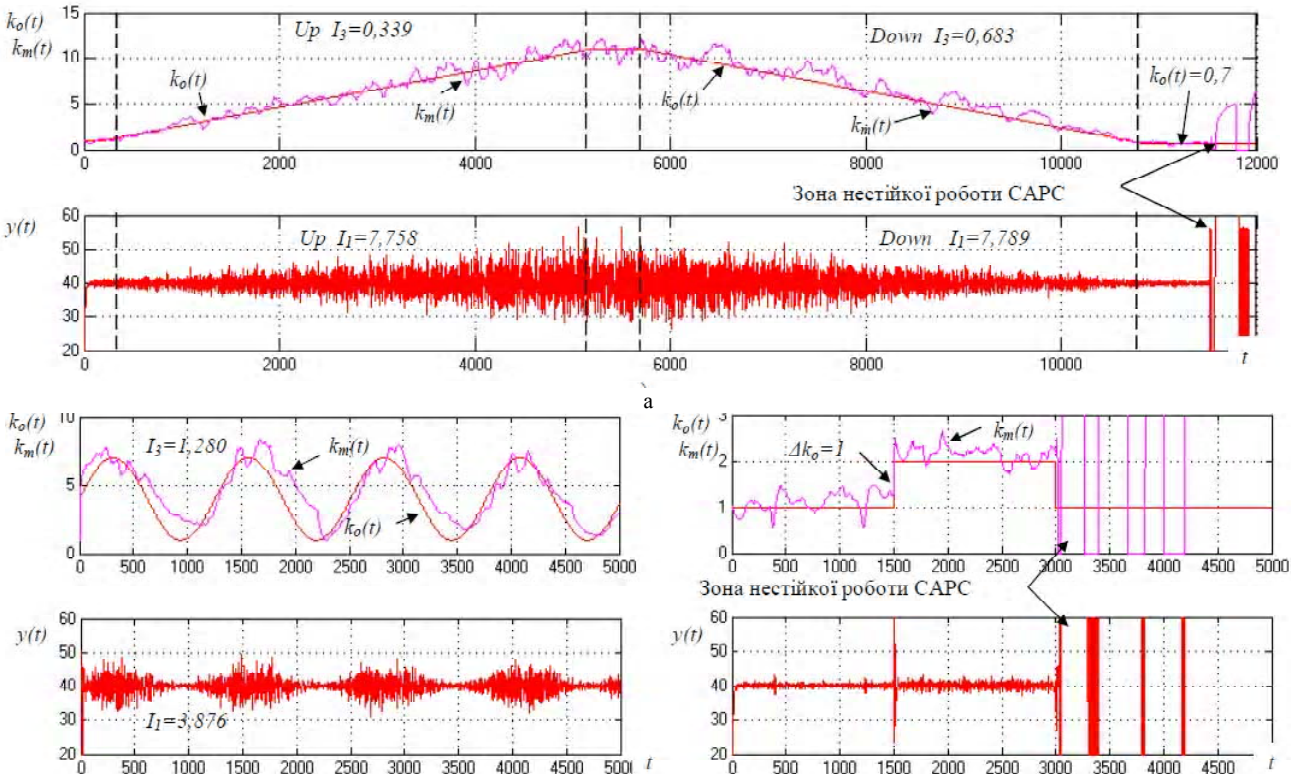
жать від значень $k_o(t)$ ОК. Як наслідок, зростає точність даного контуру, про що можна судити за значеннями показника I_3.

У цілому результати експериментів підтверджують, що реалізація в САРС запропонованих принципів підвищує стійкість і динамічну точність контуру самоналагодження. Наприклад, на рис. 7 показана робота САРС удосконаленнної структури в умовах, наближених до



а б

Рисунок 6 – Фрагменти змін змінних САРС:
а – вихідної структури; б – для системи зі стабілізацією нормованої помилки контуру самоналагодження



а б в

Рисунок 7 – Зміни змінних САРС в умовах, наближеним до реальних, на тестові зміни коефіцієнта передачі *ko(t)* ОУ:
а – по моделі (18а), б – по моделі (18в), в – по моделі (18г)

реальних. При моделюванні таких умов використовувалася модель координатних збурень $f_k(t)$ (19в), шумів (20) і запізнення в моделі τ_m спеціально було встановлено з перевищенням запізнення «еквівалентного» ОУ $\tau_m = 1{,}5 \cdot \tau_o^{ekv}$.

