



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(46) 2018

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2018

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 3(46) 2018

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2018

Zaporizhzhia National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 3(46) 2018

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhia National Technical University.

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

Zaporizhzhia

ZNTU

2018

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

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

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

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

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

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

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

Журнал дозволяє авторам мати авторські права і зберігати права на видання без обмежень. Журнал дозволяє користувачам читати, завантажувати, копіювати, поширювати, друкувати, шукати або посилалися 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 Web of Science.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії:

Андрюлідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

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

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

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

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

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

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

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

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

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

Папшицький М., д-р філософії, Польща

Погосов В. В., д-р фіз.-мат. наук, Україна

Рубель О. В., 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 № 2 від 08.10.2018.

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, 2018

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 KB №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 диссер-тационных 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 Web of Science.

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, ВИНТИ, Джэрро), 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:

Андрюлидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

Гимпилович 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

Олешук В. А., канд. физ.-мат. наук, Норвегия, редактор раздела по радиоэлектронике

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

Папшицкий М., д-р философии, Польша

Погосов В. В., д-р физ.-мат. наук, Украина

Рубель О. В., 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 № 2 от 08.10.2018.

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, 2018

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

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

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

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

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

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

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

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

The journal is included into Web of Science.

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief: 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. V. Rubel, Ph.D, Canada

A. A. Sharpanskykh, Ph.D, Netherlands, Computer Science section editor

S. N. Vassilyev, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Academician of Russian Academy of Sciences, Russia

E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 2 dated 08.10.2018.

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, Zaporizhzhia, 69063, Ukraine.

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhia National Technical University, 2018

ЗМІСТ

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ.....	7
<i>Havrysh V. I., Baranetskiy Ya. O., Kolyasa L. I.</i>	
INVESTIGATION OF TEMPERATURE MODES IN THERMOSENSITIVE NON-UNIFORM ELEMENTS OF RADIOELECTRONIC DEVICES.....	7
<i>Кравчина В. В., Полухін О. С.</i>	
ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОМІГРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ.....	16
<i>Кривенчук Ю. П., Шаховська Н. Б., Вовк О. Б., Мельникова Н. І.</i>	
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ СХЕМ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ПОБУДОВАНОГО НА ЕФЕКТІ РАМАНА ТА СТРУКТУРА АЛГОРИТМУ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	25
<i>Пица Д. М., Романенко С. Н., Семенов Д. С.</i>	
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФИЛЬТРА.....	34
<i>Ukhina A. V., Sitnikov V. S.</i>	
TRANSIENT PROCESS AT LOW-ORDER FREQUENCY DEPENDENT DIGITAL COMPONENTS.....	40
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	48
<i>Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M.</i>	
STRUCTURAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF IDEFO FUNCTIONAL BUSINESS PROCESS MODELS.....	48
<i>Mamedov K. Sh., Mammadli N. O.</i>	
TWO METHODS FOR CONSTRUCTION OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPessimistic SOLUTIONS OF THE INTERVAL PROBLEM OF MIXED-BOOLEAN PROGRAMMING.....	57
<i>Москаленко В. В., Москаленко А. С., Коробов А. Г.</i>	
МОДЕЛІ І МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ.....	68
<i>Stenin Al., Pas'ko V., Drozdovych I.</i>	
DESIGNING OF AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEMS AND OPTIMIZATION OF ENERGY RESOURCES AT THEIR EXPLOITATION.....	78
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	88
<i>Bodyanskiy Ye. V., Kulishova N. Ye., Tkachenko V. Ph.</i>	
FEATURE VECTOR GENERATION FOR THE FACIAL EXPRESSION RECOGNITION USING NEO-FUZZY SYSTEM.....	88
<i>Кондрук Н. Е.</i>	
ВИКОРИСТАННЯ ДОВЖИННОЇ МІРИ ПОДІБНОСТІ В ЗАДАЧАХ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ.....	98
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Leoshchenko S., Ilyashenko M., Myronova N., Mastinovskiy Y.</i>	
ADDITIONAL TRAINING OF NEURO-FUZZY DIAGNOSTIC MODELS.....	106
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	120
<i>Akhmetov B. B., Lakhno V. A., Maluykov V. P.</i>	
MODEL OF CYBER SECURITY FINANCING WITHIN THE FRAMEWORK OF THE BILINEAR DIFFERENTIAL QUALITY GAME SCHEME.....	120
<i>Dyvak M. P., Kovbasistyi A. V., Melnyk A. M., Turchyn L. Y., Martsenyuk Y. O.</i>	
SYSTEM FOR WEB RESOURCES CONTENT STRUCTURING AND RECOGNIZING WITH THE MACHINE LEARNING ELEMENTS.....	128
<i>Каменских А. Н., Тюрин С. Ф.</i>	
ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ.....	135
<i>Лытвин V. V., Vysotska V. A., Hrendus M. H.</i>	
METHOD OF DATA EXPRESSION FROM THE UKRAINIAN CONTENT BASED ON THE ONTOLOGICAL APPROACH.....	144
<i>Prykhodko N. V., Prykhodko S. B.</i>	
THE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SOFTWARE SIZE OF OPEN SOURCE JAVA-BASED SYSTEMS.....	158
<i>Шостак Н. В., Безрук В. М., Астраханцев А. А.</i>	
ВИБІР ПЕРЕВАЖНОГО АЛГОРИТМУ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ В ВІДЕОФАЙЛИ.....	167
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	174
<i>Авдєєв В. В.</i>	
ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ВЕКТОР СТАНУ ВИКОНАВЧОГО ПРИСТРОЮ В СИСТЕМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РАКЕТИ.....	174
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Tron V. V.</i>	
SYNTHESIS OF THE NOISE IMMUNE ALGORITHM FOR ADAPTIVE CONTROL OF ORE CONCENTRATION.....	183
<i>Хобін В. А., Левінський В. М., Левінський М. В.</i>	
ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ.....	191

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Havrysh V. I., Baranetskiy Ya. O., Kolyasa L. I.</i>	
INVESTIGATION OF TEMPERATURE MODES IN THERMOSENSITIVE NON-UNIFORM ELEMENTS OF RADIOELECTRONIC DEVICES.....	7
<i>Kravchina V. V., Polukhin O. S.</i>	
APPLICATION OF THERMOMIGRATION FOR TECHNOLOGY OF POWERFUL SEMICONDUCTORS APPLIANCES.....	16
<i>Kryvenchuk Yu. P., Shakhovska N. B., Vovk O. B., Melnykova N. I.</i>	
COMPUTER MODELING OF FUNCTIONS FOR THE TRANSFORMATION OF OPTICAL SCHEMES OF MEASUREMENT OF TEMPERATURE CONSTRUCTED ON RAMAN EFFECT AND STRUCTURE OF THE ALGORITHM OF THEIR RESEARCH...	25
<i>Piza D. M., Romanenko S. N., Semenov D. S.</i>	
CORRELATION METHOD FOR FORMING THE TRAINING SAMPLE FOR ADAPTATION OF THE SPATIAL FILTER.....	34
<i>Ukhina A. V., Sitnikov V. S.</i>	
TRANSIENT PROCESS AT LOW-ORDER FREQUENCY DEPENDENT DIGITAL COMPONENTS.....	40
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	48
<i>Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M.</i>	
STRUCTURAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF IDEFO FUNCTIONAL BUSINESS PROCESS MODELS.....	48
<i>Mamedov K. Sh., Mammadli N. O.</i>	
TWO METHODS FOR CONSTRUCTION OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPESSIMISTIC SOLUTIONS OF THE INTERVAL PROBLEM OF MIXED-BOOLEAN PROGRAMMING.....	57
<i>Moskalenko V. V., Moskalenko A. S., Korobov A. G.</i>	
MODELS AND METHODS OF INTELLECTUAL INFORMATION TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS NAVIGATION FOR COMPACT DRONES.....	68
<i>Stenin Al., Pas'ko V., Drozdovych I.</i>	
DESIGNING OF AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEMS AND OPTIMIZATION OF ENERGY RESOURCES AT THEIR EXPLOITATION.....	78
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	88
<i>Bodyanskiy Ye. V., Kulishova N. Ye., Tkachenko V. Ph.</i>	
FEATURE VECTOR GENERATION FOR THE FACIAL EXPRESSION RECOGNITION USING NEO-FUZZY SYSTEM.....	88
<i>Kondruk N. E.</i>	
USE OF LENGTH-BASED SIMILARITY MEASURE IN CLUSTERING PROBLEMS.....	98
<i>Oliinyk A., Subbotin S., Leoshchenko S., Ilyashenko M., Myronova N., Mastinovskiy Y. V.</i>	
ADDITIONAL TRAINING OF NEURO-FUZZY DIAGNOSTIC MODELS.....	106
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	120
<i>Akhmetov B. B., Lakhno V. A., Malyukov V. P.</i>	
MODEL OF CYBER SECURITY FINANCING WITHIN THE FRAMEWORK OF THE BILINEAR DIFFERENTIAL QUALITY GAME SCHEME.....	120
<i>Dyvak M. P., Kovbasistyi A. V., Melnyk A. M., Turchyn L. Y., Martsenyuk Y. O.</i>	
SYSTEM FOR WEB RESOURCES CONTENT STRUCTURING AND RECOGNIZING WITH THE MACHINE LEARNING ELEMENTS.....	128
<i>Kamenskiy A. N., Tyurin S. F.</i>	
THE OPTIMIZATION OF ENERGY-EFFICIENCY AND RELIABILITY USING COMPLEX REDUNDANCY IN COMPUTING SYSTEMS.....	135
<i>Lytvyn V. V., Vysotska V. A., Hrendus M. H.</i>	
METHOD OF DATA EXPRESSION FROM THE UKRAINIAN CONTENT BASED ON THE ONTOLOGICAL APPROACH.....	144
<i>Prykhodko N. V., Prykhodko S. B.</i>	
THE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SOFTWARE SIZE OF OPEN SOURCE JAVA-BASED SYSTEMS.....	158
<i>Shostak N. V., Bezruk V. M., Astrakhantsev A. A.</i>	
SELECTING THE PREFERRED ALGORITHM FOR THE EMBEDDING OF DIGITAL WATERMARKS INTO VIDEOFILES.....	167
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	174
<i>Avdejev V. V.</i>	
USE OF INFORMATION ABOUT STATE VECTOR OF EXECUTIVE DEVICE IN STABILIZING SYSTEM OF A ROCKET ROTATION MOTION.....	174
<i>Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Tron V. V.</i>	
SYNTHESIS OF THE NOISE IMMUNE ALGORITHM FOR ADAPTIVE CONTROL OF ORE CONCENTRATION.....	183
<i>Khobin V. A., Levinskyy V. M., Levinskyy M. V.</i>	
SELF-TUNING CONTROL SYSTEM ALGORITHMS IMPROVEMENT FOR PROVIDING EFFICIENCY OF ITS STARTING REGIMES.....	191

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

UDC 536.24

INVESTIGATION OF TEMPERATURE MODES IN THERMOSENSITIVE NON-UNIFORM ELEMENTS OF RADIOELECTRONIC DEVICES

Havrysh V. I. – Dr. Sc., Professor of Department of Software, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Baranetskij Ya. O. – PhD, Associate Professor of Department of Mathematics, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Kolyasa L. I. – Doctor of Philosophy, Senior Lecture of Department of Mathematics, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The non-linear boundary value problem of heat conduction for a thermosensitive non-homogeneous strip-shaped element of a radio-electronic system with a through inclusion has been solved whose analytical-numerical solution enables us to analyze temperature regimes in the element.

Objective. Is to develop such a method of linearization of mathematical model of heat conduction which enables us to obtain analytical numerical solution of the corresponding non-linear boundary value problem for determination of temperature field in elements of radio electronic devices, which are geometrically represented by a thermosensitive plate with a through inclusion.

Method. A linearizing function which enables us to partially linearize the initial non-linear mathematical model of heat conduction for a thermosensitive non-homogeneous element of a radio electronic system in the form of “plate-inclusion” structure has been suggested. The introduced piece-wise linear approximation of temperature on plate-inclusion interfaces has enabled us to completely linearize the corresponding partially linearized boundary value problem relative to the linearizing function. After this, it became possible to apply Fourier’s integral transformation to the obtained linear problem with respect to one of the spatial coordinates, as well as to determine the linearizing function. The linear dependence of the coefficient of heat conductivity on temperature for structure materials with the use of the linearizing function has been considered. By solving the boundary value problem, the formulae for determination of temperature field in the “plate-inclusion” thermosensitive structure have been obtained.

Results. The obtained formulae for determination of temperature field in a thermosensitive non-homogeneous element of radio electronic system were used to create the software which enables us to obtain distribution of value of temperature and to analyze temperature regimes.

Conclusions. A mathematical model for the calculation for the temperature field in a “plate-inclusion” thermosensitive structure is adequate to the actual physical process, because no jump of temperature at “plate-inclusion” interfaces is observed. The numerical results for the chosen materials under linear dependence of the coefficient of thermoconductivity on temperature differ by 7% from the results which are obtained for constant coefficient of heat conductivity. Prospect of further investigation will consider more complicated geometric representation of elements of radio electronic systems.

KEYWORDS: temperature, heat conduction, nonlinear boundary-value problem, isotropic infinite thermosensitive plate with insulated faces, through inclusion, perfect thermal contact, heat flow.

NOMENCLATURE

2δ is the thickness of a heat-sensitive isotropic with respect to its thermophysical parameters plate ;

$2h$ is the length of a foreign through inclusion;

Ω_0 is the domain of the inclusion;

Ω_1 is the domain of the plate (beyond the inclusion);

K_- is the boundary surface of the plate, the system is heated by a heat stream; heat stream, whose surface density is $q_0 = \text{const}$;

K_+ is the part of the surface of the plate beyond the inclusion and is thermo-insulated;

$K_{\pm h}$ is the boundary surfaces of the inclusion;

$t(x, y)$ is the distribution of temperature with respect to the coordinates of space;

$\lambda(x, t)$ is the coefficient of heat conductivity of the et-erogeneous heat-sensitive plate;

$\lambda_0(t)$ is the coefficient of het conductivity of the material of the plate;

$\lambda_1(t)$ is the coefficient of heat conductivity of the material of the inclusion;

$S_{\pm}(\zeta)$ are the asymmetric unit functions;

$\vartheta(x, y)$ is the linearizing function;

Δ is the Laplace operator in the Cartesian system of coordinates;

t_j are the unknown approximated values;

$\delta_{\pm}(\zeta)$ is the asymmetric Dirac delta-function;

$\bar{\vartheta}(\xi, y)$ is the transform formula $\vartheta(x, y)$;

ξ is the parameter of Fourier integral transformation;

n is the number of intervals in the partition $]-l; l[$;

λ_m^0 are basic coefficients of heat conductivity of the materials of the inclusion ($m=0$); and the plate ($m=1$);

k_m is the temperature coefficients of heat conductivity of the materials of the inclusion ($m=0$); and the plate ($m=1$);

t^* is the dimensionless temperature;

x^*, y^* are the dimensionless coordinates of space;

$\lambda(x)$ is the coefficient of heat conductivity of the heterogeneous plate for the corresponding linear model.

INTRODUCTION

Composite materials, development of which is a leading problem of modern materials science, have become especially valuable in radioelectronic device's. The emergence of new composite materials with improved physico-mechanical performance will contribute to creation of new technologies in air-space, naval, power-generating, and electronic branches, in mechanical engineering, and transport. Among the composite materials an important place occupy structures with foreign inclusions, which are widely used structures of microelectronic devices, in particular, in integral sensors for monitoring of temperature and humidity, in light emitting elements for dynamic LED-backlighting etc. Because the aforesaid structures operate in a wide range of temperatures, their high performances cause the necessity of considering and solving of the problems which are non-linear due to the dependence of thermophysical characteristics of the materials on the temperature of the structure and on the conditions of heat exchange, on the temperature of their surfaces; because the calculations of the temperature fields which are performed on the basis of the linear mathematical models of heat conduction processes do not always give us satisfactory results [1]. Therefore, for creation of the most adequate to actual process mathematical model, it is necessary to take into account the dependencies of thermophysical characteristics of materials on temperature, on density of surface heat fluxes, and on intensity of internal heat sources; change of the shape of the body and possible phase and structural transformations are also to be taken into account [2, 3].

The object of study is the process of heat conduction for an element of radio electronic devices presented by a thermosensitive plate with a foreign inclusion.

© Havrysh V. I., Baranetskij Ya. O., Kolyasa L. I., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-1

In order to create a non-linear mathematical model of the process of heat-conduction in a thermosensitive non-homogeneous element of radio electronic systems, theory of generalized function has been used; and in order to construct a numerical-analytical solution of the corresponding boundary value problem, integral Fourier transformation and methods of solving partial differential equations were used.

The subject of study consists of non-linear mathematical models of heat-conduction process and methods of construction of numerical analytical solution of the corresponding boundary value problems for thermosensitive elements of radio electronic devices of piecewise-homogeneous structure.

The purpose of the work is the development of such a method of linearization of mathematical model of heat conduction which enables us to obtain the analytical-numerical solution of the corresponding non-linear boundary value problem for determination of temperature field in elements of radio electronic devices, which are geometrically represented by a thermosensitive plate with a through inclusion.

1 PROBLEM STATEMENT

Let us consider a heat-sensitive isotropic with respect to its thermophysical parameters plate of 2δ thickness with thermo-insulated faces $|z| = \pm\delta$. The plate contains a foreign through inclusion of $2h$ length. The plate is referenced to the Cartesian system of coordinates ($Oxyz$) with whose origin is in the centre of the inclusion. In the domain of the inclusion $\Omega_0 = \{(x, -l, z) : |x| \leq h, |y| \leq l, |z| \leq \delta\}$ of the boundary surface $K_- = \{(x, -l, z) : |x| < \infty, |z| \leq \delta\}$ of the plate, the system is heated by a heat stream, whose surface density is $q_0 = \text{const}$, and the other part of the surface of the plate beyond the inclusion and the surface $K_+ = \{(x, l, z) : |x| < \infty, |z| \leq \delta\}$ are thermo-insulated. At the boundary surfaces of the inclusion $K_{\pm h} = \{(\pm h, y, z) : |y| \leq l, |z| \leq \delta\}$ perfect heat contact takes place $t_0 = t_1$, $\lambda_0(t) \frac{\partial t_0}{\partial x} = \lambda_1(t) \frac{\partial t_1}{\partial x}$ for $|x| = h$ (0 – for inclusion, 1 – for plane) (fig. 1).

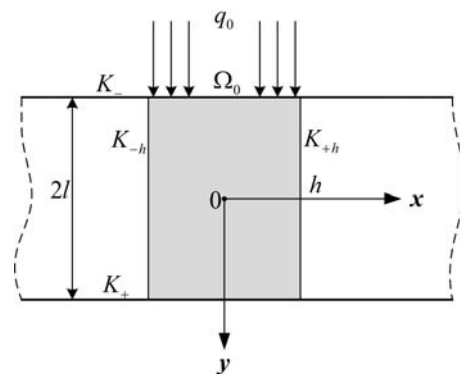


Figure 1 – Section of isotropic thermosensitive plate with foreign through inclusion by the plane $z = 0$

In the given structure, it is necessary to determine the distribution of temperature $t(x, y)$ with respect to the coordinates of space.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The determination of temperature conditions, both of homogeneous and non-homogeneous structures, draws attention of many researchers [4, 10].

In the work [11], a mathematical model of quasi-stationary temperature field in a continuous cylinder of rotation made of a composite material with non-linear boundary conditions is developed; the dependence of thermophysical parameters of material on temperature being taken into account. The obtained analytical expressions for determination of temperature fields enable us to select the composition of composite materials for cylinder-shaped parts in order to increase their service life.

One-dimensional (plane, cylindrically symmetric, and spherically symmetric) non-linear problems of heat-conduction are considered for a given flux of heat at the origin of coordinate systems in the form of exponential function depending on time. Approximation solutions of the aforesaid problems have been obtained, and there is convergence has been analyzed [12].

An analytical solution of the non-linear problem of heat-conduction has been constructed on the basis of integral method of heat balance [13]. In order to improve the accuracy of the solution, the temperature function is approximated by high-degree polynomials. To determine the coefficients of the polynomials, additional boundary conditions have been introduced. It is shown that the introduction of additional boundary conditions, as early as in the second approximation, leads to considerable improvement of the accuracy of the solution of the problem.

In the work [14], numerical-analytical solution of the non-stationary problem of heat-conduction for a hollow sphere has been constructed; thermophysical parameters of materials of the sphere being variable with temperature. In the particular case, a solution for a continuous sphere has been obtained. On the basis of variational approach, a non-linear mathematical model of heat-conduction process have been constructed for 2D-space with a thin inclusion, this enables us to take into account small thickness of a thick inclusion. For linearization of the stated problem, the Newton-Raphson's methods has been applied. Discretization with respect to temporal variable has been carried out in accordance with intermediate point scheme. The Discretization statement of the problem is presented in the form of minimization of a functional [15].

Investigations of temperature regimes for structural thermosensitive elements of a piece-wise homogeneous structure have been carried out in the works [16–19].

Article [20] solved a non-stationary problem on thermal conductivity and thermoelasticity for functional-gradient thick-wall spheres. Thermal-physical and thermoelastic parameters of materials, except for Poisson

coefficient, are arbitrary functions of the radial coordinate.

Axisymmetric stationary problem on thermal conductivity and thermoelasticity of the hollow functionally gradient areas relative to the heat source was considered. The solutions are obtained as functions from spatial coordinates for temperature, the displacement component vector and stress tensor by using boundary conditions for radial and angular coordinates [21].

In paper [22], a thermoelasticity solution for steady state response of thick cylinders which are subjected to pressure and external heat flux in inner surface is presented.

A general solution for the one-dimensional steady-state thermal and mechanical stresses in a hollow thick sphere made of porous functionally graded material (FGPM) is presented in [23].

The boundary value non-linear problem of heat conduction is determined below, the technique of its linearization and calculation formulae for determination of the temperature field in a heat-sensitive plate with a through inclusion which is heated by a heat stream concentrated at a surface of the inclusion is given. Numerical analysis under the condition of linear dependence of the coefficient heat conductivity on temperature is performed.

3 MATERIALS AND METHODS

In the given structure (in problem statement), it is necessary to determine the distribution of temperature $t(x, y)$ with respect to the coordinates of space which is obtained from solving the nonlinear equation of heat conduction [24, 25]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(x, t) \frac{\partial t}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(x, t) \frac{\partial t}{\partial y} \right] = 0 \quad (1)$$

with the boundary condition

$$\begin{aligned} t|_{|x| \rightarrow \infty} = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{|x| \rightarrow \infty} = 0, \quad \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=l} = 0, \\ \lambda_0(t) \frac{\partial t}{\partial y} \Big|_{y=-l} = -q_0 S_-(h-|x|), \end{aligned} \quad (2)$$

where $\lambda(x, t) = \lambda_1(t) + [\lambda_0(t) - \lambda_1(t)] S_-(h-|x|)$ is the coefficient of heat conductivity of the heterogeneous heat-sensitive plate; $\lambda_0(t)$, $\lambda_1(t)$ – are the coefficients of heat conductivity of the materials of the plate and the inclusion, respectively;

$$S_{\pm}(\zeta) = \begin{cases} 1, & \zeta > 0, \\ 0.5 \mp 0.5, & \zeta = 0, \\ 0, & \zeta < 0 \end{cases} \quad \text{is the asymmetric unit func-}$$

tions [26].

Let us introduce the linearizing function

$$\vartheta = \int_0^{t(x,y)} \lambda_1(\zeta) d\zeta + S_-(x+h) \int_{t(-h,y)}^{t(x,y)} [\lambda_0(\zeta) - \lambda_1(\zeta)] + S_+(x-h) \int_{t(h,y)}^{t(x,y)} [\lambda_0(\zeta) - \lambda_1(\zeta)] d\zeta, \quad (3)$$

having differentiated which with respect to the variables x and y , we obtain

$$\lambda(t,x) \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial \vartheta}{\partial x}, \quad \lambda(t,x) \frac{\partial t}{\partial y} = \frac{\partial \vartheta}{\partial y} + \left\{ [\lambda_0(t) - \lambda_1(t)] \frac{\partial t}{\partial y} \right\} \Big|_{x=-h} S_-(x+h) - \left\{ [\lambda_0(t) - \lambda_1(t)] \frac{\partial t}{\partial y} \right\} \Big|_{x=h} S_+(x-h). \quad (4)$$

Taking into account the expression (4), the original equation (1), assumes the following form:

$$\Delta \vartheta + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ [\lambda_0(t) - \lambda_1(t)] \frac{\partial t}{\partial y} \right\} \Big|_{x=-h} S_-(x+h) - \frac{\partial}{\partial y} \left\{ [\lambda_0(t) - \lambda_1(t)] \frac{\partial t}{\partial y} \right\} \Big|_{x=h} S_+(x-h) = 0, \quad (5)$$

where $\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$ is the Laplace operator in the Cartesian system of coordinates.

The boundary conditions with the use of the relation (3), are written as follows:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} \Big|_{y=l} = 0, \quad \vartheta \Big|_{|x| \rightarrow \infty} = 0, \quad \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \Big|_{|x| \rightarrow \infty} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} \Big|_{y=-l} = - \left\{ q_0 S_-(h-|x|) + \left[(\lambda_0(t) - \lambda_1(t)) \frac{\partial t}{\partial y} \right] \Big|_{x=-h} S_-(x+h) - \left[(\lambda_0(t) - \lambda_1(t)) \frac{\partial t}{\partial y} \right] \Big|_{x=h} S_+(x-h) \right\}. \quad (7)$$

The linearizing function (3) has enabled us to reduce the nonlinear boundary value problem (1), (2) to the partially linearized equation with discontinuous coefficients (5) and to the boundary conditions (6), (7).

Let us approximate the function $t(\pm h, y)$ in the form of Fig. 2 to the expression

$$t(\pm h, y) = t_1 + \sum_{j=1}^{n-1} (t_{j+1} - t_j) S_-(y - y_j), \quad (8)$$

where $y_j \in]-l; l[$; $y_1 \leq y_2 \leq \dots \leq y_{n-1}$; n is the number of intervals in the partition $]-l; l[$; t_j ($j = \overline{1, n}$) are the unknown approximated values of temperature.

© Havrysh V. I., Baranetskiy Ya. O., Kolyasa L. I., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-1

Having substituted the expression (8) into the relations (6), (7), we obtain the following partial linear differential equation relating the linearizing function

$$\Delta \vartheta = - \sum_{j=1}^{n-1} (t_{j+1} - t_j) [\lambda_0(t_{j+1}) - \lambda_1(t_{j+1})] S_-(h-|x|) \delta'_-(y - y_j) \quad (9)$$

with the boundary condition

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial y} \Big|_{y=-l} = -q_0 S_-(h-|x|). \quad (10)$$

Here $\delta_{\pm}(\zeta) = \frac{dS_{\pm}(\zeta)}{d\zeta}$ is the asymmetric Dirac delta-function [26].

Having applied Fourier integral transformation with respect to the coordinate x to the equation (9) and to the boundary condition (6), (10), we obtain the following ordinary differential equation with constant coefficients

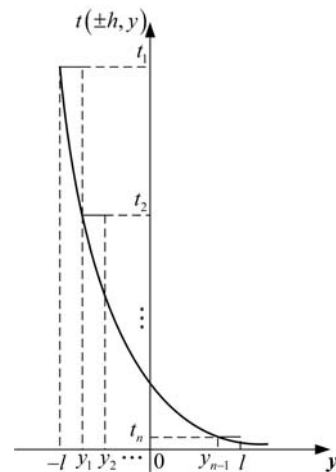


Figure 2 – Approximation of the function $t(\pm h, y)$

$$\frac{d^2 \bar{\vartheta}}{dy^2} - \xi^2 \bar{\vartheta} = - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{\sin \xi h}{\xi} \sum_{j=1}^{n-1} (t_{j+1} - t_j) [\lambda_0(t_{j+1}) - \lambda_1(t_{j+1})] \delta'_-(y - y_j). \quad (11)$$

with the boundary conditions

$$\frac{d \bar{\vartheta}}{dy} \Big|_{y=l} = 0, \quad \frac{d \bar{\vartheta}}{dy} \Big|_{y=-l} = - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{q_0}{\xi} \sin h \xi, \quad (12)$$

where $\bar{\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \vartheta e^{i\xi x} dx$ is the transform formula

$\vartheta(x, y)$; ξ is the parameter of Fourier integral transformation; $i^2 = -1$.

Having solved the problem (11), (12), then having applied the inverse to its solution Fourier integral transformation, we obtain the expression of the function ϑ

$$\Theta = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\xi} \sin h\xi \cos x\xi \left\{ \sum_{j=1}^{n-1} (t_{j+1} - t_j) [\lambda_0(t_{j+1}) - \lambda_1(t_{j+1})] \left[\frac{ch\xi(y+l)}{sh2\xi l} sh\xi(l-y_j) - ch\xi(y-y_j) S_-(y-y_j) \right] + \frac{q_0}{\xi} \frac{ch\xi(y-l)}{sh2\xi l} \right\} d\xi. \quad (13)$$

Having substituted the temperature dependence of the coefficient of heat conductivity of the materials of the plate and that of the inclusion into the relations (3), (13), after some transformations, we obtain the system of nonlinear equations for determining the unknown approximated values of the temperature t_j ($j = \overline{1, n}$).

For the given system, the unknown temperature field we determine by means of the obtained nonlinear equation with the use of the relations (3), (13) after substitution into them the concrete expressions of the dependence of coefficient of heat conductivity of the structural materials on temperature.

4 EXPERIMENTS

To solve many practical problems, the following dependence of the coefficient of thermal conductivity on temperature is used [27, 28]:

$$\lambda = \lambda_m^0 (1 - k_m t), \quad (14)$$

where λ_m^0, k_m are basic and temperature coefficients of heat conductivity of the materials of the inclusion ($m=0$) and the plate ($m=1$).

Numerical analysis of the dimensionless temperature $t^* = \lambda_0 t / (q_0 h)$ is carried out for the following initial data: material of the layer is VK94-I ceramics, the material of the inclusion is silver, $n=10$ is the number of intervals in the partition $]-l; l[; l/h=1$. In the temperature interval $[20^\circ\text{C}; 1230^\circ\text{C}]$, the temperature dependencies of the the coefficient of heat conductivity for the given materials are expressed as follows:

$$\begin{aligned} \lambda_1(t) &= 13,67 \frac{\text{W}}{\text{Km}} (1 - 0,00064 \frac{1}{\text{K}} t), \\ \lambda_0(t) &= 422,54 \frac{\text{W}}{\text{Km}} (1 - 0,00031 \frac{1}{\text{K}} t), \end{aligned} \quad (15)$$

which is a partial case of the relation (14).

Let us express the temperature field for the corresponding linear model from the following relation

$$\lambda(x) t(x, y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{\xi} \{ (\lambda_0 - \lambda_1) [t_1 +$$

$$\begin{aligned} &+ \sum_{j=1}^{n-1} (t_{j+1} - t_j) \left(\frac{ch\xi(l+y)}{sh2\xi l} sh\xi(l-y_j) + \right. \\ &+ (1 - ch\xi(y-y_j)) S_-(y-y_j) \} [\sin \xi(x+h) - \sin \xi(x-h)] + \\ &+ \frac{2q_0 ch\xi(y-l)}{\xi sh2\xi l} \cos \xi x \sin \xi h \} d\xi. \end{aligned}$$

The given expression enables us to obtain numerical results represented in Fig. 3b for the considered structure materials with the constant coefficients of their heat conductivities

$$\lambda_1 = 13,4 \text{ W / (Km)}, \lambda_0 = 419 \text{ W / (Km)}.$$

The dependence of the dimensionless temperature t^* on the special dimensionless coordinate $x^* = x/h$ and $y^* = y/h$ is shown in Fig. 3. Note, that the maximal value of temperature is reached in the domain of the action of the concentrated heat stream, and at the edge $K_{\pm h}$ of the inclusion, the satisfaction of the conditions of perfect heat contact (no temperature jump) is observed; this is in accordance to the considerate mathematical model.

The change in dimensionless temperature t^* depending on the dimensionless coordinates y^* for $x^* = 0$ (Fig. 4a) and on x^* for $y^* = 0$ (Fig. 4b) is shown in Fig. 4. The behavior of the curves indicates the adequacy of the mathematical model to the actual physical process, since at the surface of the inclusion the perfect contact is observed (no jump in temperature).

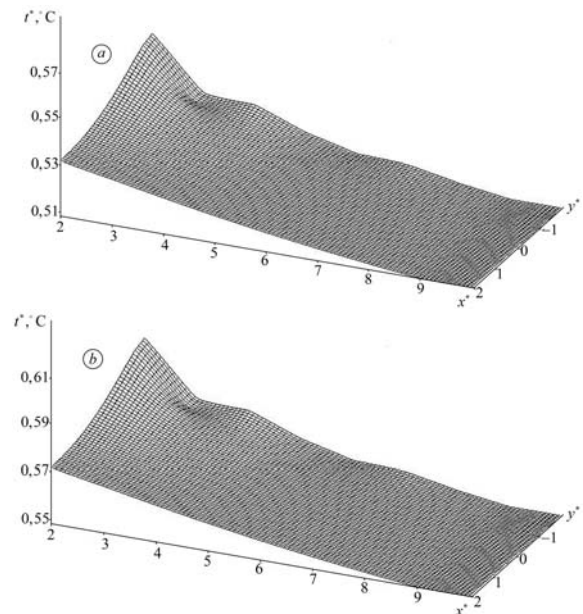


Figure 3 – Dependence of dimensionless temperature t^* on dimensionless coordinates x^* and y^* for linearly variable (a) and constant (b) coefficient of heat conductivity of materials of structure

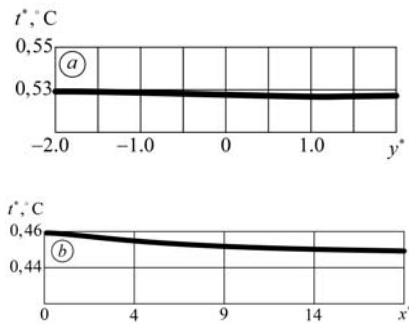


Figure 4 – Dependence of dimensionless temperature t^* on dimensionless coordinates y^* for $x^* = 0$ (a) and x^* for $y^* = 0$ (b).

5 RESULTS

Having taken into account the relationship (14), from the expressions (3), (13), we obtain the formulae for determining the temperature t in the domain of the inclusion

$$t = \frac{1}{k_0} \left(1 - \sqrt{1 - k_0 \left(\frac{29}{\lambda_0^0} + \vartheta_1 \right)} \right), \quad (16)$$

in the domain $\Omega_1 = \{(x, y, z) : |x| > h, |y| \leq l, |z| \leq \delta\}$ of the plate (beyond the inclusion)

$$t = \frac{1}{k_1} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2k_1 \vartheta}{\lambda_1^0}} \right). \quad (17)$$

Here

$$\vartheta_1 = \left\{ t \left[2 - k_0 t - \frac{\lambda_1^0}{\lambda_0^0} (2 - k_1 t) \right] \right\} \Big|_{x=h};$$

$$t \Big|_{x=h} = \frac{1}{k_1} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2k_1}{\lambda_1^0} \vartheta} \right) \Big|_{x=h}.$$

The formulae (16), (17) completely describe the temperature field in a heat-sensitive layer with a foreign-through inclusion (fig. 1).

The number of intervals $n=10$ in the partition $]-l; l[$ for the given thermophysical (basic and temperature coefficients of heat conductivity for the materials of the plate and that of the inclusion) and geometric (length and width of the inclusion, width of the plate) parameters of the structure enables us to perform calculations accurate to $\varepsilon = 10^{-6}$.

6 DISCUSSION

In the course of development and investigation of linear and non-linear mathematical models of heat conduction process for structures which are geometrically de-

scribed by means of the presented piece-wise homogeneous structures, it is detected that the numerical results of temperature field for the considered materials in the case of constant coefficient of thermal conductivity differ by 7% from those for linear variable. This indicates that the consideration of the dependence of thermophysical parameters on temperature of materials of structural elements of complex systems are important, since results which are obtained with the use of nonlinear models are more accurate. The consideration of piece-wise homogeneous structure of elements of the object is also important in the investigations presented; this makes the solving of corresponding linear and non-linear boundary value problems considerably more complicated; but solution of such problems describes temperature distribution in more adequate way to the actual process.

CONCLUSIONS

The introduced linearizing function enables us to partially linearize the original nonlinear boundary value problem, and the suggested piecewise-linear approximation of temperature at the boundary surfaces of the inclusion to completely linearize the equation and the boundary condition. Due to this it became possible to apply Fourier integral transformation to the obtained linear problem relating the suggested function and to obtain its analytical-numerical solution. The linear temperature dependence of coefficient of heat conductivity of the materials of the inclusion and that of the plate is considered. On the basis of this, the formulae for the calculation of the values of the temperature in the considered “plate-inclusion” structure are given. The obtained results for the chosen materials under linear dependence of coefficient of heat conductivity on temperature (Fig. 3a) differ from the results obtained under the condition of constant coefficient (Fig. 3b) by 7%. Their inconsiderable difference is accounted for by the fact that the actual values of the temperature coefficient of the heat conductivity for the considered materials are small.

REFERENCES

1. Savatorova V. L. Reshenie uravneniya teploprovodnosti v neodnorodnoj srede s uchetom temperaturnoj zavisimosti koeficienta teploprovodnosti, *Obozrenie prikladnoj i promyshlennoj matematiki*, 2009, 17, No. 1, pp. 135–137.
2. Kudinov V. A. Analiz nelinejnoj teploprovodnosti na osnove opredelenija fronta temperaturnogo vozmushhenija, *Teplofizika vysokih temperatur*, 2006, 44, No. 3, pp. 577–585.
3. Kudrjashov N. A. Priblizhennye reshenija odnomernyh zadach nelinejnoj teploprovodnosti pri zadannom potoke, *Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoi fiziki*, 2007, 47, No. 1, pp. 110–120.
4. Carpinteri A., Paggi M. Thermoelastic mismatch in nonhomogeneous beams, *J. Eng. Math.*, 2008, 61, No. 2–4, pp. 371–384.
5. Noda N. Thermal stresses in materials with temperature-dependent properties, *Appl. Mech. Rev.*, 1991, 44, pp. 383–397.

6. Noda N. Thermal stresses in materials with temperature-dependent properties, *Appl. Mech. Rev.*, 1991, 44, pp. 383–397.
7. Otao Y., Tanigawa O., Ishimaru O. Optimization of material composition of functionality graded plate for thermal stress relaxation using a genetic algorithm, *J. Therm. Stresses*, 2000, 23, pp. 257–271.
8. Tanigawa Y., Akai T., Kawamura R. Transient heat conduction and thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent material properties, *J. Therm. Stresses*, 1996, 19, No. 1, pp. 77–102.
9. Tanigawa Y., Otao Y. Transient thermoelastic analysis of functionally graded plate with temperature-dependent material properties taking into account the thermal radiation, *Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu*, 2002, 2, pp. 133–134.
10. Yangian Xu., Daihui Tu. Analysis of steady thermal stress in a ZrO₂/FGM/Ti-6Al-4V composite ECBF plate with temperature-dependent material properties by NFEM, *2009-WASE Int. Conf. on Informa. Eng.*, Vol. 2–2, pp. 433–436.
11. Golicyna E. V., Osipov Ju. R. Kvizistacionnaja trehmernaja zadacha teploprovodnosti vo vrashhajushhemsja sploshnom cilindre iz kompozicionnogo materiala s nelinejnymi granichnymi uslovijami, *Konstrukcii iz kompozicionnyh materialov*, 2007, No. 4, pp. 47–58.
12. Kudrjashov N. A., Chmyhov M. A. Priblizhennye reshenija pervoj i vtoroj kraevyh zadach nelinejnoj teploprovodnosti na polubeskonechnoj prjamoj, *Inzhenernaja fizika*, 2007, No. 3, pp. 12–15.
13. Kudinov V. A., Averin B. V., Stefanyuk E. V., Nazarenko S. A. Analysis of nonlinear heat conduction based on determining the front of temperature perturbation, *High Temperature*, 2006, 44, № 4, pp. 574–583.
14. Popovich V. S., Ivankiv K. S. Nelinijna zadacha teploprovodnosti dlja kuli z teploobminom, *Visnik L'viv. un-tu. Ser. Prikl. matematika ta informatika*, 2002, No. 5, pp. 136–144.
15. Savula Ja. G., Djakonjuk L. M. Doslidzhennja variacijnoї zadachi teploprovodnosti u bagatosharovih seredovishhah z tonkimi vkluchennjami, *Visnik LNU im. I. Franka, Ser. prikl. matem. ta informat.*, 2000, No. 3, pp. 125–130.
16. Gavrish V. I., Fedasjuk D. V. Modeljuvannja temperaturnih rezhimiv u kuskovo-odnorodnih strukturah. L'viv: V-vo Nac. un-tu «L'vivs'ka politehnika», 2012, 176 p.
17. Gavrysh V. I. Chislenno-analiticheskoe reshenie nelinejnoj stacionarnoj zadachi teploprovodnosti dlja beskonechnoj termochuvstvitel'noj mnogoslojnoj plastiny, *Jelektronnoe modelirovanie*, 2014, 36, No. 3, pp. 59–70.
18. Gavrish V. I. Doslidzhennja temperaturnih rezhimiv u termochutlivij plastini z chuzhoridnim naskriznim vkluchennjam, *Fiziko-matematichne modeljuvannja ta informacijni tehnologii. Naukovij zbirnik*, 2013, Vipusk 18, pp. 43–50.
19. Gavrish V. I. Nelinijna krajova zadacha teploprovodnosti dlja sharuvatoї plastini z vkluchennjam, *Fiziko-himichna mehanika*, 2015, 51, No. 3, pp. 32–38.
20. Bayat A., Moosavi H., Bayat Y. Thermo-mechanical analysis of functionally graded thick spheres with linearly time-dependent temperature [Text], *Scientia Iranica*, 2015, Vol. 22, Issue 5, pp. 1801–1812.
21. Mohazzab A. H., Jabbari M. Two-Dimensional Stresses in a Hollow FG Sphere with Heat Source [Text], *Advanced Materials Research*, 2011, Vol. 264–265, pp. 700–705. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.264-265.700
22. Ghannad M., Yaghoobi M. P. A thermoelasticity solution for thick cylinders subjected to thermo-mechanical loads under various boundary conditions, *International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology*, 2015, Vol. 8, No. 4, pp. 1–12.
23. Jabbari M., Karampour S., Eslami M. R. Radially symmetric steady state thermal and mechanical stresses of a poro FGM hollow sphere, *International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering*, 2011, Vol. 2011, pp. 1–7. Article ID 305402. DOI: 10.5402/2011/305402
24. Podstrigach Ja. S., Lomakin V. A., Koljano Ju. M. Termouprugost' tel neodnorodnoj struktury. Moscow, Nauka, 1984, 368 p.
25. Koljano Ju. M. Metody teploprovodnosti i termouprugosti neodnorodnogo tela. Kiev, Naukova dumka, 1992, 280 p.
26. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. Moscow, Nauka, 1977, 720 p.
27. Lomakin V. A. Teorija uprugosti neodnorodnyh tel. Moscow, Izd-vo Mosk. un-ta, 1976, 376 p.
28. Berman R. Teploprovodnost' tverdyh tel. Moscow, Mir, 1979, 288 p.