В усіх розглянутих випадках система виявилася стійкою, забезпечуючи прийнятні для практичного застосування показники I_1, I_3.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Особливо слід виділити здатність системи удосконаленної структури до роботи в умовах змін коефіцієнта передачі ОК в широкому діапазоні без необхідності переналаштувань параметрів регулятора контуру самоналагодження. Так, наприклад, САРС на рис. 7 цілком роботоспроможна при $ko(t) \in 0{,}45...11$. В таких самих умовах САРС вихідної структури потребує переналаштувань.

Об'єднання трьох розглянутих принципів удосконалення структури САРС підвищує не лише точність її самоналагодження, а й збільшує робастність до змін параметрів ОК та його моделі. Як показали додаткові експерименти, об'єм яких виходить за межі данної статті, розширюється діапазон змін часу запізнення ОК та його моделі, в рамках яких система залишається стійкою.

Хоча дана система розроблялась за умов, коли спектральний склад параметричних збурень (змін коефіцієнта передачі ОК) більш низькочастотний у порівнянні із спектральним складом керованої змінної, тим не менш, як показали результати експериментів, вона виявилася роботоспроможною і за умов стрибкоподібних змін коефіцієнта передачі ОК (див. рис. 7).

Моделювання достатньо повно відбиває реальні умови експлуатації САРС об'єктами керування технологічного типу. Представлені результати моделювання дозволяють на якісному й, частково, на кількісному рівні провести порівняльний аналіз варіантів розглянутих САРС і зробити висновок про їхню коректність і можливості поширення на широкий клас реальних об'єктів керування.

ВИСНОВКИ

Проведені комп'ютерні експерименти підтвердили підвищення ефективності САРС, зокрема, точності визначення коефіцієнта передачі моделі до змінного коефіцієнта передачі об'єкта керування в умовах впливу координатних збурень і шумів, а також підвищення робастності системи до варіацій параметрів збурень, об'єкта керування і його моделі за рахунок:

а) зменшення інерційності контуру самоналагодження;

б) зменшення впливу фазових зрушень фільтрованих керованих змінних об'єкта і його моделі на формування оцінок їх імовірнісних характеристик;

в) стабілізації оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої керованої змінної об'єкта на заданому значенні з пропорційним масштабуванням оцінки імовірнісної характеристики фільтрованої змінної його моделі.

Реалізація зазначених принципів забезпечувалася, відповідно, за рахунок:

а) виключення з контуру самоналагодження інерційностей смугових і осереднюючих фільтрів;

б) формування оцінок імовірнісних характеристик з поточними значеннями керованих змінних при збігу їх знаків, запам'ятовування цих значень в момент розбіжності знаків, збереження їх на всьому поточному інтервалі порушень синфазності і формування по них оцінок імовірнісних характеристик;

в) одночасного пропорційного масштабування оцінок імовірнісних характеристик фільтрованої керованої змінної об'єкта і його моделі.

Ці варіанти реалізації підтвердили свою працездатність.