Received 11.06.2017.
Accepted 18.01.2018.

УДК 536.24

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ РЕЖИМІВ У НЕОДНОРІДНИХ ТЕРМОЧУТЛИВИХ ЕЛЕМЕНТАХ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ

Гавриш В. І. – д-р техн. наук, професор кафедри програмного забезпечення, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Баранецький Я. О. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри вищої математики, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Коляса Л. І. – канд. фіз.-мат. наук, старший викладач кафедри вищої математики, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розв'язано нелінійну крайову задачу теплопровідності для термочутливого неоднорідного елемента радіоелектронної системи у вигляді смуги з наскрізним включенням, аналітично-числовий розв'язок якої дає змогу аналізувати у ньому температурні режими. Мета роботи – розробка методу лінеаризації нелінійної математичної моделі теплопровідності, який дає змогу отримати аналітично-числовий розв'язок відповідної нелінійної крайової задачі для визна-

чення температурного поля в елементі радіоелектронних пристроїв, які геометрично зображено термочутливою пластиною з наскрізним включенням.

Метод. Запропоновано лінеаризуючу функцію, яка дає змогу частково лінеаризувати вихідну нелінійну математичну модель теплопровідності для термочутливого неоднорідного елемента радіоелектронної системи у вигляді конструкції «пластина-включення». Введена кусково-лінійна апроксимація температури на поверхнях спряження пластини з включенням дозволила повністю лінеаризувати відповідну частково лінеаризовану крайову задачу відносно лінеаризуючої функції. Після цього стало можливим застосувати інтегральне перетворення Фур'є за однією з просторових координат до отриманої лінійної задачі та визначити лінеаризуючу функцію. Розглянуто лінійну залежність коефіцієнта теплопровідності від температури для конструкційних матеріалів з використанням лінеаризуючої функції. Шляхом розв'язання крайової задачі отримано формули для визначення температурного поля в термочутливій конструкції «пластина-включення».

Результати. Із використанням отриманих формул для визначення температурного поля у термочутливому неоднорідному елементі радіоелектронної системи створено обчислювальні програми, які дають змогу отримати числові значення розподілу температури та аналізувати температурні режими.

Висновки. Розроблена математична модель розрахунку температурного поля в термочутливій конструкції «пластина-включення» є адекватною до реального фізичного процесу так як не спостерігається стрибка температури на поверхнях спряження пластини з включенням. Числові результати для вибраних матеріалів за лінійної залежності коефіцієнта теплопровідності від температури відрізняються від результатів, отриманих для сталого коефіцієнта теплопровідності, на 7%. Перспективи подальших досліджень полягатимуть у розгляді складніших геометричних зображень елементів радіоелектронних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: температура, теплопровідність, нелінійна крайова задача, ізотропна безмежна термочутлива пластина з теплоізованими лицевими поверхнями, чужорідне наскрізне включення, ідеальний тепловий контакт, тепловий потік.

УДК 536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТАХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

Гаврыш В. И. – д-р техн. наук, профессор кафедры программного обеспечения, Национальный университет «Львовская Политехника», Львов, Украина.

Баранецкий Я. О. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры высшей математики, Национальный университет «Львовская Политехника», Львов, Украина.

Коляса Л. И. – канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры высшей математики, Национальный университет «Львовская Политехника», Львов, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Получено решение нелинейной краевой задачи теплопроводности для термочувствительного неоднородного элемента радиоэлектронной системы в виде полосу со сквозным включением, численно-аналитическое решение которой позволяет анализировать в нем температурные режимы. Цель работы – разработка метода линеаризации нелинейной математической модели теплопроводности, который позволяет получить численно-аналитическое решение соответствующей нелинейной краевой задачи для определения температурного поля в элементе радиоэлектронных устройств, которые геометрически изображены термочувствительной пластиной со сквозным включением.

Метод. Предложено линеаризующую функцию, которая позволяет частично линеаризовать исходную нелинейную математическую модель теплопроводности для термочувствительного неоднородного элемента радиоэлектронной системы в виде конструкции «пластина-включение». Введенная кусочно-линейная аппроксимация температуры на поверхностях сопряжения пластин с включением позволила полностью линеаризовать соответствующую частично линеаризованную краевую задачу относительно линеаризующей функции. После этого стало возможным применить интегральное преобразование Фурье по одной из пространственных координат к полученной линейной задаче и определить линеаризующую функцию. Рассмотрено линейную зависимость коэффициента теплопроводности от температуры для конструкционных материалов с использованием линеаризующей функции. Путем решения краевой задачи получены формулы для определения температурного поля в термочувствительной конструкции «пластина-включение».

Результаты. С использованием полученных формул для определения температурного поля в термочувствительном неоднородном элементе радиоэлектронной системы созданы вычислительные программы, которые позволяют получить числовые значения распределения температуры и анализировать температурные режимы.

Выводы. Разработана математическая модель расчета температурного поля в термочувствительной конструкции «пластина-включение» является адекватной к реальному физическому процессу так как не наблюдается скачка температуры на поверхностях сопряжения пластин с включением. Числовые результаты для выбранных материалов по линейной зависимости коэффициента теплопроводности от температуры отличаются от результатов, полученных для постоянного коэффициента теплопроводности, на 7%. Перспективы дальнейших исследований будут заключаться в рассмотрении сложных геометрических изображений элементов радиоэлектронных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: температура, теплопроводность, нелинейная краевая задача, изотропная термочувствительная пластина с теплоизолированными лицевыми поверхностями, инородное сквозное включения, идеальный тепловой контакт, тепловой поток.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Саваторова В. Л. Решение уравнения теплопроводности в неоднородной среде с учетом температурной зависимости коэффициента теплопроводности / В. Л. Саваторова // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2009. – 17, № 1. – С. 135–137.
2. Кудинов В. А. Анализ нелинейной теплопроводности на основе определения фронта температурного возмущения / В. А. Кудинов // Теплофизика высоких температур. – 2006. – 44, № 3. – С. 577–585.
3. Кудряшов Н. А. Приближенные решения одномерных задач нелинейной теплопроводности при заданном потоке / Н. А. Кудряшов // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2007. – 47, № 1. – С. 110–120.
4. Carpinteri A. Thermoelastic mismatch in nonhomogeneous beams / A. Carpinteri, M. Paggi // J. Eng. Math. – 2008. – 61, No. 2–4. – P. 371–384.
5. Noda N. Thermal stresses in materials with temperature-dependent properties / N. Noda // Appl. Mech. Rev. – 1991. – 44. – P. 383–397.
6. Noda N. Thermal stresses in materials with temperature-dependent properties / N. Noda // Appl. Mech. Rev. – 1991. – 44. – P. 383–397.
7. Otao Y. Optimization of material composition of functionally graded plate for thermal stress relaxation using a genetic algorithm / Y. Otao, O. Tanigawa, O. Ishimaru // J. Therm. Stresses. – 2000. – 23. – P. 257–271.
8. Tanigawa Y. Transient heat conduction and thermal stress problems of a nonhomogeneous plate with temperature-dependent material properties / Y. Tanigawa, T. Akai, R. Kawamura // J. Therm. Stresses. – 1996. – 19, No. 1. – P. 77–102.
9. Tanigawa Y. Transient thermoelastic analysis of functionally graded plate with temperature-dependent material properties taking into account the thermal radiation / Y. Tanigawa, Y. Otao // Nihon Kikai Gakkai Nenji Taikai Koen Ronbunshu. – 2002. – 2. – P. 133–134.
10. Yangian Xu. Analysis of steady thermal stress in a ZrO₂/FGM/Ti-6Al-4V composite ECBF plate with temperature-dependent material properties by NFEM / Xu. Yangian, Tu. Daihui // 2009-WASE Int. Conf. on Informa. Eng. – Vol. 2–2. – P. 433–436.
11. Голицына Е. В. Квазистационарная трехмерная задача теплопроводности во вращающемся сплошном цилиндре из композиционного материала с нелинейными граничными условиями / Е. В. Голицына, Ю. Р. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – 2007. – № 4. – С. 47–58.
12. Кудряшов Н. А. Приближенные решения первой и второй краевых задач нелинейной теплопроводности на полубесконечной прямой / Н. А. Кудряшов, М. А. Чмыхов // Инженерная физика. – 2007. – № 3. – С. 12–15.
13. Kudinov V. A. Analysis of nonlinear heat conduction based on determining the front of temperature perturbation / V. A. Kudinov, B. V. Averin, E. V. Stefanyuk, S. A. Nazarenko // High Temperature. – 2006. – 44, № 4. – P. 574–583.
14. Попович В. С. Нелінійна задача теплопровідності для кулі з теплообміном / В. С. Попович, К. С. Іванків // Вісник Львів. ун-ту. Сер. Прикл. математика та інформатика. – 2002. – № 5. – С. 136–144.
15. Савула Я. Г. Дослідження варіаційної задачі теплопровідності у багатошарових середовищах з тонкими включеннями / Я. Г. Савула, Л. М. Дяконюк // Вісник ЛНУ ім. І. Франка, Сер. прикл. матем. та інформат. – 2000. – № 3. – С. 125–130.
16. Гавриш В. І. Моделювання температурних режимів у кусково-однорідних структурах / В. І. Гавриш, Д. В. Федасюк. – Львів : В-во Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2012. – 176 с.
17. Гавриш В. І. Численно-аналитическое решение нелинейной стационарной задачи теплопроводности для бесконечной термочувствительной многослойной пластины / В. И. Гавриш // Электронное моделирование. – 2014. – 36, № 3. – С. 59–70.
18. Гавриш В. І. Дослідження температурних режимів у термочутливій пластині з чужорідним наскрізним включенням / В. І. Гавриш // Фізико-математичне моделювання та інформаційні технології. Науковий збірник. – 2013. – Випуск 18. – С. 43–50.
19. Гавриш В. І. Нелінійна крайова задача теплопровідності для шаруватої пластини з включенням / В. І. Гавриш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – 51, № 3. – С. 32–38.
20. Bayat A. Thermo-mechanical analysis of functionally graded thick spheres with linearly time-dependent temperature [Text] / A. Bayat, H. Moosavi, Y. Bayat // Scientia Iranica. – 2015. – Vol. 22, Issue 5. – P. 1801–1812.
21. Mohazzab A. H. Two-Dimensional Stresses in a Hollow FG Sphere with Heat Source [Text] / A. H. Mohazzab, M. Jabbari // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 264–265. – P. 700–705. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.264-265.700
22. Ghannad M. A thermoelasticity solution for thick cylinders subjected to thermo-mechanical loads under various boundary conditions / M. Ghannad, M. P. Yaghoobi // International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 8, No. 4. – P. 1–12.
23. Jabbari M. Radially symmetric steady state thermal and mechanical stresses of a poro FGM hollow sphere / M. Jabbari, S. Karampour, M. R. Eslami // International Scholarly Research Network ISRN Mechanical Engineering. – 2011. – Vol. 2011. – P. 1–7. Article ID 305402, DOI: 10.5402/2011/305402
24. Подстригач Я. С. Термоупругость тел неоднородной структуры / Я. С. Подстригач, В. А. Ломакин, Ю. М. Коляно. – М. : Наука, 1984. – 368 с.
25. Коляно Ю. М. Методы теплопроводности и термоупругости неоднородного тела / Ю. М. Коляно. – К. : Наукова думка, 1992. – 280 с.
26. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1977. – 720 с.
27. Ломакин В. А. Теория упругости неоднородных тел / В. А. Ломакин. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1976. – 376 с.
28. Берман Р. Теплопроводность твердых тел / Р. Берман. – М. : Мир, 1979. – 288 с.

УДК 621.315.592

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОМІГРАЦІЇ В ТЕХНОЛОГІЇ СИЛОВИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПРИЛАДІВ

Кравчина В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікроелектронних інформаційних систем, Запорізька державна інженерна академія, Запоріжжя, Україна.

Полухін О. С. – провідний інженер ТОВ «Елемент-Перетворювач», Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проведені дослідження дозволяють удосконалити технологічні процеси виготовлення н/п приладів та контроль їх якості.

Мета роботи – розробка і вдосконалення технології СНП з використанням процесів ТМ Al та дослідження рельєфу травлення кремнію в області p^+ -Si ізоляції. Досліджувався вплив часу відпалу на особливості МТ канавок в області термоміграції.

Метод. Об'єктом дослідження були технологічні особливості процесів формування структур за різними маршрутами, що відрізняються послідовністю проведення процесів формування активних структур, а саме процесів відпалу структур і термоміграції Al.

Результати. В роботі проаналізовані причини зміни напруги пробою p - n -переходів вертикальних наскрізних областей, створених термоміграцією, в залежності від часу відпалу н/п структур. На зразках з оптимальним режимом відпалу в 16 годин при температурі 1250 °C спостерігаються максимальні напруги пробою шарів ізоляції та мінімальні величини МПТ канавок травлення кремнію різного типу провідності в області ізоляції кристалів наскрізними ТМ шарами. Такий мінімальний мікрорельєф визначає мінімум залишкових механічних напружень. Показано, що при виготовленні н/п структур приладів більшої потужності із зворотною напругою 2000 В, оптимальним є варіант маршруту, коли спочатку проводять процеси загонки домішок глибоких активних шарів, а потім проводять процеси ТМ при формуванні шарів ізоляції. Надалі проводять суміщений відпал як ізоляції, так і активних шарів. Таке суміщення процесів відпалу покращує характеристики структур.

Висновки. В роботі визначено оптимальний маршрут, режим відпалу структур та показано, що контроль змін кінетики травлення шарів кремнію в області ТМ домішки алюмінію допомагає у визначенні оптимальних режимів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: відпал, ізоляція, мікрорельєф канавок, лінійні зони, ТМ, силові напівпровідникові пристрої.

АБРЕВІАТУРА

н/п – напівпровідник;

ВО – відокремлювальна область ізоляції;

СНП – силові напівпровідникові прилади;

ТМ – термоміграція Al, термоміграційний;

ФМе – фотолітографія по металу;

ВВЗ – високотемпературне вибіркоче змочування

Si у вікнах SiO₂ розплавом Al;

ФК – фотолітографія «контакти» (формування вікон в SiO₂ під ТМ);

МПТ – мікрорельєф поверхні травлення в області ТМ.

НОМЕНКЛАТУРА

U_R – напруга пробою шару ізоляції;

dT/dx – градієнт температури;

p^+ -Si – шар ТМ кремнію, легованого Al;

C – концентрація атомів кремнію;

Al-Si – розплав лінійної зони;

n -Si – вихідний кремній n - типу провідності;

C_1^* , C_2^* – концентрація Si відповідно на холодній та гарячій стороні розплаву зони Al-Si;

T_1 – температура холодної сторони розплаву зони Al-Si;

T_2 – температура гарячої сторони розплаву зони Al-Si;

t_{BO} – час другого етапу відпалу структур;

t_{1f} – час першого етапу відпалу структур;

D_{Al} – коефіцієнт дифузії алюмінію;

C_1 , C_2 – рівноважна концентрація Si відповідно на холодній та гарячій поверхні розплаву зони Al-Si;

C_{BO} – концентрація домішки Al в ТМ каналі;

[100] – кристалографічна орієнтація пластин Si;

C_{nSi} – концентрація домішки фосфору у вихідній пластині Si;

CP – стандартний розчин для травлення Si;

ρ_{ST} – поверхневий опір пластин після проведення ТМ;

ρ_s – поверхневий опір вихідних пластин;

h_{n-Si} – глибина канавки травлення n -Si;

$\Delta h_{Si\sigma}$ – висота горбка Si(σ) з механічними напруженнями відносно рівня h_{n-Si} ;

Δh_{p-Si} – глибина канавок у місцях заглиблень p^+ -Si відносно рівня h_{n-Si} ;

$L_{Si\sigma}$ – ширина одного горбка Si(σ) каналу p^+ -Si;

L – ширина між зовнішніми краями виступів Si(σ) одного ТМ каналу p^+ -Si;

l_m – ширина вікон в масці SiO₂ після фотолітографії ФК, стартова ширина зони ТМ;

l_{mh} – ширина зони ТМ на рівні h_{n-Si} ;

Δl_{p-n} – величина бокового травлення заглиблення p^+ -Si;

L_{kt} – ширина заглиблення p^+ -Si на рівні h_{n-Si} ;

I_R – зворотний струм просочування;

H_{Si} – товщина вихідної пластини n -Si;

H_{n-Si} – товщина пластини після травлення в області n -Si;

$H_{Si\sigma}$ – товщина пластини в області горбків Si(σ);

H_{p-Si} – товщина пластини в місці заглиблень p^+ -Si;

U_{Rmax} – максимальна напруга пробою для вибірки приладів одного часу відпалу;

V – швидкість руху фази розплаву зони Al-Si;

d_{Al} – величина латеральної дифузії алюмінію при відпалі ВО;

Si(σ) – шар Si з механічними напруженнями за межами каналу ТМ.

ВСТУП

Сучасні СНП на струм до 200–250 А і зворотну напругу до 3 кВ виготовлюються, як правило, в модульному варіанті конструкції з пластмасовим корпусом, де чипи силових елементів (діодів, тиристорів, симисторів, фототиристорів та ін.) змонтовані на ізолюваній теплопровідній підкладці з металізованої кераміки. Кристали, зазвичай прямокутної або квадратної форми, формуються та випробуються за груповою технологією на пластинах кремнію. Перед монтажем на металізовану підкладку пластини розділяються на чипи. Ізоляція легованих активних шарів окремих кристалів формується завдяки створенню по периферії кристалів локальних наскрізних дифузійних ВО.

Об'єктом дослідження є технологія формування ізоляції за допомогою локальних ВО. ВО на пластинах створюють різними методами: двобічною дифузією, термоміграцією та ін. Найбільш перспективними є розроблені та вдосконалювані технології на основі процесів ТМ. Предмет дослідження становлять структури н/п приладів, які сформовані із застосуванням процесів ТМ.

Метою роботи є розробка і вдосконалення технології СНП з використанням процесів ТМ Al та дослідження процесів травлення кремнію ВО.

1 ПОСТАНОВА ЗАДАЧІ

Групова технологія виготовлення СНП із застосуванням процесів ТМ алюмінію передбачає використання процесів травлення кремнію та формування меза-каналок на поверхні пластин в області p^+ -Si ізоляції, які відкривають вертикальні випрямні p - n -переходи ВО. В канавках осаджується та формується ізоляційна діелектрична плівка, яка в поєднанні з ізоляцією p - n -переходом ТМ p^+ -Si визначає властивості та електрофізичні характеристики ізоляції СНП. Н/п структури діоду, які виготовлені за такою технологією показані на рис. 1.

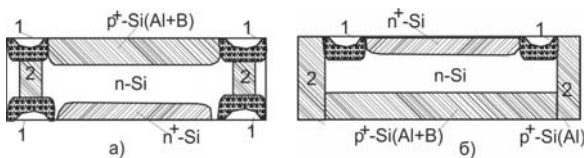


Рисунок 1 – Н/п структури діоду з ізоляцією ТМ та легкосплавними стеклами: а) формування каналок 1 над ТМ каналом p^+ -Si(Al) – 2; б) виведення контакту від p^+ -Si(Al+B) аноду на одну сторону з контактом до n^+ -Si катоду за допомогою каналу 2 випрямних p - n -переходів

Форма, глибина та рельєф канавок впливає на величину струму просочування I_R та напругу пробоя U_R , тому важливе значення має дослідження особливостей процесів травлення шарів кремнію в області формування термоміграційних каналів. При формуванні якісної ізоляції н/п структур повинні виконуватися певні вимоги відносно електрофізичних властивостей вертикальних ВО, які не повинні поступатися

властивостям плоских активних переходів. Виконання таких вимог пов'язано з якісним відновленням порушень структури, які утворилися в процесі ТМ, а дослідження кінетики травлення канавок допомагають контролювати цей процес. Задачею роботи є оптимізація технології формування н/п структур СНП.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

ТМ або зонна перекристалізація градієнтом температури [1] – спосіб, пов'язаний з послідовною перекристалізацією н/п матеріалу рідинною зоною металу – розчинника, що рухається в полі градієнта температури, залишаючи позаду себе перекристалізований шар, легований атомами металу – розчинника з концентрацією, яка визначається рівноважною розчинністю при температурі процесу. Найбільш перспективним способом створення ВО є ТМ лінійних зон на основі алюмінію [1–6]. Оскільки процес проходить в умовах, які є близькими до рівноважних [1], і концентраційне переохолодження є надзвичайно малим, то створені в такий спосіб ВО відповідають вимогам досконалості електрофізичних властивостей та кристалографічної довершеності. Реалізація наскрізної ізоляції, шляхом тривалої двосторонньої дифузії бору або бору з алюмінієм, збільшує пробивну напругу високовольтних p - n -переходів, забезпечує ефективний тепловідвід, спрощує процес контролю кристалів на пластині і пайку їх на підставу, виключає деградацію зворотної гілки вольт-амперної характеристики через механічні напруження на паяному шві та ін. [6, 7]. Проте час формування наскрізних областей шляхом двобічної дифузії є неприпустимо великим (для бору – близько тижня, для бору з алюмінієм – близько 72 годин при температурі 1280 °С). Властивості структур кремнію під час такої довготривалої термічної обробки погіршуються. Використання термоміграції рідинного розплаву Si-Al в якості альтернативи двосторонньому дифузійному легуванню розділових p^+ -областей дозволяє в сотні разів зменшити час їх формування. Відповідно до зменшення часу високотемпературного процесу зменшується бокове легування ВО. Для формування якісної ізоляції з малими струмами просочування важливим є невисока концентрація фонових домішок. В процесі ТМ, за рахунок процесів кристалізації, відбувається зменшення концентрації фонових домішок, в тому числі і вихідної домішки пластини [2, 8].

Спрощено процес ТМ можна пояснити на прикладі поведінки рідинної фази розплаву Al-Si, що занурена в об'єм кремнію та має градієнт температури dT/dx (рис. 2а). Нижній край рідинної фази при цьому має температуру T_1 , а верхній відповідно T_2 ($T_2 > T_1$). Цим температурам згідно фазовій діаграмі відповідають рівноважні концентрації кремнію в розплаві C_1 і C_2 ($C_2 > C_1$) (рис. 2б). Оскільки концентрація кремнію більше на «гарячій» стороні рідинної фази, ніж на «холодній», то в рідинній фазі відбувається дифузійний переніс кремнію від «гарячої» сторони T_2 до «холодної» T_1 . За рахунок цих додаткових атомів концентра-

ція кремнію на «холодній» межі C_1^* перевищує рівноважну концентрацію C_1 , і внаслідок чого в таких шарах рідинної фази протікає процес кристалізації «зайвої» частини атомів кремнію.

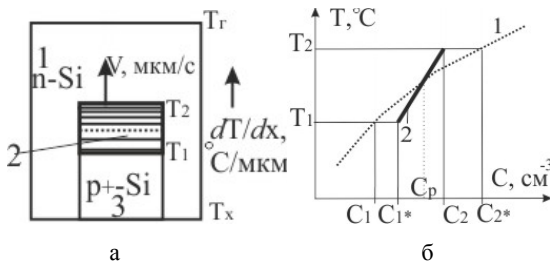


Рисунок 2 – Схема процесу ТМ:

а – рух лінійної зони Al-Si 2 в n-Si 1 з dT/dx з утворенням легованого шару $p^+-Si(Al)$ 3; б – фрагмент фазової діаграми зони Al-Si 2 поблизу лінії ліквідус 1 в області спадання концентрації кремнію C зі зниженням температури

Навпаки, виникаюча нестача атомів кремнію на гарячій межі, де $C_2^* < C_2$, стимулює розчинення в рідинній фазі атомів кристалу з більшою температурою для встановлення рівноважного стану згідно з фазовою діаграмою. Таким чином рідинна фаза рухається в полі градієнта температури (рис. 2), залишаючи позаду себе перекристалізований шар p^+-Si , який леговано атомами Al. А концентрація Al визначається його розчинністю в Si при температурі процесу і складає $(1...2) \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. При досліджуваних значеннях параметрів процесу рідинна фаза має товщину 20÷40 мкм, з перепадом температур на краях в 0,2–0,5 °C, і рухається в об'ємі кристалу кремнію зі швидкістю $V=0,08\text{--}0,8 \text{ мкм/с}$.

Формування ВО із застосуванням процесів ТМ містить низку технологічних операцій. Спочатку на поверхні пластин Si створюють сітку лінійних зон відповідно до топології майбутніх чипів. Потім проводять міграцію лінійних зон Al-Si крізь пластину у полі температурного градієнта. Надалі виконується решта операцій технологічного маршруту виготовлення напівпровідникових структур.

Формування лінійних зон на пластинах з полірованим кремнієм в практиці ряду фірм втілюється за допомогою наплення суцільного шару алюмінію потрібної товщини з наступною ФМе. Якщо пластина має шліфовану поверхню, потрібно перед напленням додатково проводити травлення та створювати канавки кремнію. Незважаючи на простоту, такий метод має суттєву ваду – наявність на межі «метал-напівпровідник» прошарку природного окислу та забруднень, що призводить до так званої стартової затримки зони при міграції, яка, в свою чергу, сприяє «фасетуванню» зон на старті процесу [8]. Тому стабільна міграція неорієнтованих зон, які сформовані напленням, є можливою тільки для пластин кремнію з поверхнею (111).

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В роботі використовується варіант формування зон з примусовим ВВЗ розплавом Al-Si в області вікон. Для цього на пластині створюється плівка SiO_2 , яка забезпечує захист поверхні активних шарів Si від дії розплаву алюмінію на операції ВВЗ. Після ФК і формування вікон в плівці SiO_2 , пластини розміщують у спеціальному формувачі – слайдері автомата формування зон ОН 1878 (рис. 3а), де при заданій температурі поверхня кожної пластини послідовно приводиться в контакт з розплавом зноутворюючого матеріалу Al-Si. Під час такого процесу на поверхні вікон формуються заглиблені в об'єм кремнію зони, які при ТМ починають рухатися в об'ємі без помітної стартової затримки (за рахунок відсутності процесу утворення бар'єрного прошарку). Процес ТМ проводиться в термічному вузлі установки ОН 1840, який показано на рис. 3б. Завдяки такій технології вдається запобігти протіканню процесів фасетування зон при їх зануренні і стає можливою стабільна міграція неорієнтованих лінійних зон, в тому числі і на пластинах Si з кристалографічною орієнтацією [100] і навіть [110] [9]. Селективність процесу осадження та впровадження домішки алюмінію на поверхні відкритого Si визначає його як самосумісний, що разом із підвищенням якості (із-за відсутності ФМе), сприяє оптимізації технології в цілому.

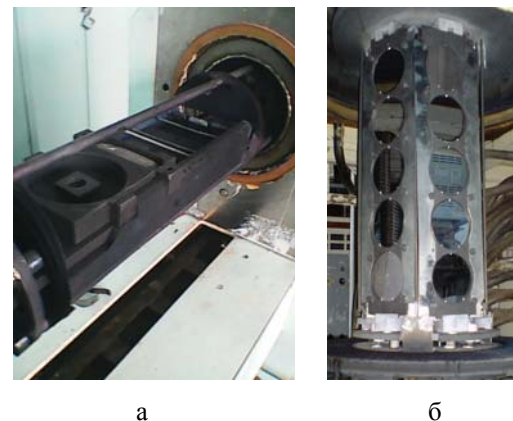


Рисунок 3 – Обладнання для ВВЗ та ТМ, відповідно:
а – слайдер-формував лінійних зон Al-Si;
б – термічний вузол установки ТМ

При порівнянні особливостей процесів ТМ спостерігаються деякі відмінності в застосованому апаратному оформленні. Якщо ряд підприємств зазвичай застосовує газонаповнені установки з одностороннім інфрачервоним відпалом системою кварцових галогенних ламп [3–5], то в базовій технології застосовуються установки з багатопозиційним резистивним відпалом [6, 7]. Процес за досліджуваною технологією проводиться у вакуумі $\sim 10^{-4} \text{ мм.рт.ст.}$, де алюміній, при досягненні в процесі ТМ фінішної сторони пластини, випаровується, і не виникає необхідності проведення подальших операцій з його вилучення з поверхні. Натомість, використання газонаповнених

установок, після ТМ додатково потребує технології вилучення міграційних залишків [9]. Збільшення товщини пластин на величину, яка видаляється після ТМ, є небажаним як через втрати вихідного кремнію, так і через проведення додаткової механічної обробки, що збільшує відсоток бракованих структур. Отримані результати досліджень разом з набутим виробничим досвідом дозволили розробити та впровадити технологічний маршрут виготовлення н/п структур СНП на розробленому технологічному обладнанні [6].

При розробці та впровадженні у виробництво технологічного маршруту формування структур СНП важливим є визначення оптимального режиму відпалу після ТМ в процесі формування ВО та його узгодження з процесами основного відпалу при формуванні активних шарів н/п структури СНП. Для цього визначається місце ТМ не в кінці часового інтервалу основного відпалу виготовлення н/п структури СНП, а на його початку або в середині. Якщо для створення порівняно невеликих чипів (1 А, 400 В, площа $1 \times 1 \text{ мм}^2$) виправданим є проведення ТМ після створення всіх плоских (випрямних і інжектуючих) *p-n*-переходів активних структур [5], то при виготовленні н/п структур приставів більшої потужності з більшою площею та зворотною напругою до 2000 В застосовується варіант маршруту, коли спочатку термоміграцією створюють ВО, а надалі активна структура формується в процесі дифузійних відпалів [3]. Під час дифузії відбувається також дифузійна розгонка вертикальних *p-n*-переходів ВО. Таке суміщення процесів відпалу покращує випрямні властивості ВО. Проте, якщо брати до уваги порівняно високий коефіцієнт дифузії алюмінію, $D_{Al} = 4 \times 10^{-11} \text{ см}^2/\text{с}$ при 1250°C , тривала розгонка переходів ВО веде до втрати корисної площі активної структури. Тому використовується оптимізований варіант маршруту, при якому дифузія алюмінію і бору для створення глибоких плоских випрямних переходів проводиться в два етапи, а ТМ проводиться в проміжку між ними [11]. Визначаючи експериментально оптимальний час відпалу після ТМ t_{BO} , знаходимо значення t_{1j} часу відпалу активних шарів за виразом:

$$t_{1j} = T_B - t_{BO}. \quad (1)$$

Такий підхід дає низку технологічних переваг і використовується при створенні чипів СНП на напругу до 2000 В і струм до 200 А [6, 7]. При експериментальних дослідженнях н/п структури, розміром $20 \times 20 \text{ мм}$, формувалися на шліфованих пластинах *n-Si* КЕФ-40 діаметром 100 мм та товщиною 350 мкм. ТМ Al проводилася на розробленому устаткуванні при температурі 1220°C на протязі 120 хв. Залежність пробивної напруги н/п структур від часу відпалу досліджувалась на зразках, де відпал проводився на протязі 4, 9 та 16 годин при температурі 1250°C . Глибина дифузії Al при відпалі ВО визначалася за формулою [12]:

$$d_{Al} = \sqrt{D_{Al} t_{BO}} \sqrt{\ln \left(\frac{C_{BO}}{C_{n-Si}} \right)}, \quad (2)$$

де $C_{BO} = 1 \dots 2 \cdot 10^{19} \text{ ат/см}^3$, а $C_{nSi} = 1,1 \dots 1,2 \cdot 10^{14} \text{ ат/см}^3$.

На пластинах двостороннє травлення канавок проводилося одночасно (рис. 1а) із застосуванням методів фотолітографії в стандартному травнику СР – $\text{HF:HNO}_3:\text{CH}_3\text{COOH} = 1:4:0,5$ на протязі 12 хвилин. Після формування канавок створювалася ізоляція легкосплавними стеклами. Пробивна напруга U_R контролювалась на пластинах між областю кристалів та шаром ВО, який підключався до загального мінусу стенду контролю напруги пробою. Методика та результати виміру напруги приведені в роботі [11]. При аналізі результатів вимірів напруги пробою для вибірки структур приставів одного часу відпалу використовувалися максимальні значення $U_{R\max}$, які корелюють із середніми значеннями U_R , але наглядніше характеризують процес відновлення кристаліграфічної довершеності монокристалу. Дослідження форми канавок після процесів травлення шарів ВО структур проводилося на електронному автоемісійному мікроскопі SUPRA 40WDS. Фотографії МПТ виконувались в режимі відбитих електронів.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Під час процесу ТМ, який проходить у вакуумі, спостерігалось додаткове легування пластини атомами алюмінію, що випаровуються, як під час занурення та руху зон вглиб пластини, так і після виходу зон на фінішну її поверхню. Оскільки для легування всього об'єму ВО використовується менш ніж 1% алюмінію, який було нанесено під час формування зон ВВЗ, то решта 99% атомів випаровуються і частково пересаджуються на поверхні активних шарів н/п структур приставів та дифундують вглиб пластин [13]. Цей додатково переосаджений алюміній має поверхневу концентрацію порівняну з концентрацією дифузійного Al, який створюється за стандартною плівковою технологією. Надалі, під час другого етапу дифузії, переосаджений алюміній також дифундує вглиб пластини, що покращує концентраційний профіль плоского випрямного переходу. При стандартних умовах ТМ (1220°C , 120 хв) післяопераційний поверхневий опір ρ_{sT} зменшується майже на порядок відносно опору ρ_s для чистих вихідних пластин і складає величину $\rho_{sT} = 125 \dots 130 \text{ Ом/кв}$. Таке використання процесів переосадження алюмінію є бажаним і часто необхідним [13].

З урахуванням розглянутих чинників розроблено оптимізований варіант маршруту формування н/п структур СНП:

- механічна обробка пластин (різка зливку на пластини, двобічне шліфування до потрібної товщини, відмивка, контроль);

- дифузія домішок на попередню глибину (загінка). Для діодів це одночасна дифузія алюмінію і бору з одного боку пластини і фосфору – з протилежного,

для багатозарових керованих структур – двобічна дифузія бору і алюмінію. Час відпалу t_{ij} ;

– окислення: створення окисної плівки перед формуванням зон;

– ФК. В окисній масці єдиним рисунком відкриваються вікна під канали ТМ, а також формуються вікна під заглиблені реперні знаки для наступних суміщень. При створенні структур діодів прямої полярності фотолітографію проводять зі сторони шару з n^+ -Si; одночасною розгонкою вертикального p - n переходу ВО. Час відпалу t_{BO} . Надалі маршрут не відрізняється від того, що його наведено в численних наукових і патентних джерелах [2, 3]. Перевагою наведеного маршруту є відсутність двобічного шліфування після ТМ;

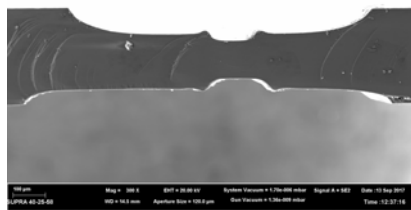
– формування зон методом ВВЗ, видалення окисної маски, проведення ТМ;

– дифузія домішок (розгонка) з доведенням глибини плоского випрямного p - n переходу до заданої з одночасною розгонкою вертикального p - n переходу ВО. Час відпалу t_{BO} .

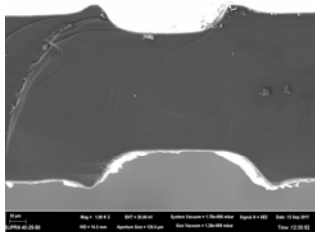
Надалі маршрут не відрізняється від того, що його наведено в численних наукових і патентних джерелах [2, 3]. Однією з переваг наведеного маршруту є відсутність двобічного шліфування після ТМ.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 4–6 наведено фото електронно-мікроскопічних зображень перерізу н/п структур із сформованими канавками в області ВО. Канавки формували після відпалу на протязі 4, 9 і 16 годин відповідно. За положенням мікрорельєфу травлення ТМ на стартовій та фінішній стороні пластины визначено кут нахилу бокових поверхонь каналу ТМ (фінішна сторона міграції домішки більш широка), який в середньому складає близько 9° .



а

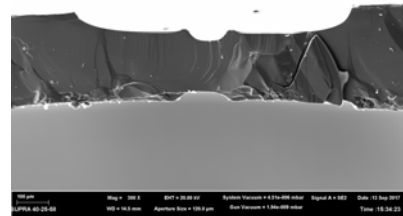


б

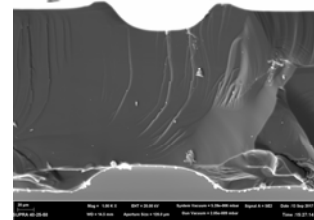
Рисунок 4 – Переріз пластины в області канавки з ВО після 4-х годинного відпалу:

а – канавка травлення під ізоляцію легкоплавкими стеклами; б – мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si

Дослідження МПТ зразків з різними режимами відпалу показують, що області кремнію p^+ -Si мають локальні заглиблення ямок травлення і відповідно найбільшу відносну швидкість травлення (рис. 4–6). Концентрація легуючої домішки n -Si набагато менша і швидкість травлення n -Si менша, але найменшу швидкість травлення мають області Si(σ) по краям ТМ каналу p^+ -Si, де і утворюються виступи на поверхні у вигляді горбків (рис. 4–6). Подібна форма ТМ каналів міграції спостерігається і в інших роботах [14].

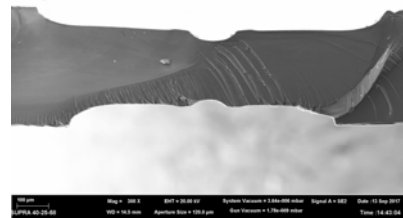


а

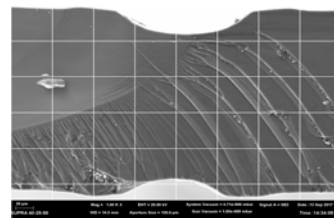


б

Рисунок 5 – Переріз пластины в області канавки з ВО після 9-ти годинного відпалу: а канавка травлення під ізоляцію легкоплавкими стеклами; б мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si



а



б

Рисунок 6 – Переріз пластины в області канавки з ВО після 16-ти годинного відпалу:

а – канавка травлення під ізоляцію стеклами; б – мікрорельєф заглиблень в області p^+ -Si

Виступи в $\text{Si}(\sigma)$ мають найбільшу величину, близько 12 мкм, на зразках з 4-х годинним відпадом, а найменшу ≤ 2 мкм на зразках з 16-ти годинним відпадом. Розміри виступів на зразках з 9-ти годинним відпадом займають проміжні значення. При дослідженнях проведено класифікацію особливостей МПТ канавок в залежності від режиму відпаду. При цьому визначення глибини канавок $h_{n\text{-Si}}$ та відносні зміни поглиблень $\Delta h_{p\text{-Si}}$ травлення $p^+\text{-Si}$ та виступів $\Delta h_{\text{Si}\sigma}$ проводилося за допомогою виразів, відповідно:

$$h_{n\text{-Si}} = (H_{\text{Si}} - H_{n\text{-Si}})/2, \quad (3)$$

$$\Delta h_{\text{Si}\sigma} = h_{\text{Si}\sigma} - h_{n\text{-Si}} = (H_{n\text{-Si}} - H_{\text{Si}\sigma})/2, \quad (4)$$

$$\Delta h_{p\text{-Si}} = h_{p\text{-Si}} - h_{n\text{-Si}} = (H_{p\text{-Si}} - H_{n\text{-Si}})/2. \quad (5)$$

При вимірах рівень $h_{n\text{-Si}}$ визначався на відстані ≥ 30 мкм від краю виступів $\text{Si}(\sigma)$. Довжина $L_{\text{Si}\sigma}$ шару $\text{Si}(\sigma)$ визначалася за виразом:

$$L_{\text{Si}\sigma} = (L - l_{mh})/2, \quad (6)$$

де l_{mh} розраховувалася із величин початкової ширини вікон l_m (82 мкм), кута α та глибини $h_{n\text{-Si}}$. Величина $\Delta l_{p\text{-n}}$ бокового травлення заглиблення $p^+\text{-Si}$ на рівні $h_{n\text{-Si}}$ визначалася за допомогою виразу:

$$\Delta l_{p\text{-n}} = (l_{kt} - l_{mh})/2. \quad (7)$$

Величина латеральної дифузії алюмінію d_{Al} при відпаді визначалася за формулою (2).

Експериментальні дані особливостей МПТ канавок в області шару $p^+\text{-Si}$ та електрофізичні характеристики ізоляції, в залежності від часу відпаду приведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Вплив часу відпаду на особливості рельєфу травлення канавок та електрофізичні характеристики шару ізоляції ТМ каналу $p^+\text{-Si}$

Час відпаду, хв.	Глибина травлення, мкм				$L_{\text{Si}\sigma}$, мкм	Довжина дифузії d_{Al} , мкм	$U_{R\text{max}}$, В
	$h_{n\text{-Si}}$	$\Delta h_{\text{Si}\sigma}$	$\Delta h_{p\text{-Si}}$	$\Delta l_{p\text{-n}}$			
240	64,5	-12	+30	28	75	50	1175
540	64	-8	+25	16	74	75	1475
960	64,5	-2	+21,5	12,5	76	100	2000

Після процесу ТМ мікрорельєф травлення області ізоляції має виступи величиною $\Delta h_{\text{Si}\sigma} = -5,2$ мкм та заглиблення $\Delta h_{p\text{-Si}} = 6,4$ мкм. При цьому за межами області ТМ відсутні об'ємні області зміни висоти горизонтального рівня травлення поверхні, які з'являються на зразках після процесів відпаду.