Спільне застосування зазначених принципів не викликає протиріч. Вони взаємно доповнюють один одного в підвищенні стійкості і динамічної точність контуру самоналагодження, в результаті чого підвищується й точність підтримки регульованої змінної на заданому значенні.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках наукової школи «Моделювання й оптимальне керування технологічними процесами зберігання й переробки сільськогосподарської продукції» кафедри «Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем» Одеської національної академії харчових технологій за підтримки компанії «С-Інжиніринг» м. Одеса.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Li Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art / Y. Li, K. H. Ang, G. C. Y. Chong // IEEE Control Systems Magazine. – 2006. – Vol. 26, Issue 1. – P. 42–54.
2. Изерман Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М. : Мир, 1984. – 541 с.
3. А. с. 1241192 СССР, A1 G 05B 13/02. Самонастраивающаяся система / В.А. Хобин, А.Г. Плеве (СССР). – № 3821296/24-24; заявл. 06.12.84; опубл. 30.06.86, Бюл. 24. – 7 с.
4. Пат. 36671 Україна, МПК^{2006} G05B13/02. Самоналагоджувальна система / В. А. Хобін, О. А. Марчук (Україна); заявник Одеська національна академія харчових технологій. – № u200801328; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. 21. – 5 с.
5. Khobin V. A. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 27, Issue 3. – P. 5–16.
6. Хобин В. А. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа / В. А. Хобин, М. В. Левинский // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 4. – С. 120–129.
7. Левінський М. В. Тестові САР для дослідження алгоритмів їх самоналаштування / М. В. Левінський // Наукові праці ОНАХТ. – 2015. – № 48. – С. 142–146.
8. Khobin V. A. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient / V. A. Khobin, M. V. Levinskyi // ATBP journal. – 2016. – Vol. 26, Issue 2. – P. 31–38.
9. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. Т. II. / У. Титце, К. Шенк. – М. : Издательство ДМК, 2007. – 942 с.
10. Куликов Е. И. Методы измерения случайных процессов / Е. И. Куликов. – М. : Радио и связь, 1986. – 282 с.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2017.

Після доробки 18.04.2017.

Хобин В. А.[1], Левинский М. В.[2]

[1]Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

[2]Аспирант кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

ПРИНЦИПЫ, АЛГОРИТМЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТИПА

Актуальность. Самонанастройка параметров регуляторов является актуальной при управлении объектами технологического типа, потому что изменения свойств сырья и энергоносителей, деградация оборудования в ходе технологического процесса меняют не только значение управляемых переменных, но и характер собственного движения систем автоматического регулирования в замкнутом контуре. В математических моделях такие влияния относят к параметрическим возмущениям и отображают их в том числе с помощью изменяющегося коэффициента передачи объекта управления. Для ряда технологических объектов управления диапазон его изменения может превышать значение десять. При этом типичные системы регулирования с неизменными параметрами регулятора теряют устойчивость и переходят в позиционный режим работы. Чтобы сохранить компромисс между показателями качества и устойчивостью процессов в системе с такими объектами, необходимо использовать самонастройку параметров регулятора.

Цель. Повышение эффективности самонастраивающейся системы управления, которая для идентификации изменяющегося коэффициента передачи объекта управления использует составляющую собственного движения.

Метод. Предлагаются усовершенствования принципов и алгоритмов работы самонастраивающейся системы, которые повышают ее устойчивость и динамическую точность. Для этого в состав исходной системы включают новые звенья и связи. Учитывая наличие в системе нелинейных и нестационарных звеньев, для её исследования выбрано имитационное моделирование в среде Simulink пакета программ Matlab.

Результаты. Спланированы и проведены компьютерные эксперименты с моделями альтернативных структур системы для условий, которые приближены к реальным условиям её функционирования. Проведено тестирование типовыми моделями изменений коэффициента передачи объекта. Получены графики и числовые показатели, которые характеризуют эффективность работы самонастраивающейся системы исходной и усовершенствованной структур.

Выводы. Для повышения устойчивости и динамической точности системы необходимо уменьшить инерционность ее контура самонастройки, влияние фазовых сдвигов фильтрованных переменных в этом контуре на формирование оценок вероятностных характеристик, а также влияние коэффициента передачи объекта на ошибку регулирования контура самонастройки.

Ключевые слова: самонастраивающаяся САУ, коэффициент передачи, собственное движение, полосовой фильтр, оптимальный параметрический синтез.

Khobin V. A.[1], Levinskyi M. V.[2]

[1]Dr.Sc., Professor, Head of a Chair of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa national Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

[2]Post-graduate of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

PRINCIPLES, ALGORITHMS AND RESULTS OF EFFECTIVENESS INCREASE OF THE SELF-TUNING AUTOMATIC CONTROL SYSTEM WITH THE CONTROL OBJECT OF TECHNOLOGICAL TYPE

Context. The issue of self-tuning was and still remains relevant when controlling objects of technological type, because changing properties of raw materials and energy carriers, equipment degradation during technological process do change not only the values of the controlled variables, but also the nature of own motion of the automatic control systems (ACS) in the closed loop. In the mathematical models such impacts attribute to parametric disturbances and reflect them including with changing transition coefficient of the control object (CO). For a number of technological type CO the range of its change can exceed the value of ten. For all that typical ACS with constant controller parameters loose the stability in small and turn to position mode. To maintain a compromise between quality indicators and the processes stability in ACS of such CO, it is necessary to use self-tuning of controller parameters.

Objective. Increase of effectiveness in self-tuning automatic control system, which uses own part of motion to identify varying transition coefficient of the control object.

Method. The enhancements of principles and operating algorithms of self-tuning automatic control system (STACS) are proposed. They increase its stability and dynamic accuracy. To achieve this, new links and connections are inserted in the system. Taking into account the presence of non-linear and non-stationary links in the system, for its research the modeling in Simulink environment of the MatLab program package was chosen.

Results. Computer experiments with the models of alternative system structures were planned and carried out for the conditions, which are close to the real conditions of its operation. Testing with the typical models of CO transition coefficient change was carried out. The diagrams and numeric values, which characterize the effectiveness of STACS of initial and enhanced structures, were obtained.

Conclusions. To increase the stability and dynamic accuracy of the system, it is necessary to decrease the lag of its self-tuning loop, influence of filtered variables phase shifts in this circuit on forming the evaluations of the stochastic characteristics, as well as control object transition coefficient influence on the control error of the self-tuning loop.

Keywords: self-tuning ACS, transition coefficient, own motion, band pass filter, optimal parametric synthesis.

REFERENCES

1. Li Y., Ang K. H., Chong G. C. Y. Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art, *IEEE Control Systems Magazine*, 2006, Vol. 26, Issue 1, pp. 42–54.
2. Izerman R. Tsifrovyie sistemyi upravleniya. Moscow, Mir, 1984, 541 p.
3. Hobin V. A., Pleve A. G. (SSSR) A. s. 1241192 SSSR, A1 G 05B 13/02. Samonastraivayuschayasya sistema. № 3821296/24-24; zayavl. 06.12.84; opubl. 30.06.86, Byul. 24, 7 p.
4. Hobin V. A., Marchuk O. A. (Ukrayina) Pat. 36671 Ukrayina, MPK2006 G05B13/02. Samonalagodzhuvalna sistema; zayavnik Odeska natsionalna akademIya harchovih tehnologiy. № u200801328; zayavl. 04.02.2008; opubl. 10.11.2008. Byul. 21, 5 p.
5. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Filters research for free motion extraction in self tuning automatic control systems, *ATBP journal*, 2016, Vol. 27, Issue 3, pp. 5–16.
6. Hobin V. A., Levinskiy M. V. Optimizatsiya filtrov sobstvennogo dvizheniya samonastraivayuscheysya SAU ob'ektom tehnologicheskogo tipa, *Radio Electronics, Computer Science, Control,* 2016, No. 4, pp. 120–129.
7. Levinskiy M. V. Testovi SAR dlya doslidzhennya algoritmiv yih samonalashtuvannya, *Naukovi pratsi ONAHT,* 2015, No. 48, pp. 142–146.
8. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient, *ATBP journal*, 2016, Vol. 26, Issue 2, pp. 31–38.
9. Tittse U., Shenk K. Poluprovodnikovaya shemotehnika. T. II. Moscow, Izdatelstvo DMK, 2007, 942 p.
10. Kulikov E. I. Metodyi izmereniya sluchaynyih protsessov. Moscow, Radio i svyaz, 1986, 282 p.

Наукове видання

Радіоелектроніка,

інформатика,

управління

№ 2/2017

Науковий журнал

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

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

Комп'ютерне моделювання та верстання С. В. Зуб
Редактор англійських текстів С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

Підписано до друку 13.06.2017. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 21,16.
Тираж 300 прим. Зам. № 552.

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.