При травленні зразків із структурним відновленням монокристалу, яке відбувається при збільшенні часу відпаду, спостерігається зменшення МПТ. Найбільшу швидкість травлення шару $\text{VO } p^+\text{-Si}$ мають зразки з мінімальним часом відпаду 4 години. Найменшу швидкість мають зразки з максимальним часом відпаду 16 годин. Величина напруги побою VO залежить від наявності порушень між межею шару $p^+\text{-Si}$ та $p\text{-n}$ -переходу, який формується при відпаді.

Досить якісно ці порушення відображає величина бокового травлення $\Delta l_{p\text{-n}}$, яка зменшується 2,2 рази при збільшенні часу відпаду до 16 годин.

З таблиці видно, що оптимальним часом відпаду є відпал на протязі 16 годин. При якому спостерігаються максимальні напруги пробою, які близькі до теоретичних. Для цього режиму відпаду спостерігається перекриття шару з механічними напруженнями $\text{Si}(\sigma)$ дифузійним шаром d_{Al} домішки алюмінію, джерелом якої є області $p^+\text{-Si}$. Перекриття $d_{\text{Al}} \geq L_{\text{Si}\sigma}$ починається після 12 годин відпаду, де $d_{\text{Al}} = 88$ мкм.

Тому, з точки зору формування області просторового заряду в кремнії без або з мінімальними механічними напруженнями, відпал на протязі 12...16 годин є технологічно обумовленим та необхідним.

При травленні канавок в області МПТ спостерігаються дислокаційні сліди. Канал ТМ вільний від дислокаційних слідів. На зразках з 4-х годинним відпадом і з підвищеною кількістю селективно осадженого в слайдері Al в локальних місцях в області бокового травлення $\Delta l_{p\text{-n}}$ спостерігаються сліди 60° дислокацій. Такі сліди в області бокового травлення $\Delta l_{p\text{-n}}$ починаються біля межі каналу ТМ. Сліди 60° дислокацій не спостерігалися на структурах, які формувалися за оптимальною технологією процесу ТМ.

5 ОБГОВОРЕННЯ

Особливості МПТ, який утворюється в процесі травлення кремнію в області VO , можливо пояснити утворенням та трансформацією, в процесі ТМ і термічних обробок, механічних напружень та кристалографічних дефектів. Дослідження особливостей травлення шарів кремнію з механічними напруженнями та опосередкована візуалізація типу та величини механічних напружень розглядається в роботі [15]. Де показано, що кінетика процесів травлення шарів кремнію змінюється в залежності від типу та величини прикладених механічних напружень, які створювалися в кремнії плівками Si_3N_4 та SiO_2 з відповідно з механічними напруженнями стискання та розтягнення в маскованому Si . Показано, що механічні напруження розтягнення призводять до збільшення, а стискання до зменшення швидкості травлення маскованого $\text{Si}(111)$. Приведені в роботі [15] залежності кінетики травлення кремнію з механічними напруженнями дозволяють пояснити причини утворення досліджуваного МПТ. В ТМ каналі $p^+\text{-Si}$ внаслідок збільшення міжплощинної відстані (ковалентні радіуси для Si і Al рівняються відповідно 0,117 та 0,121 нм) відбувається збільшення об'єму та утворення механічних напружень розтягнення, які мають складові як тангенціальні, так і перпендикулярні до бокових поверхонь каналів ТМ. Напруження в $p^+\text{-Si}$ урівноважуються утворенням в суміжних шарах об'ємного кремнію зустрічних тангенціальних та поперечних напружень стискання, які спричинюють зміни рухливості носіїв заряду, а при їх збільшенні і утворення кристалографічних дефектів. Утворення дислокаційних напівпетель, які

розташовані за каналом ТМ, але починаються на його межі, показано в роботі [16] за допомогою рентгеновського топографування.

При дифузії атомів алюмінію, яка виникає в процесі відпалу, в ТМ каналі відбувається утворення механічних напружень розтягнення, зрушення та модифікація кристалографічних дефектів, що спричинює зростання швидкості травлення. Відповідно, напруження стискання, які виникають по периметру каналу ТМ, спричиняють сповільнення швидкості травлення та утворення горбків МПТ. Із порівняння глибин травлення табл. 1 можливо визначити, що максимальну величину механічних напружень розтягнення та концентрацію дефектів МПТ мають зразки з 4-х годинним відпалом, а мінімальну – зразки з 16-ти годинним відпалом. Процес ТМ з утворенням механічних напружень також супроводжується утворенням по периметру ВО максимумів концентрації кристалографічних дефектів, фонових та легуючих домішок, таких як фосфор, кисень та ін. [14]. У випадку незначного часу відпалу можливе зростання напружень за рахунок появи додаткових механічних напружень, спричинених дифузією домішки Al та формуванням *p-n*-переходу. При дифузії атомів алюмінію з області ТМ відбувається і відносно прискорене насичення ними ядер дислокацій, які розташовані по периметру каналу ТМ. Це призводить до значного локального збільшення концентрації атомів алюмінію і, додатково до дифузійних процесів легування, спричинює утворення шару кремнію з підвищеними механічними напруженнями, а в подальшому відповідно змінює швидкості травлення та спричинює утворення більш розвинутого рельєфу, що і спостерігається в експерименті. Зростання механічних напружень, дефектності в області *p-n*-переходу та провідності вздовж дислокацій, які насичені атомами Al і пронизують шар просторового заряду, можуть призводити до зменшення напруги пробію та зростання струмів просочування, як це і спостерігалось в роботі [11]. Про такий відносно максимальний рівень дефектності можуть свідчити максимальні величини бокового травлення Δl_{p-n} МПТ, які якісно корелюють з величинами Δh_{SiO_2} та Δh_{p-Si} .

Для отримання максимальних напруг електричного пробію ізоляції структур час відпалу повинен збільшуватися до величин, які забезпечують формування *p-n*-переходу за межами шару кремнію з механічними напруженнями Si(σ), при цьому зменшується і сама величина механічних напружень та концентрація кристалографічних дефектів, що фіксується мінімізацією МПТ. Виконання умови оптимального відпалу кристалографічних дефектів можливо задати вимогами до особливостей зміни МПТ при зміні часу відпалу, а саме вимогами мінімізації величин МПТ і в першу чергу Δl_{p-n} .

ВИСНОВКИ

Показано, що при виготовленні н/п структур приладів більшої потужності із зворотною напругою 2000 В, оптимальним є варіант маршруту, коли споча-

тку проводять процес загонки домішок глибоких активних шарів, потім при формуванні шару ізоляції проводять процес ТМ, а надалі проводять суміщений відпал як ізоляції, так і активних шарів. Таке суміщення процесів відпалу покращує характеристики структур.

В роботі розкрито особливості механізму утворення МПТ канавок в області термоміграційних каналів. Механічні напруження стискання та розтягнення, утворювані в процесі ТМ, спричиняють, відповідно, уповільнення та прискорення швидкості травлення шарів Si. Проведено аналіз впливу часу відпалу на мікрорельєф канавок травлення, де показано, що якісні зміни електрофізичних характеристик каналу ТМ та відпал дефектів супроводжується мінімізацією МПТ. При цьому відносно часу відпалу виконуються дві умови: перша, це перевищення латеральної довжини дифузії Al над латеральною довжиною області механічних напружень Si(σ); а друга, це мінімізація МПТ канавки в області каналу ТМ.

ПОДЯКИ

За розглянутою технологією виготовляється низка чипів для комплектації модулів на струм від 20 до 200 А. Так н/п структури діодів на струм 200 А використовуються при формуванні модулів МДІ8/3. Ці н/п структури формують на пластинах з орієнтацією як (111), так і (100), що стало можливо завдяки проведеним дослідженням та оптимізації процесів ТМ.

Автори висловлюють щиру подяку Бортнікову Ю. М. за допомогу в проведенні електронно – мікроскопічних досліджень структур.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Blunt P. Reliable thyristors and triacs in TO220 plastic packages / P. Blunt // Electronic Components and Applications. – 1979. – Vol. 2, № 1. – P. 53–58.
2. Лозовский В. Н. Зонная перекристаллизация градиентом температуры полупроводниковых материалов / В. Н. Лозовский, Л. С. Лушин, В. П. Попов. – М. «Металлургия», 1987. – 223 с.
3. Thermomigration processing of isolation grids in power structures / T. R. Anthony, J. K. Boah, M. F. Chang et al. // IEEE Transactions on Electron Devices. – 1976. – Vol. 23, № 8. – P. 818–823.
4. Chang M. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing / M. Chang, R. Kennedy Chang M., Kennedy R. // J. Electrochem. Soc. – 1981. – Vol. 128, № 10. – P. 2193–2198.
5. Lischner D. J. Observations of the Temperature gradient zone melting process for isolating small devices / D. J. Lischner, H. Basseches, F. A. D'Altroy // J. Electrochem. Soc. – Vol. 132, № 12. – P. 2997–3001.
6. Morillon B. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration / B. Morillon et al. // ESSDERC. – 2002. – P. 327–330.
7. Полухин А. С. Использование термомиграции в технологии структур силовых полупроводниковых приборов / А. С. Полухин, Т. П. Зуева, А. И. Солодовник // Силовая электроника. – 2006. – № 3. – С. 110–112.
8. Лозовский В. Н. Особенности легирования кремния методом термомиграции / В. Н. Лозовский, Л. С. Лушин,

- Б. М. Середин // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. – 2015. – Т. 18, № 3. – С. 179–188.
9. Полухин А. С. Термомиграция неориентированных линейных зон в кремниевых пластинах (100) для производства чипов силовых полупроводниковых приборов / А. С. Полухин // Компоненты и технологии. – 2008. – № 11. – С. 97–100.
10. Deep trench etching combining aluminum thermomigration and electrochemical silicon dissolution. <https://www.researchgate.net/publication/224403308>
11. Полухин А. С. Исследование технологических факторов процесса термомиграции / А. С. Полухин // Силовая электроника. – 2009. – № 2. – С. 90–92.
12. МОП-СБИС. Моделирование элементов и технологических процессов / Под ред. П. Антонетти, Д. Антониадиса, Р. Даттона, У. Оулдхема : пер. с англ. – М. : Радио и связь, 1988.
13. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnel / B. Morillon // Rapport LAAS №02460, 2002. – 222 p.
14. Бучин Э. Ю. Структура термомиграционных каналов в кремнии / Э. Ю. Бучин, Ю. И. Денисенко, С. Г. Симакин // Письма в ЖТФ. – 2004. – Т. 30, Вып. 5. – С. 70–75.
15. Горбань А. Н. Селективне травлення монокристалічного кремнію маскованого плівками нітриду, полікремнію, окису кремнію та їх композиціями / А. Н. Горбань, В. В. Кравчина // Нові технології. – 2010. – №1 (27). – С. 41–46.
16. Термомиграционные р-каналы: реальная структура и электрические свойства / [В. Н. Лозовский, А. А. Ломов, Б. М. Середин и др.] // Электронная техника. – Серия 2. – Полупроводниковые приборы. – 2017. – Вып. 2 (245). – С. 29–38.

Стаття надійшла до редакції 31.01.2018.
Після доробки 23.04.2018.

УДК 621.315.592

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОМИГРАЦИИ В ТЕХНОЛОГИИ СИЛОВЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Кравчина В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры микроэлектронных информационных систем, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье, Украина.

Полухин А. С. – ведущий инженер ООО «Элемент- Преобразователь», Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проведенные исследования позволяют улучшить технологические процессы изготовления п/п приборов и контроль их качества.

Цель работы – разработка и совершенствование технологии СНП с использованием процессов термомиграции Al и исследование рельефа травления кремния в области p^+-Si изоляции. Задачей работы является оптимизация технологии формирования СНП.

Метод. Объектом исследования являлись технологические особенности процессов формирования структур по различным маршрутам, отличающиеся последовательностью проведения процессов формирования активных структур, отжига структур и процессов термомиграции Al. Исследовалось влияние времени отжига на особенности микрорельефа травления канавок в области термомиграции.

Результаты. В работе проанализированы причины изменения напряжения пробоя p-n переходов вертикальных сквозных областей, созданных термомиграцией, в зависимости от времени отжига п/п структур. На образцах с оптимальным режимом отжига в 16 часов при температуре 1250 °C наблюдаются максимальные напряжения пробоя слоев изоляции и минимальные величины микрорельефа канавок травления кремния разного типа проводимости в области изоляции кристаллов сквозными термомиграционными шарами. Такой минимальный микрорельеф определяет минимум остаточных механических напряжений. Показано, что при изготовлении п/п структур приборов большей мощности и обратным напряжением 2000 В, оптимальным является вариант маршрута, когда сначала проводят процессы загонки примесей глубоких активных слоев, а затем процессы термомиграции формирования слоев изоляции. В дальнейшем проводят совмещенный отжиг слоев структуры как изоляции, так и активных. Такое совмещение процессов отжига улучшает характеристики структур.

Выводы. В работе определен оптимальный маршрут, режим отжига структур и показано, что контроль изменений кинетики травления слоев кремния в области термомиграции примеси алюминия помогает в определении оптимальных режимов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: отжиг, изоляция, микрорельеф канавок, линейные зоны, термомиграция, силовые полупроводниковые приборы.

UDC 621.315.592

APPLICATION OF THERMOMIGRATION FOR TECHNOLOGY OF POWERFUL SEMICONDUCTORS APPLIANCES

Kravchyna V. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Microelectronics Information Systems, Zaporizhzhya State-owned Inzhenernaya Academy, Zaporizhzhya, Ukraine.

Polukhin O. S. – Leading engineer, “Element- Preobrazovatel” Ltd, Zaporizhzhya, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The conducted researches allow to improve technological processes of manufacture of semiconductor devices and control of their quality.

Objective is to investigate the relief of silicon etching in the area of p^+-Si isolation and using of Al-thermigration processes for further develop and improve technology of the power devices. The task of the work is to optimize these technology.

Method. The object of the study was the technological features of the processes of forming structures on different routes, differing in the manner of carrying out processes of annealing structures and processes of thermomigration Al. The influence of the annealing time on the features of the microrelief of etching grooves in the region of thermomigration has been studied.

Results. The causes of change of breakdown voltage of vertical $p-n$ -junctions formed by thermomigration vs post-migration annealing time and thermomigration process optimization are discussed. On these samples is observed minimal microrelief of the groove etching of various types of conductivity silicon in the area under the insulation of the crystals. Such a minimal microrelief determines the minimum of residual mechanical stresses. The control of changes in the kinetics of etching layers of monocrystalline silicon in the field of thermal migration of aluminum impurities helps in determining the modes of technology for the formation of semiconductor structures with high breakdown electrical voltages. At the same time, two conditions are fulfilled: the first one is the excess of the lateral length of aluminum diffusion over the lateral length of the region of mechanical stresses along the perimeter of the thermo-migration region; and the second, it is a reduction and stabilization of changes in the rate of etching of the thermo-migration layers by minimizing the elastic-mechanical, deformation component of the activation energy of the etching process of p^+ -Si.

It is shown that in the manufacture of chips of larger power devices with a larger area and a reverse voltage of up to 2000 V, the optimal variant is the route variant, when the processes of impounding impurities of deep active layers are first carried out, then the processes of thermomigration during the formation of insulation layers. Then there are annealing of isolation and active layers. This combination of annealing processes improves the characteristics of structures.

Conclusions. The optimum route, the annealing mode of the structures are determined in the work, and it is shown that monitoring the changes in the etching kinetics of silicon layers in the region of thermal immigration of aluminum impurities helps in determining optimal regimes.

KEYWORDS: annealing, insulation, microrelief of the grooves, linear zones, thermomigration, power silicon devices.

REFERENCES

1. Blunt P. Reliable thyristors and triacs in TO220 plastic packages, *Electronic Components and Applications*, 1979, Vol. 2, No. 1, pp. 53–58.
2. Lozovskiy V. N., Lunin L. S., Popov V. P. Zonnaia perekristalizatsiia gradientom temperatury' poluprovodnikov'y'x materialov. Moscow, «Metallurgiya», 1987. 223 p.
3. Anthony T. R., Boah J. K., Chang M. F. et al. Thermomigration processing of isolation grids in power structures, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1976, Vol. 23, No. 8, pp. 818–823.
4. Chang M. Kennedy R., Chang M., Kennedy R. The application of temperature gradient zone melting to silicon wafer processing, *J. Electrochem. Soc.*, 1981, Vol. 128, No. 10, pp. 2193–2198.
5. Lischner D. J., Basseches H., D'Altroy F. A. Observations of the Temperature gradient zone melting process for isolating small devices, *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 132, No. 12, pp. 2997–3001.
6. Morillon B. et al. Realization of a SCR on an epitaxial substrate using Al thermomigration, *ESSDERC*, 2002, pp. 327–330.
7. Polukhin A. S., Zueva T., Solodovnik A. I. Ispolzovanie termomigratsii v tekhnologii struktur silov'y'kh poluprovodnikov'y'x priborov, *Silovaya elektronika*, 2006, No. 3, pp. 110–112.
8. Lozovskiy V. N., Lunin L. S., Seredin B. M. Osobennosti legirovaniia kremniya metodom termomigratsii, *Izvestiya vy'sshikh uchebny'kh zavedeniy. Materialy' elektronnoy tekhniki*, 2015, Vol. 18, No. 3, pp. 179–188.
9. Polukhin A. S. Termomigratsiya neorentirovanny'kh lineyny'kh zon v kremnievy'kh plastinakh (100) dlya proizvodstva chipov silov'y'kh poluprovodnikov'y'x priborov, *Komponenty' i tekhnologii*, 2008, No. 11, pp. 97–100.
10. Deep trench etching combining aluminum thermomigration and electrochemical silicon dissolution. <https://www.researchgate.net/publication/224403308>
11. Polukhin A. S. Issledovanie tekhnologicheskikh faktorov protsessa termomigratsii, *Silovaya elektronika*, 2009, No. 2, pp. 90–92.
12. MOP-SBIS. Modelirovanie elementov i tekhnologicheskikh protsessov. Pod red. P. Antonneti, D. Antoniadisa, R. Dattona, U. Ouldkhema : Per. s angl Moscow, Radio i svyaz, 1988.
13. Morillon B. Etude de la thermomigration de l'aluminium dans le silicium pour la réalisation industrielle de murs d'isolation dans les composants de puissance bidirectionnel, *Rapport LAAS №02460*, 2002. 223 p.
14. Buchin E. J., Denisenko J. I., Simakin S. G. Structura tekhnologicheskikh kanalov v kremnii, *Pisma v GTF*, 2004, Vol. 30, Vy'p. 5, pp. 70–75.
15. Gorban A. N., Kravchina V. V. Selektiv'nye travlenniya monokristalichnogo kremniyu maskovannogo plivkamy' nitridu, polikremniyu, oky'su kremniyu ta ikh kompozy'tsiyamy', *Novi tekhnologii*, 2010, No. 1 (27), pp. 41–46.
16. Lozovskiy V. N., Lomov A. A., Seredin B. M., Simakin S. G., Zinchenko A. N., Seredina M. B. Termomigratsionny'e p-kanaly': realnaya struktura i elektricheskie svoystva, *Elektronnaya tekhnika. Seriya 2. Poluprovodnikovye pribory'*, 2017, Vy'p. 2 (245), pp. 29–38.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФУНКЦІЙ ПЕРЕТВОРЕННЯ ОПТИЧНИХ СХЕМ ЗАСОБУ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ, ПОБУДОВАНОГО НА ЕФЕКТІ РАМАНА ТА СТРУКТУРА АЛГОРИТМУ ЇХ ДОСЛІДЖЕННЯ

Кривенчук Ю. П. – канд. техн. наук, асистент кафедри систем штучного інтелекту Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Шаховська Н. Б. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем штучного інтелекту Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Вовк О. Б. – канд. техн. наук, доцент кафедри систем штучного інтелекту Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Мельникова Н. І. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри систем штучного інтелекту Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. В процесі вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла, виникає проблема визначення еквівалентної частоти спектру. Це проявляється внаслідок проходження відбитого випромінювання через оптичні елементи, яке спотворюється похибками комплексних частотних характеристик цих елементів. Неточне визначення еквівалентної частоти тягне за собою велику похибку визначення температури. Тому актуальним є синтез програмних моделей оптичних елементів оптичних схем, а також спектру комбінаційного розсіювання світла для подальших їх досліджень.

Мета роботи – синтез моделей елементів оптичних схем та спектрів комбінаційного розсіювання світла для подальшого дослідження оптичних елементів та оптичних кіл.

Метод. Останнім часом широко застосовуються різноманітні вироби та сенсори, розроблені на базі мікро- та наноструктурованих матеріалів. Розроблено цілу низку компонентів електронної техніки, які в сотні разів є меншими за своїх попередників. В процесі виготовлення таких мініатюрних компонентів електронної техніки, необхідно докладно контролювати температуру. Характеристики існуючих засобів вимірювань не цілком задовольняють цим вимогам. Одним із перспективних напрямків для вирішення цієї проблеми є застосування методу комбінаційного розсіювання світла. В межах методу комбінаційного розсіювання світла відомо два способи визначення температури: перший за відношенням інтегральної площі стоксової компоненти спектру до антистоксової, другий за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла. Другий спосіб має кращу швидкодію, що перевищує перший більше як в 2 рази, оскільки потрібно визначати тільки антистоксову компоненту спектру. Також даний спосіб має меншу методичну похибку, яка виникає за рахунок перегріву досліджуваного об'єкту лазером. Тому було обрано даний метод та спосіб для подальших досліджень.

Результати. Синтезовано комп'ютерні моделі оптичних елементів та оптичних схем, а також спектри комбінаційного розсіювання світла. Запропоновано два методи визначення значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Висновки. Проведені дослідження показали, що первинне коло оптичної схеми не вносить похибки в результат вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла. Доведено доцільність проведення дослідження вторинного кола оптичної схеми.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вимірювання температури, спектри комбінаційного розсіювання світла, Раманівський термометр.

АБРЕВІАТУРИ

КРС – комбінаційне розсіювання світла;

ЕЧАКС – еквівалентна частота антистоксової компоненти спектру.

НОМЕНКЛАТУРА

$D_{\text{vmm}}[j]$ – дисперсія ЕЧАКС КРС, знайдена медіанним методом;

$D_{\text{vcm}}[j]$ – дисперсія ЕЧАКС КРС, знайдена методом центру мас;

$H_{\text{oc}}(v)$ – комплексна частотна характеристик оптичної схеми;

$I_{\text{вих}}(v)$ – вихідний спектр;

$I_{\text{вх}}(v)$ – вхідний спектр, що потрапляє на вторинне коло оптичної схеми;

$Krok_v$ – роздільна здатність за частотою спектроаналізатора;

$m_{\text{vmm}}[j]$ – математичне сподівання ЕЧАКС КРС, знайдено медіанним методом;

$m_{\text{vcm}}[j]$ – математичне сподівання ЕЧАКС КРС, знайдено методом центру мас;

N_v – кількість значень роздільної здатності за частотою;

$N_{\text{гтер}}$ – кількість випадково генерованих спектрів КРС;

P – потужність лазерного випромінювання;

t – час вимірювання;

u_{vmm} – непевність визначення ЕЧАКС КРС, знайдено медіанним методом;

u_{vcm} – непевність визначення ЕЧАКС КРС, знайдено методом центру мас;

v – крок за роздільною здатністю до частоти;

v_{max} – максимальне значення роздільної здатності;

v_{min} – мінімальне значення роздільної здатності;

$v_{\text{mm}}[i]$ – ЕЧАКС КРС, знайдено медіанним методом;

$v_{\text{cm}}[i]$ – ЕЧАКС КРС знайдено за методом центру мас;

$\Delta\nu$ – роздільні здатності для дослідження;
 $\delta_{\text{вк}}$ – відносна похибка вторинного оптичного кола;
 $\delta_{\text{л}}$ – відносна частотна похибка лазера;
 $\delta_{\text{м}}$ – відносна методична похибка;
 $\delta_{\text{нк}}$ – відносна похибка первинного оптичного кола;
 $\delta_{\text{са}}$ – відносна похибка спектроаналізатора;
 δT – відносна похибка вимірювання температури
методом комбінаційного розсіювання світла;
 $\sigma_{\text{вмм}} [j]$ – середньо квадратичне відхилення ЕЧАКС
КРС, знайдене медіанним методом;
 $\sigma_{\text{всм}} [j]$ – середньо квадратичне відхилення ЕЧАКС
КРС, знайдене методом центру мас.

ВСТУП

Стрімкий розвиток нанотехнологій характеризується створенням нових матеріалів, мікро- та наноструктурованих об'єктів, які знаходять широке застосування у різних галузях науки, техніки і промисловості. Для належного перебігу технологічного процесу при виготовленні таких матеріалів необхідно забезпечити вимірювання та жорсткий контроль температури. При цьому зрозуміло, що до засобів вимірювання температури таких об'єктів ставляться високі метрологічні та експлуатаційні вимоги.

Реалізація процесу коректного вимірювання температури для кожного конкретного випадку вимагає докладного аналізу умов теплової взаємодії системи об'єкт-термометр. В більшості випадків під час вимірювання температури однозначно змінюється теплова картина досліджуваного об'єкту. Тому необхідним є проведення оцінки недоліків та переваг методів та засобів вимірювання температури, для визначення найбільш оптимальних методів вимірювання температури об'єктів малих розмірів.

Метою дослідження є синтез моделей елементів оптичних схем та спектрів комбінаційного розсіювання світла їх для подальшого дослідження.

Об'єктом дослідження є передавальна характеристика спектру комбінаційного розсіювання світла через оптичні елементи.

Процесом дослідження є синтез моделей спектрів комбінаційного розсіювання світла та оптичних елементів оптичних схем з метою визначення найменшої похибки передавальної характеристики та встановлення найкращого методу визначення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Як відомо, усі контактні методи спотворюють температурне поле, як наслідок їх не можна застосувати до термометрування мікро- та наноструктурованих об'єктів. Серед відомих безконтактних методів одним з найбільш підходящих методів є пірометричний та метод комбінаційного розсіювання світла. Проте, пірометричний метод має суттєвий недолік: невідомий коефіцієнт випромінюючої здатності кожного об'єкту, що тягне за собою досить велику методичну похибку

вимірювання температури. Метод комбінаційного розсіювання світла позбавлений такого недоліку, також вагомою перевагою методу є те, що товщина лазерного променя є досить невеликою, що дає можливість сфокусувати його на найменші об'єкти дослідження. Враховуючи результати проведеного аналізу, для вимірювання температури об'єктів малих розмірів оптимальним є застосування методу комбінаційного розсіювання світла.

Вхідними даними є передавальні характеристики оптичних елементів та їх вплив на похибку визначення еквівалентної частоти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Вихідними параметрами є значення температури, а також похибка з якою вона може бути визначеною.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В Україні і за кордоном останнім часом широко застосовуються різноманітні вироби та сенсори, розроблені на базі мікро- та наноструктурованих матеріалів. Розроблено цілу низку компонентів електронної техніки, які є в сотні разів меншими за своїх попередників. У процесі виготовлення таких мініатюрних компонентів електронної техніки необхідно докладно контролювати температуру. Характеристики існуючих засобів вимірювань не цілком задовольняють цим вимогам [1–4]. Одним із перспективних напрямків для вирішення проблеми такого типу є застосування методу комбінаційного розсіювання світла за зсувом частоти [5–7].

Основою методу стало комбінаційне розсіювання. Його суть полягає в тому, що при взаємодії з середовищем розсіяння світлова хвиля модулюється молекулярними коливаннями середовища, що призводить до появи в розсіяному випромінюванні нових довжин хвиль. У зарубіжній науковій літературі комбінаційне розсіювання носить назву ефекту Рамана, а дослідження з використанням комбінаційного розсіювання називають Раманівською спектроскопією [5, 6].

Такий же підхід використано і в MEMS [7]. У [8] використано молекулярні давачі. Проте використання технологій штучного інтелекту для контролю та аналізу замірів значно підвищує цінність методів та засобів вимірювання температури у лабораторних умовах, а також уможливорює в подальшому використання в літальних апаратах для наземного спостереження.

Проведений аналіз [9] показав що, для розроблення засобу вимірювання температури на основі методу комбінаційного розсіювання світла оптимальним є застосування способу, який ґрунтується на температурній залежності частоти комбінаційного розсіювання світла. Це дає змогу покращити метрологічні характеристики засобів вимірювання температури та зменшити час вимірювання. Отже, розроблення апаратно-програмних засобів вимірювання температури на основі методу комбінаційного розсіювання світла є актуальною задачею.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Структурна схема засобу вимірювання температури за зсувом частоти КРС (рис. 1), складається з лазера, оптичної схеми та спектроаналізатора. Оптична схема умовно поділяється на дві частини: первинне коло (оптичні елементи, які розташовані до досліджуваного об'єкту) та вторинне коло (оптичні елементи, які розташовані після досліджуваного об'єкту).

Гранична похибка вимірювання температури таким засобом становить:

$$\delta T = \delta_M + \delta_L + \delta_{пк} + \delta_{вк} + \delta_{са} \quad (1)$$

У табл. 1 наведено основні метрологічні характеристики спектроаналізаторів, а у табл. 2 – технічні характеристики лазерів.

За результатами досліджень мінімальна похибка спектроаналізатора становить 0,01%, а похибка лазера – 0,00003%. Методична похибка була досліджена в роботі [1]. Також спираючись на дану роботу досліджено залежність методичної похибки від часу вимірювання (рис. 2) та залежність методичної похибки від потужності лазера та тривалості вимірювання представлено на рис. 2.

Таблиця 1 – Метрологічні характеристики спектроаналізаторів

Назва приладу	Спектральний діапазон вимірювання	Відносна похибка	Ціна, грн.
MS 3501i	267–800 нм	0,5%	405 000
EnSpectr R532	400–528 нм	0,02%	1 320 000
X-Rite Color i 7	360–750 нм	0,01%	16 890 000

Таблиця 2 – Метрологічні характеристики лазерів

Назва лазера	Потужність	Частота	Відносна похибка за частотою
HeNe-Laser G040813000	15 мВт	632,8 нм	0,00008 %
HeNe-Laser G040809000	10 мВт	632,8 нм	0,00003 %
HeNe-Laser G040801000	0,6 мВт	632,8 нм	0,00015 %
HeNe-Laser G040807000	5 мВт	632,8 нм	0,00003 %

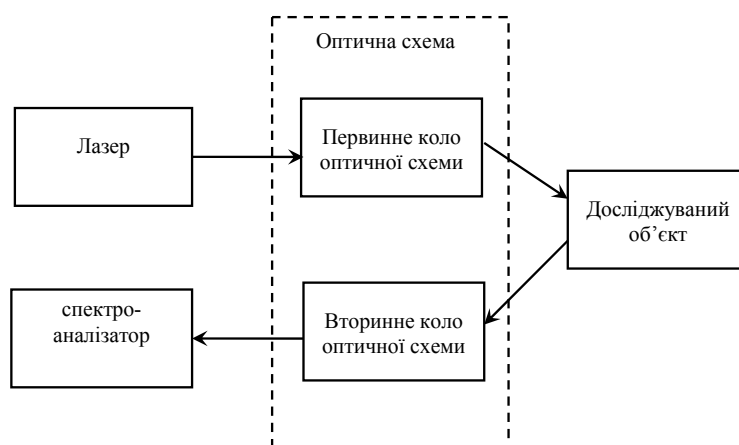


Рисунок 1 – Структурна схема засобу вимірювання температури на основі комбінаційного розсіювання світла

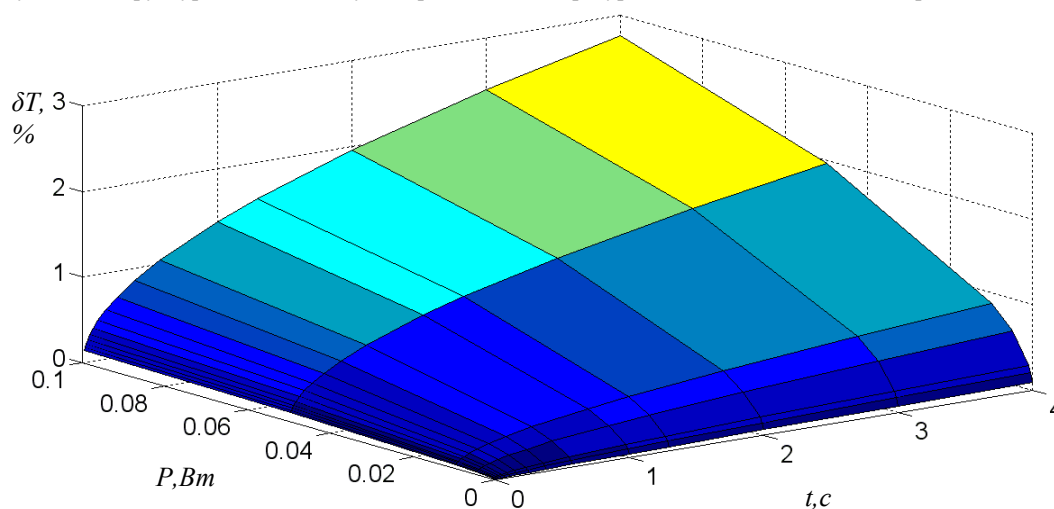


Рисунок 2 – Залежність методичної похибки від потужності лазера та тривалості вимірювання

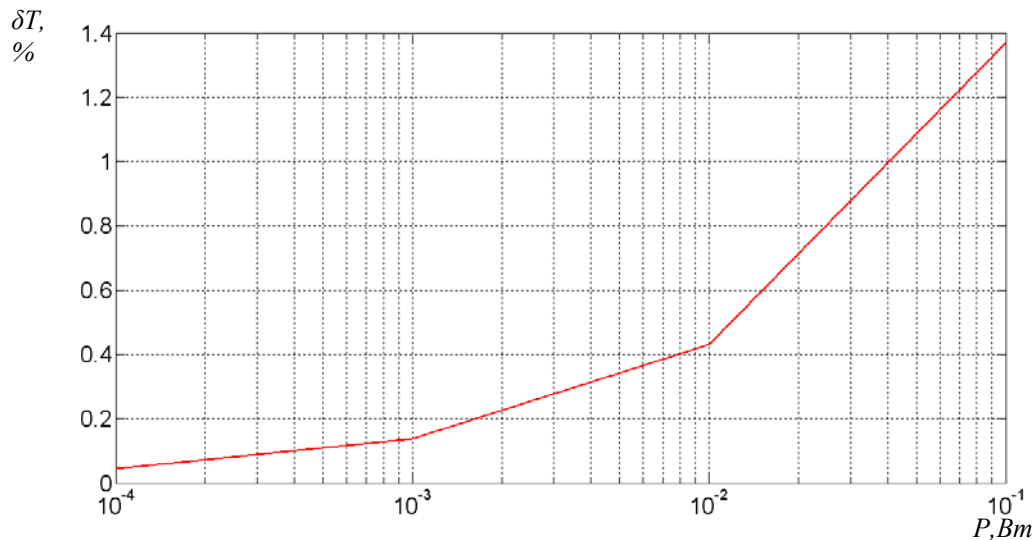


Рисунок 3 – Залежність методичної похибки від потужності лазера за тривалості вимірювання 1с

Враховуючи вираз (1), основну увагу потрібно приділити дослідженню похибок первинного та вторинного кола оптичної схеми та похибки експериментального визначення залежності еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла від температури. Проведені дослідження показали, що відносна похибка експериментального визначення ЕЧАКС КРС від температури становить 0,00032% для оксиду алюмінію та може змінюватися залежно від об'єкту дослідження.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Реальні спектри КРС мають різну форму [2, 3, 4, 5, 6], серед них найчастіше зустрічаються спектри, близькі до прямокутної, трикутної, трапецієподібної та пилкоподібної форми. Приклади спектрів КРС наведено на рис. 4.

Для дослідження моделей функцій перетворення оптичних елементів та вторинних кіл оптичних схем синтезовано моделі спектрів КРС різних форм (рис. 5) із такими характеристиками:

- прямокутний з координатами (1к, 2к, 3к, 4к) за частотою 1к – 2200 см^{-1} , 2к – 2200 см^{-1} , 3к – 2400 см^{-1} , 4к – 2400 см^{-1} ;
- трапецієподібний 1к – 2200 см^{-1} , 2к – 2250 см^{-1} , 3к – 2350 см^{-1} , 4к – 2200 см^{-1} ;
- трикутний 1к – 2200 см^{-1} , 2к – 2300 см^{-1} , 3к – 2400 см^{-1} ;
- пилкоподібний 1к – 2200 см^{-1} , 2к – 2200 см^{-1} , 3к – 2400 см^{-1} .

Моделі дозволяють змінювати ширину спектрів КРС.

ЕЧАКС КРС можна визначити двома методами:

- методом центру мас;
- медіанним методом.

Всі функції перетворення оптичних елементів досліджувалися із врахуванням лінійної, нелінійної, випадкової складових похибки та моделей спектрів КРС.

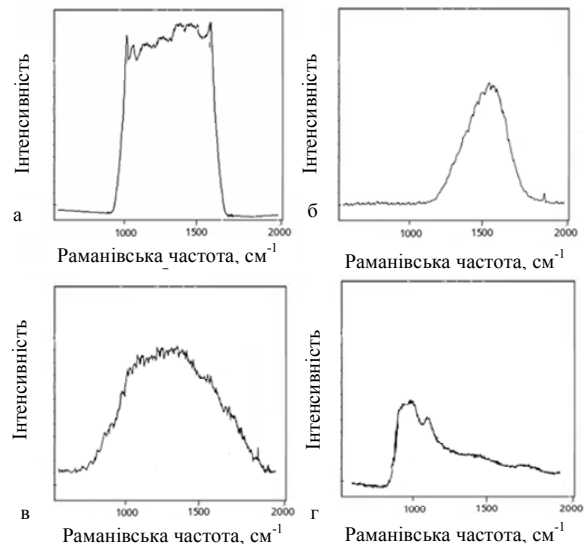


Рисунок 4 – Форми спектрів КРС

Лазерне випромінювання, проходячи крізь первинне коло оптичної схеми, може змінитися за інтенсивністю, оскільки пропускна здатність оптичних елементів не дорівнює 1 (100%). Кожен оптичний елемент має індивідуальну передавальну характеристику. Зміна значення інтенсивності лазерного променя не змінює форму спектру КРС [7, 8], а лише пропорційно зменшує або збільшує інтенсивність частотних складових КРС.

Для дослідження впливу інтенсивності лазерного випромінювання на значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру (ЕЧАКС) КРС, значення ЕЧАКС КРС визначалось методом центру мас.

На рис. 6 представлено результати дослідження залежності значення ЕЧАКС КРС від інтенсивності лазерного випромінювання для прямокутної моделі спектру КРС з урахуванням сумарної похибки функції перетворення елементів оптичної схеми.

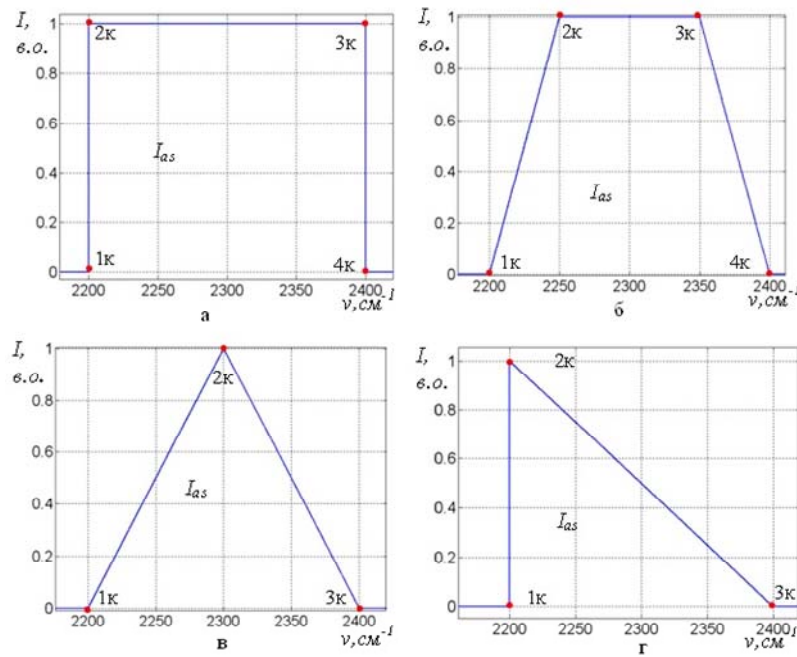


Рисунок 5 – Моделі спектрів КРС: а – прямокутний, б – трапецієподібний, в – трикутний, г – пилкоподібний

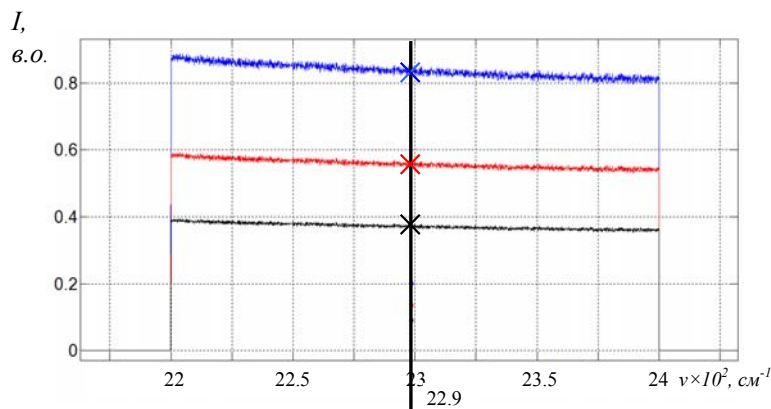


Рисунок 6 – Залежність ЕЧАКС КРС від інтенсивності випромінювання лазера

Дослідження проводилося за таких параметрів: ширина спектру 2200–2400 cm^{-1} , випадкова складова похибки передавальної характеристики оптичних елементів – 1%, лінійна складова – 5%, нелінійна складова 5%. Рівень послаблення сигналу – 10%, 40%, 60%. Роздільна здатність за частотою 1 cm^{-1} .

Значення ЕЧАКС КРС розраховувалося методом центру мас для кожного з спектрів. Для кожного з досліджуваних спектрів, які відрізнялися лише за рівнем послаблення сигналу, значення кожної гармоніки спектрів пропорційно змінювалися відносно рівня послаблення сигналу, отримане значення ЕЧАКС КРС було однакове, а саме 2290 cm^{-1} .

Таким чином, проведені дослідження показали, що зміна інтенсивності лазерного променя не впливає на похибку визначення значення ЕЧАКС КРС.

Враховуючи, що складові похибки вимірювання в (1) δ_m , δ_d , δ_{ca} є відомими, а δ_{pk} не впливає на похибку

визначення значення ЕЧАКС КРС, доцільно є досліджувати вторинні кола оптичних схем і їх δ_{bk} [9].

Для дослідження невпевності знаходження еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС двома методами синтезовано програмну модель, алгоритм роботи якої представлено на рис. 7.

Проведено дослідження залежності невпевності визначення і еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру КРС від кількості випадкових послідовностей (N) функції перетворення елементів оптичної схеми (рис. 8).

Дослідження показало, що при різних кількостях випадкових послідовностей невпевність визначення невпевності ЕЧАКС КРС буде різною. Для 10 випадкових послідовностей невпевність становить 10,79862%, 100 послідовностей – 6,18%, для 1 тисячі послідовностей – 1,49%, а для 10 тисяч послідовностей – 0,45%.

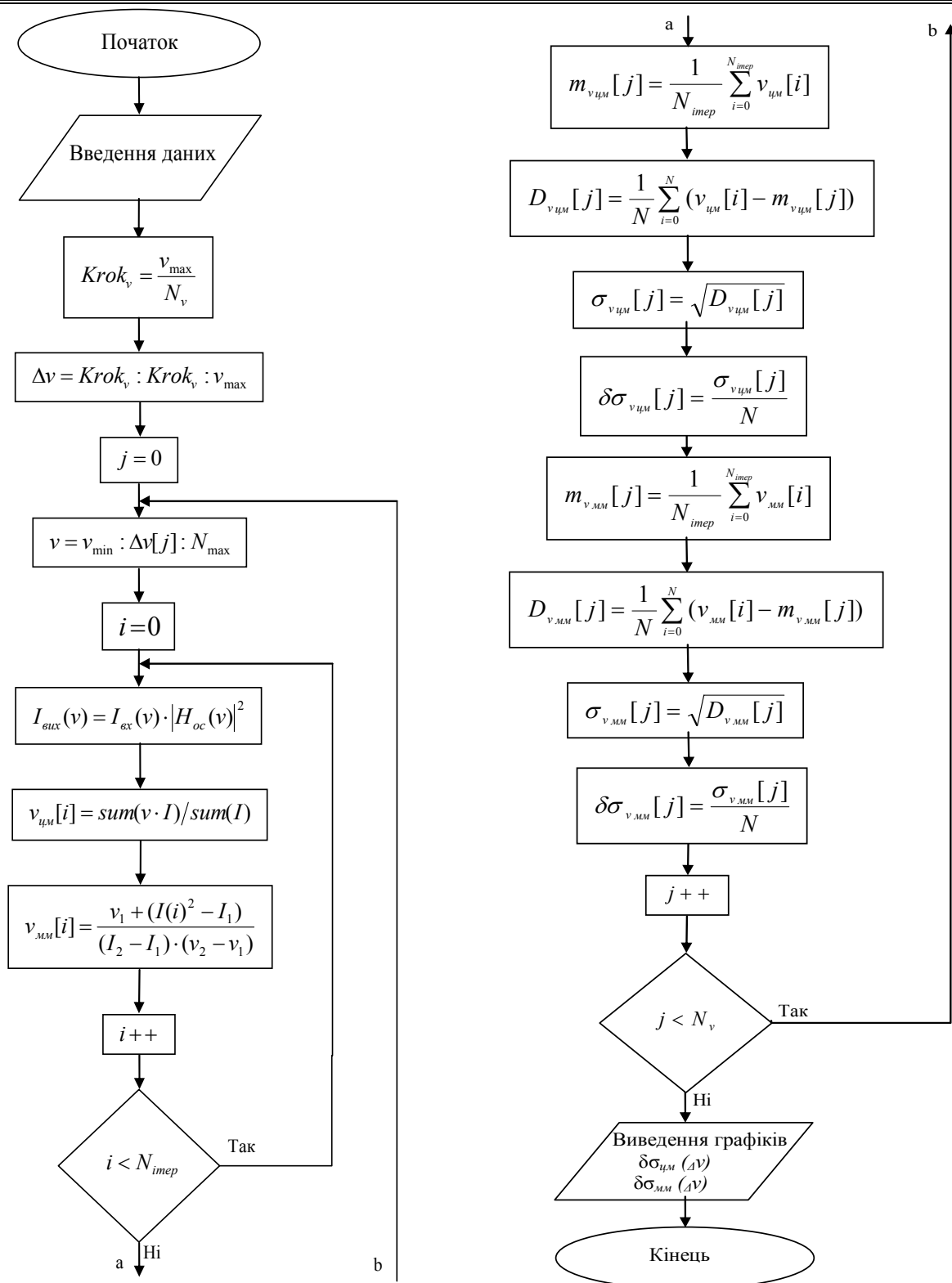


Рисунок 7 – Блок схема алгоритму роботи програми для знаходження залежності непевності визначення ЕЧАКС КРС

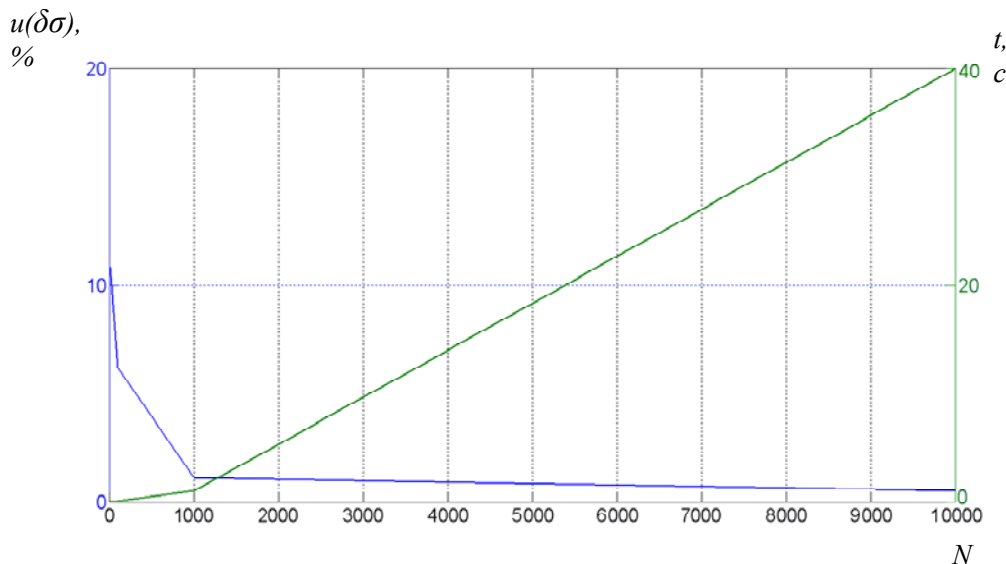


Рисунок 8 – Залежність визначення непевності ЕЧАКС КРС від кількості випадкових послідовностей

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Побудована програмна модель визначення непевності ЕЧАКС КРС дозволяє працювати з будь якою кількістю випадкових послідовностей, проте, при збільшенні кількості послідовностей, час виконання суттєво зростає. З урахуванням цього, дослідження проводилися для 1000 випадкових послідовностей, за якого час виконання програми становить 0,96 с, до порівняння при 10000 випадкових послідовностях час виконання програми – 40 с [9, 10].

На підставі проведених досліджень отримано вираз відносної похибки засобу вимірювання температури, побудованого на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла за зсувом еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру; синтезовано моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла різної форми; створено програмні моделі оптичних елементів та оптичних схем засобу вимірювання температури на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Отже, розроблена програмна модель визначення непевності ЕЧАКС КРС дає змогу зменшити похибку вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла на 10%.

У порівнянні з вимірюванням температури методом, поданим у [1], ми отримали кращу швидкодію в 40 разів та зменшення відносної похибки вимірювання на 6%, за рахунок зменшення часу нагріву досліджуваного об'єкта лазером. Також, порівняно з пірометричним методом, товщина лазерного променя є досить невеликою, що дає можливість сфокусувати його на найменші об'єкти дослідження. Окрім цього, розроблений апаратно-програмний комплекс може бути використаний для калібрування матриці пікселів тепловізора, яку можна

застосувати для он-лайн спостереження за тепловими зображеннями та розташувати на борту безпілотної літальної апарату, оскільки його вага не перевищує 200 грам.

ВИСНОВКИ

Отже, в результаті синтезовано комп'ютерні моделі оптичних елементів та оптичних схем, а також спектри комбінаційного розсіювання світла, запропоновано два методи визначення значення еквівалентної частоти антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла.

Проведені дослідження показали, що первинне коло оптичної схеми не вносить похибки в результат вимірювання температури за зсувом частоти комбінаційного розсіювання світла. На підставі отриманих значень відносної похибки засобу вимірювання температури, можемо стверджувати про доцільність проведення дослідження вторинного кола оптичної схеми.

Науковою новизною є синтезовані програмні моделі антистоксової компоненти спектру комбінаційного розсіювання світла та оптичних елементів оптичних схем, що дає змогу провести теоретичні дослідження метрологічних характеристик засобів вимірювання температури, побудованих на основі ефекту комбінаційного розсіювання світла.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках теми ДБ\КРС №0113U003188 та продовжується в ДБ\Інформаційна технологія формування соціокомунікаційного середовища територіальних громад» для контролю території.

ЛІТЕРАТУРИ / ЛИТЕРАТУРА

1. Сегеда О. В. Вимірювання температури мікрооб'єктів за допомогою спектру комбінаційного розсіювання світла : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.11.04 /

- О. В. Сегеда; Нац. ун-т «Львівська політехніка». – Л., 2012. – 20 с.
- Коливна спектроскопія / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://chem.lnu.edu.ua/kah/Patsay/fmd/lecture-5.pdf>.
 - Комбінаційне розсіювання світла / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://lektisii.com/1-34316.html>.
 - Прояв у спектрах фотолюмінісценції та КРС впливу препарату у берберину на ДНК / [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/7608>.
 - Раман-спектри і структура аморфних плівок Bi₂S₃ та As₂S₃ / [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pcss/vol10/1003-10.pdf.
 - Raman Spectra of Metamorphic Rocks Minerals / [Електронний ресурс]. Режим доступу http://jm-derochette.be/Raman_Microscope/raman_spectra_Metamorphic.htm.
 - Hesketh P.J. Bio Nano Fluidic MEMS / P. J. Hesketh // Springer Science & Business Media, NY, 2007. – 267 p.
 - Zhang J. X. Molecular Sensors and Nano devices / John X J Zhang, Kazunori Hoshino // Springer Science & Business Media, USA, 2013. – 302 p.
 - Кривенчук Ю. Метод комбінаційного розсіювання світла у термометрії поверхні мікрооб'єктів / Ю. Кривенчук, О. Сегеда, С. Яцишин, // Вимірвальна техніка та метрологія. – 2012. – № 73. – С. 28–31.
 - The Method of Big Data Processing for Distance Educational System / [N. Shakhovska, O. Vovk, R. Hasko, Y. Kryvenchuk] // Advances in Intelligent Systems and Computing, Springer, Cham. – 2017. – Vol. 689. – P. 461–473.

Стаття надійшла до редакції 13.02.2018.
Після доробки 26.03.2018.

УДК 536.51.083:535

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СХЕМ СРЕДСТВАМИ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ПОСТРОЕННОГО НА ЭФФЕКТЕ РАМАНА И СТРУКТУРА АЛГОРИТМА ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кривенчук Ю. П. – канд. техн. наук, ассистент кафедры систем искусственного интеллекта Национального университета «Львовская политехника», Украина.

Шаховська Н. Б. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры систем искусственного интеллекта Национального университета «Львовская политехника», Украина.

Вовк О. Б. – канд. техн. наук, доцент кафедры систем искусственного интеллекта Национального университета «Львовская политехника», Украина.

Мельникова Н. И. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры систем искусственного интеллекта Национального университета «Львовская политехника», Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В процессе измерения температуры по сдвигу частоты комбинационного рассеивания света, возникает проблема определения эквивалентной частоты спектра. Это проявляется в результате прохождения отраженного излучения через оптические элементы, искажается погрешностями комплексных частотных характеристик этих элементов. Неточное определение эквивалентной частоты влечет за собой большую ошибку определения температуры. Поэтому актуальным является синтез программных моделей оптических элементов оптических схем, а также спектра комбинационного рассеивания света для дальнейших исследований.

Цель работы – синтез моделей элементов оптических схем и спектров комбинационного рассеивания света для дальнейшего исследования оптических элементов и оптических областей.

Метод. В последнее время широко применяются различные изделия и сенсоры, разработанные на базе микро – и наноструктурированных материалов. Разработан целый ряд компонентов электронной техники, которые в сотни раз меньше своих предшественников. В процессе изготовления таких миниатюрных компонентов электронной техники необходимо точно контролировать температуру. Характеристики существующих средств измерений не вполне удовлетворяют этим требованиям. Одним из перспективных направлений для решения этой проблемы является применение метода комбинационного рассеивания света. В рамках метода комбинационного рассеивания света известно два способа определения температуры: первый по отношению интегральной площади стоксовой компоненты спектра к антистоксовой, второй по сдвигу частоты комбинационного рассеивания света. Второй способ имеет лучшее быстродействие, превышающее первый более чем в 2 раза, так как нужно определять только антистоксовую компоненту спектра. Также, данный способ имеет меньшую методическую погрешность, которая возникает за счет перегрева исследуемого объекта лазером. Поэтому был выбран данный метод и способ для дальнейших исследований.

Результаты. Синтезированы компьютерные модели оптических элементов и оптических схем, а также спектры комбинационного рассеивания света. Предложено два метода определения значения эквивалентной частоты антистоксовой компоненты спектра комбинационного рассеивания света.

Выводы. Проведенные исследования показали, что первичный круг оптической схемы не вносит погрешности в результат измерения температуры по сдвигу частоты комбинационного рассеивания света. Доведено целесообразность проведения исследования вторичной цепи оптической схемы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: измерение температуры, спектры комбинационного рассеивания света, Романовский термометр.

COMPUTER MODELING OF FUNCTIONS FOR THE TRANSFORMATION OF OPTICAL SCHEMES OF MEASUREMENT OF TEMPERATURE CONSTRUCTED ON RAMAN EFFECT AND STRUCTURE OF THE ALGORITHM OF THEIR RESEARCH

Kryvenchuk Yu. P. – PhD, Assistant of the Artificial Intelligence Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Shakhovska N. B. – Dr.Sc., Professor, Head of Artificial Intelligence Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vovk O. B. – PhD, Associate professor of the Artificial Intelligence Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Melnykova N. I. – PhD, Senior Lecturer of the Artificial Intelligence Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. In the process of measuring the temperature for the frequency shift of the combination scattering of light there is a problem of determining the equivalent frequency of the spectrum. This is manifested by the passage of reflected radiation through optical elements, which is distorted by the errors of the complex frequency characteristics of these elements. Large error in temperature determination is result of inaccurate definition of the equivalent frequency. Therefore, the synthesis of software models of optical elements of optical circuits, as well as the spectrum of combinational light scattering for further research is relevant.

Objective – synthesis of models of elements of optical circuits and spectra of combination scattering of light. That makes it possible to investigate the uncertainty of the transfer characteristics of the optical transformation function.

Method. Recently, various products and sensors, developed on the basis of micro and nanostructure materials, are widely used. A number of electronic technology components are developed that are hundreds of times smaller than their predecessors. In the process of manufacturing such miniature components of electronic technology need to carefully monitor the temperature. Characteristics of existing measuring instruments do not fully meet these requirements. One of the promising directions for solving this problem is the use of the method of combining light scattering. Two methods of determining the temperature are known in the framework of the method of the combination scattering of light: the first with respect to the ratio of the integral area of the Stokes component of the spectrum to the anti-Stokes, the second by the shift of the frequency of light scattering. The second method has a better performance at least 2 times, since it is only necessary to determine the anti-Stokes component of the spectrum. Also, this method has a lesser methodological error, which arises due to overheating of the object being studied by a laser. Therefore, this method and method for further research was chosen.

Results. Synthesized computer models of optical components and optical circuits and Raman spectroscopy. Two methods for determining the value of the equivalent frequency of an anti-Stokes component of the light scattering spectrum are proposed.

Conclusions. The conducted studies have shown that the primary circle of the optical circuitry does not make any errors in the result of measuring the temperature at the shift of the frequency of the combination light scattering. It's proven expedient to conduct a study of the secondary circle of the optical circuit.

KEYWORDS: temperature measurement, spectra of combinational light scattering, Raman thermometer.

REFERENCES

1. Sehedá O. V. Measurement of the temperature of microscopic objects with the aid of the spectrum of light scattering combinations: author's abstract. dis ... Candidate tech Sciences: 05.11.04. Lviv Polytechnic National University. Lviv, 2012, 20 p.
2. Oscillation spectroscopy / [Electronic resource]. Access mode: <http://chem.lnu.edu.ua/kah/Patsay/fmd/lecture-5.pdf>.
3. Combination light scattering / [Electronic resource]. Access mode: <http://lektsii.com/1-34316.html>.
4. Manifestation in the spectra of photoluminescence and CRC of the effect of the drug in berberine on DNA / [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/7608>.
5. Raman spectra and the structure of amorphous films Bi₂S₃ and As₂S₃ / [Electronic resource]. Access mode: http://www.pu.if.ua/inst/phys_che/start/pccs/vol110/1003-10.pdf.
6. Raman Spectra of Metamorphic Rocks Minerals / [Elektronnyy resurs]. Rezhym dostupu http://jmderochette.be/Raman_Microscope/raman_spectra_Metamorphic.htm.
7. Peter J. Hesketh. «Bio Nano Fluidic MEMS». Springer Science & Business Media, NY, 2007.
8. John X J Zhang, Kazunori Hoshino. «Molecular Sensors and Nano devices». Springer Science & Business Media, USA, 2013
9. Kryvenchuk Yu., Seged O., Yatsyshyn S., Method of Combination Light Scattering in the Thermometry of Microscopic Surface, Measuring technique and metrology, 2012, No. 73, pp. 28–31.
10. Shakhovska N., Vovk O., Hasko R., Kryvenchuk Y. The Method of Big Data Processing for Distance Educational System, *Advances in Intelligent Systems and Computing* Springer, Cham, 2017, Vol. 689, pp. 461–473.

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ОБУЧАЮЩЕЙ ВЫБОРКИ ДЛЯ АДАПТАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ФИЛЬТРА

Пиза Д. М. – д-р техн. наук, проректор по НИР и ВПР, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Романенко С. Н. – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры Защиты информации, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Семенов Д. С. – начальник отдела, Казенное предприятие «Научно-производственный комплекс «Искра», Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Для обеспечения помехозащищенности современных радиолокационных станций используют двухэтапную пространственно-временную обработку сигналов. Однако, при одновременном воздействии активной шумовой и пассивной помехи последняя декоррелирует активную помеху. Это существенно ограничивает помехозащищенность когерентно-импульсных радиолокационных станций. Поэтому формирование классифицированной обучающей выборки, порожденной только активной шумовой помехой, является достаточно актуальной задачей.

Целью работы является исследование корреляционного метода формирования классифицированной обучающей выборки в реальном масштабе времени путем текущего анализа модуля межканального коэффициента корреляции по дальности в каждом периоде повторения сигналов радиолокационной станции.

Метод реализуется формированием интервальной синхронной оценки как модуля межканального коэффициента корреляции, так и весовых коэффициентов пространственного фильтра. При этом, интервал с максимальным значением модуля межканального коэффициента корреляции определяется как классифицированная обучающая выборка, а сформированный на этом интервале весовой коэффициент используется для адаптации весового коэффициента пространственного фильтра при компенсации активной шумовой помехи в следующем периоде повторения сигналов радиолокационной станции.

Результаты. Рассмотрены теоретические и практические аспекты формирования классифицированной обучающей выборки. Разработана структурная схема пространственного фильтра с корреляционным анализом текущего распределения пассивной помехи по дальности посредством оценки модуля межканального коэффициента корреляции сигналов, действующих в каналах пространственного фильтра. Разработана и протестирована математическая модель адаптивного пространственного фильтра. Подтверждена возможность работы пространственного фильтра с формированием классифицированной обучающей выборки в реальном масштабе времени.

Выводы. Научная новизна проведенного исследования состоит в дальнейшей разработке нового метода формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации пространственного фильтра. Показано, что текущий анализ модуля межканального коэффициента корреляции позволяет в реальном масштабе времени определить интервал, на котором отсутствует пассивная помеха, и сформировать обучающую выборку для адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

Практическая значимость определяется разработкой структурной схемы пространственного адаптивного фильтра и полученными результатами моделирования, при этом адекватность модели подтверждена аналитическими расчетами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: адаптивная пространственная обработка, комбинированная помеха, классифицированная обучающая выборка, моделирование.

АББРЕВИАТУРЫ

АШП – активная шумовая помеха;

ДНА – диаграмма направленности антенны;

КОВ – классифицированная обучающая выборка;

ММКК – модуль межканального коэффициента

корреляции;

ПП – пассивная помеха;

ПФ – пространственный фильтр;

РЛС – радиолокационная станция;

ФКОВ – формирователь классифицированной обучающей выборки.

НОМЕНКЛАТУРА

$\dot{k}_i$ – комплексное значение весового коэффициента

ПФ на i -том интервале дальности;

$\dot{k}_{\text{опт}}$ – оптимальное комплексное значение весового коэффициента ПФ;

$\dot{U}_0$ – комплексное значение АШП и ПП в основном канале;

$\dot{U}_K$ – комплексное значение АШП и ПП в компенсационном канале;

$\dot{U}_K^*$ – комплексно – сопряженное значение АШП и ПП в компенсационном канале;

$\dot{U}_{A0}$ – комплексное значение АШП в основном канале;

$\dot{U}_{AK}$ – комплексное значение АШП в компенсационном канале;

$\dot{U}_{AK}^*$ – комплексно-сопряженное значение АШП в компенсационном канале;

$\dot{U}_{П0}$ – комплексное значение ПП в основном канале;

$\dot{U}_{ПК}$ – комплексное значение ПП в компенсационном канале;

$|\dot{\rho}|_i$ – модуль межканального нормированного коэффициента корреляции в i -ом интервале дальности;

$|\rho|_{\max}$ – максимальное значение модуля межканального коэффициента корреляции на интервале дальности.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения эффективной работы радиолокационных станций в условиях воздействия комбинированных помех используют двухэтапную пространственно-временную обработку сигналов. Однако, на интервалах дальности, где на РЛС одновременно воздействует активная шумовая и пассивная помеха, последняя декоррелирует активную шумовую помеху [1]. Это ухудшает коэффициент подавления АШП пространственным фильтром. В [2, 3] также показано, что при одновременном воздействии пассивной помехи скорость адаптации пространственного фильтра существенно замедляется. В [4] отмечается, что в условиях воздействия комбинированных помех потери в выходном отношении сигнал/помеха + шум при пространственно-временной обработке сигналов достигают 10–30 дБ. Поэтому для уменьшения потерь при пространственно-временной обработке, для адаптации значений весовых коэффициентов пространственного фильтра, необходимо тем или иным образом сформировать классифицированную обучающую выборку, порожденную только АШП.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известен частотный метод формирования КОВ. Метод основан на использовании спектральных отличий в структуре АШП и ПП. В [5, 6] в результате имитационного моделирования показано, что использование режекторных фильтров в цепях формирования весовых коэффициентов, настроенных на подавление пассивных помех, обеспечивает формирование КОВ, порожденной только АШП. Недостатком метода является ухудшение компенсации прицельных по частоте АШП. Еще одним недостатком метода, ограничивающим его применение при защите РЛС от АШП, действующих в направлении боковых лепестков диаграммы направленности антенны, является разнос антенн основного и компенсационного каналов в пространстве [7]. Поэтому оценка возможности формирования КОВ корреляционным методом при согласованной фильтрации сигналов в реальном масштабе времени является достаточно актуальной задачей.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для формирования классифицированной обучающей выборки в [8] предложено использовать временной интервал, расположенный в конце дальности действия РЛС. Предложенное техническое решение основывалось на предположении, что интенсивность пассивной помехи по мере увеличения дальности существенно уменьшается. Однако, при пространственно распределенных кучево-дождевых облачных системах, даже на предельной дальности действия РЛС, интенсивность пассивных помех может существенно

превышать уровень собственных шумов приемного устройства.

В [9] предложен метод формирования классифицированной обучающей выборки, использующий естественную нестационарность пассивных помех по дальности [10]. Предложенный метод основан на использовании апостериорной информации относительно распределения пассивной составляющей комбинированной помехи по дальности. Поскольку при одновременном воздействии активной шумовой и пассивной помехи последняя декоррелирует активную помеху, то в упомянутой работе предложено производить текущую оценку распределения модуля межканального коэффициента корреляции по дальности. При этом вследствие нестационарности ПП по дальности представлялось возможным выбрать временной интервал для формирования классифицированной обучающей выборки. Настоящая статья является продолжением работ, выполненных авторами ранее.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Структурная схема пространственного фильтра с прямым вычислением весовых коэффициентов и корреляционным анализом распределения модуля межканального коэффициента корреляции по дальности представлена на рис. 1, где $\dot{U}_0$ и $\dot{U}_k$ – комплексные значения АШП и ПП, которые действуют в основном и компенсационном каналах, к которым подключены остронаправленная антенна А1 и слабонаправленная антенна А2, соответственно.

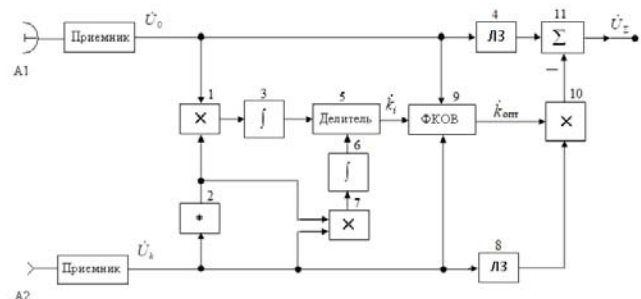


Рисунок 1 – Структурная схема пространственного фильтра

В представленной схеме блоки 1, 2, 3, 5, 6 и 7 предназначены для вычисления комплексного значения весового коэффициента ПФ k_i на интервалах дальности в каждом периоде повторения сигналов РЛС. В блоке формирования классифицированной обучающей выборки 9 производится выбор оптимального значения весового коэффициента, который соответствует максимальному значению модуля межканального коэффициента корреляции в пределах периода повторения на всех интервалах дальности.

Структурная схема ФКОВ представлена на рис. 2.

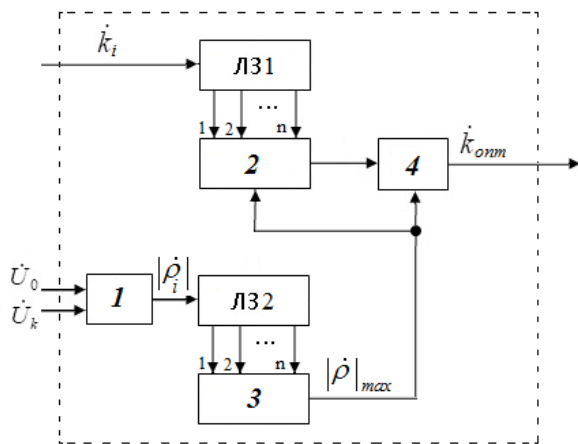


Рисунок 2 – Структурная схема ФКОВ

Здесь рассчитанные на интервалах дальности значения весовых коэффициентов $\dot{k}_i$ последовательно поступают на вход многоотводной линии задержки ЛЗ1. Задержка между выходами ЛЗ1 равняется интервалу усреднения весовых коэффициентов. Вычисленные значения весовых коэффициентов с выходов ЛЗ1 поступают на входы n -канального коммутатора 2. Параллельно с вычислением весовых коэффициентов $\dot{k}_i$ в блоке 1 выполняется расчет ММКК на тех же оценочных интервалах дальности. Полученные значения ММКК $|\dot{\rho}|_i$ последовательно поступают на многоотводную линию задержки ЛЗ2. Задержка между отводами ЛЗ2 равняется интервалу усреднения оценки величины ММКК $|\dot{\rho}|$. С выводов линии задержки ЛЗ2 рассчитанные значения ММКК поступают на 1, 2, ..., n входы устройства выбора максимума 3, где анализируется n значений ММКК и формируется код позиционного номера входа, на котором реализуется максимальное значение $|\dot{\rho}|_{\max}$. Этот код поступает на управляющий вход коммутатора 2 и запоминающего устройства 4, в котором фиксируется оптимальное значение весового коэффициента $\dot{k}_{\text{опт}}$. Значение $\dot{k}_{\text{опт}}$ поступает на вход комплексного умножителя 10 (см. рис. 1), где умножается на сигнал компенсационного канала $\dot{U}_k$. Результат умножения поступает на сумматор 11, в котором после сложения с сигналом основного канала $\dot{U}_0$, происходит компенсация АШП.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Моделирование пространственного фильтра, структурная схема которого представлена на рис. 1, осуществлялось с использованием пакета графического расширения SimuLink системы MATLAB. Моделирование проводилось при условиях, когда АШП действовала с направления боковых лепестков ДНА основного канала. При этом в направлении на АШП коэффициент усиления компенсационной антенны равнялся коэффициенту усиления по боковому лепестку основной антенны. ПП действовала с направлением главного лепестка ДНА основного канала. При этом коэффициент усиления основной антенны на 20 дБ превышал коэффициент усиления компенсационной антенны.

© Пиза Д. М., Романенко С. Н., Семенов Д. С., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-4

стку основной антенны. ПП действовала с направлением главного лепестка ДНА основного канала. При этом коэффициент усиления основной антенны на 20 дБ превышал коэффициент усиления компенсационной антенны.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе исследований при оговоренных условиях моделирования для случая воздействия АШП по боковым лепесткам и воздействию пассивной помехи по главному лучу ДНА произведена оценка влияния пассивной помехи на компенсацию АШП. Моделирование проведено при различном отношении дисперсии активной шумовой помехи $\sigma_{\text{АШП}}^2$ к дисперсии пассивной помехи $\sigma_{\text{ПП}}^2$. Результаты моделирования представлены на рис. 3. Из рис. 3 следует, что зависимость коэффициента подавления АШП от отношения дисперсий составляющих комбинированной помехи $\sigma_{\text{АШП}}^2 / \sigma_{\text{ПП}}^2$ имеет нелинейный характер. Причем нелинейность полученной зависимости в большей степени происходит в области больших превышений пассивной помехи над активной. При моделировании для различных отношений дисперсий составляющих комбинированной помехи фиксировался ММКК $|\dot{\rho}|_{\text{мод}}$ при формировании КОВ.

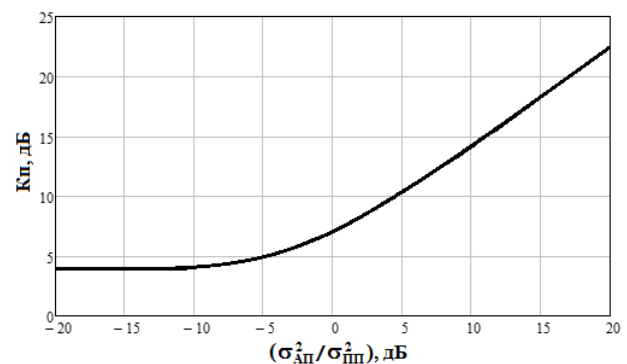


Рисунок 3 – Моделирование пространственного фильтра

Результаты моделирования сведены во вторую строку приведенной ниже таблицы.

При исследовании проводилась также проверка достоверности полученных результатов моделирования аналитическим методом. Известно [11], что в случае одного источника помехи ММКК вычисляется по следующему выражению:

$$|\dot{\rho}| = \frac{|\dot{U}_0 \dot{U}_K^*|}{\sqrt{|\dot{U}_0|^2 |\dot{U}_K|^2}}. \quad (1)$$

В случае двух некоррелированных источников помех выражение (1) усложняется и принимает вид:

$$|\dot{\rho}| = \frac{|\dot{U}_{A0} \dot{U}_{AK}^* + \dot{U}_{П0} \dot{U}_{ПК}^*|}{\sqrt{(|\dot{U}_{A0}|^2 + |\dot{U}_{П0}|^2) \cdot (|\dot{U}_{AK}|^2 + |\dot{U}_{ПК}|^2)}}, \quad (2)$$

где $\dot{U}_{A0}$ и $\dot{U}_{AK}$ – комплексные значения АШП, действующей в основном и в компенсационном канале; $\dot{U}_{П0}$ и $\dot{U}_{ПК}$ – комплексные значения ПП, действующие в тех же каналах. Результаты проведенных расчетов ММКК $|\rho|_{ан}$ сведены в третью строку табл. 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования и расчета

Отношение $\sigma_{АШП}^2 / \sigma_{ПП}^2$, дБ	20	10	0	– 10	– 20
$ \rho _{мод}$	0,996	0,960	0,770	0,573	0,770
$ \rho _{ан}$	0,996	0,963	0,774	0,575	0,774

Следует отметить, что значения $|\rho|_{мод}$ брались в конце временного оценочного интервала дальности, когда автокомпенсатор уже выходит на устойчивый режим работы. Представленные в таблице результаты дают основание считать, что текущая оценка ММКК может обеспечить формирование обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов ПФ в реальном масштабе времени.

Анализ данных, представленных в таблице, показывает высокую точность совпадения результатов имитационного моделирования с результатами, полученными аналитическим методом. Это дает основание считать разработанную математическую модель адекватной структурной схеме адаптивного пространственного фильтра.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Впервые установлено, что зависимость коэффициента подавления в области малых значений отношения $\sigma_{АШП}^2 / \sigma_{ПП}^2$ имеет существенно нелинейный характер. Кроме того, из рис. 3 следует, что чем выше уровень пассивной помехи, тем меньше коэффициент подавления АШП. Этот результат совпадает с оценками, приведенными в работах Абрамовича Ю. И. [2, 3].

При проведении дальнейшей работы авторы статьи планируют исследовать динамические характеристики процесса компенсации АШП при воздействии многомодовой пассивной помехи, а также при наличии полезного сигнала.

ВЫВОДЫ

1. Разработана и протестирована модель адаптивного пространственного фильтра с формированием классифицированной обучающей выборки при подавлении АШП в каналах РЛС.

2. Текущий анализ модуля межканального коэффициента корреляции позволяет в реальном масштабе времени определить временной интервал дальности, на котором отсутствует пассивная помеха, и сформировать классифицированную обучающую выборку для

адаптации весовых коэффициентов пространственного фильтра.

3. Результаты моделирования с высокой точностью совпадают с данными теоретических расчетов, что дает основание считать разработанную математическую модель адекватной структурной схеме адаптивного пространственного фильтра.

ЛІТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Адаптивные радиотехнические системы с антенными решетками / А. К. Журавлев, В. А. Хлебников, А. П. Родимов [и др.]. – Л. : Изд. Ленинградского университета, 1991. – 544с.
2. Абрамович Ю. И. Быстродействие поочередной настройки отдельных систем защиты от комбинированных помех / Ю. И. Абрамович, В. Г. Качур // Радиотехника и электроника, 1969. – Вып. 1. – С. 52–58.
3. Абрамович Ю. И. Предельная скорость сходимости процессов адаптивной настройки систем компенсации помех в условиях неклассифицированной обучающей выборки / Ю. И. Абрамович // Радиотехника и электроника. – 1982. – Вып. 8. – С. 1534–1538.
4. Григорьев В. В. Комбинированная обработка сигналов в системах радиосвязи / В. В. Григорьев. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2002. – 262 с.
5. Пиза Д. М. Метод компенсации активной составляющей комбинированной помехи в когерентно-импульсной РЛС / Д. М. Пиза, Е. А. Звягинцев, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2016. – № 6. – С. 23–29. DOI: 10.20535/S0021347016060030.
6. Пиза Д. М. Методы формирования классифицированной обучающей выборки для адаптации весовых коэффициентов автокомпенсатора помех / Д. М. Пиза, Г. В. Мороз // Известия высших учебных заведений. Радиоэлектроника. – 2018. – № 1. – С. 47–54 DOI: 10.20535/80021347016060030.
7. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки: введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер ; пер. с англ. под ред. В. А. Лексаченко. – М. : Радио и связь, 1986. – 445 с.
8. Адаптивные алгоритмы компенсации помех : учебно-методическое пособие / Д. Н. Ивлев, И. Я. Орлов, А. В. Сорокина, Е. С. Фитасов ; Мин-во образования и науки РФ, Нижегородский гос. университет им. Н. И. Лобачевского. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н. И. Лобачевского, 2014. – 8 с.
9. Пиза Д. М. Метод формирования классификационной обучающей выборки для автокомпенсатора помех при время-пространственной фильтрации сигналов / Д. М. Пиза, В. Н. Лаврентьев, Д. С. Семенов // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2016. – № 3. – С. 18–22. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-2.
10. Атлас облаков / Федер. Служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Рос-гидромет), Гл. геофиз. обсерватория им. А. И. Воейкова; [Д. П. Беспалов и др.; ред.: Л. К. Сурыгина]. – Санкт-Петербург : Д'АРТ, 2011. – 248 с.
11. Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов. – М. : Сов. радио, 1974. – 360 с.

Статья поступила в редакцию 28.08.2018.
После доработки 03.09.2018.

КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ ПРОСТОРОВОГО ФІЛЬТРА

Піза Д. М. – д-р техн. наук, проректор з НПР та ППР, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Романенко С. М. – канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри захисту інформації, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Семенов Д. С. – начальник відділу, Казенне підприємство «Науково-виробничий комплекс «Іскра», Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Для забезпечення завадозахищеності сучасних радіолокаційних станцій використовують двоетапну просторово-часову обробку сигналів. Однак, при одночасному впливі активної шумової та пасивної завади остання декорелює активну заваду. Це істотно обмежує завадозахищеність когерентно-імпульсних радіолокаційних станцій. Тому формування класифікованої навчальної вибірки, породженої тільки активною шумовою завадою, є досить актуальним завданням.

Метою роботи є дослідження кореляційного методу формування класифікованої навчальної вибірки в реальному масштабі часу шляхом поточного аналізу модуля міжканального коефіцієнта кореляції по дальності в кожному періоді повторення сигналів радіолокаційної станції.

Метод реалізується формуванням інтервальної синхронної оцінки як модуля міжканального коефіцієнта кореляції, так і вагових коефіцієнтів просторового фільтра. При цьому, інтервал з максимальним значенням модуля міжканального коефіцієнта кореляції визначається як класифікована навчальна вибірка, а сформований на цьому інтервалі ваговий коефіцієнт використовується для адаптації вагового коефіцієнта просторового фільтра при компенсації активної шумової завади в наступному періоді повторення сигналів радіолокаційної станції.

Результати. Розглянуто теоретичні та практичні аспекти формування класифікованої навчальної вибірки. Розроблено структурну схему просторового фільтра з кореляційним аналізом поточного розподілу пасивної завади по дальності за допомогою оцінки модуля міжканального коефіцієнта кореляції сигналів, що діють в каналах просторового фільтра. Розроблено і протестовано математичну модель адаптивного просторового фільтра. Підтверджено можливість роботи просторового фільтра з формуванням класифікованої навчальної вибірки в реальному масштабі часу.

Висновки. Наукова новизна проведеного дослідження полягає в подальшій розробці нового методу формування класифікованої навчальної вибірки для адаптації просторового фільтра. Показано, що поточний аналіз модуля міжканального коефіцієнта кореляції дозволяє в реальному масштабі часу визначити інтервал, на якому відсутня пасивна завада, і сформувати навчальну вибірку для адаптації вагових коефіцієнтів просторового фільтра. Практична значимість визначається розробкою структурної схеми просторового адаптивного фільтра і отриманими результатами моделювання, при цьому адекватність моделі підтверджена аналітичними розрахунками.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: адаптивна просторова обробка, комбінована завада, класифікована навчальна вибірка, моделювання.

UDC 621.396.95

CORRELATION METHOD FOR FORMING THE TRAINING SAMPLE FOR ADAPTATION OF THE SPATIAL FILTER

Piza D. M. – Dr. Sc., Vice-Rector, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

Romanenko S. N. – PhD, Associate Professor of the Department of Information Protection, Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine.

Semenov D. S. – Head of Department, State Enterprise “Scientific and Production Complex “Iskra”, Zaporozhye, Ukraine.

ABSTRACT

Context. To ensure noise immunity of modern radar stations, two-stage space-time signal processing is used. However, with simultaneous exposure to active and passive interference, the latter decorrelates the active interference. This significantly limits the noise immunity of coherent-impulse radar stations. Therefore, the formation of a classified training sample, generated only by active noise interference, is quite important task.

Objective. The aim of the work is to investigate the correlation method for the formation of a classified learning sample in real time by the current analysis of the interchannel correlation coefficient module over distance in each period of repeating the radar signal.

The method is realized by forming an interval synchronous evaluation of both the interchannel correlation coefficient modulus and the spatial filter weight coefficients. In this case, the interval with the maximum value of the interchannel correlation coefficient modulus is defined as the classified training sample, and the weight coefficient formed on this interval is used to adapt the spatial filter weight factor when the active noise interference is compensated in the next period of repeating the signals of the radar.

Results. The theoretical and practical aspects of the formation of the classified training sample are considered. It was developed a block diagram of the spatial filter with a correlation analysis of the current passive interference distribution over distance by estimating the interchannel correlation coefficient modulus of the signals acting in the channels of the spatial filter. A mathematical model of the adaptive spatial filter was developed and tested. The possibility of working a spatial filter with the formation of a classified training sample in real time has been confirmed.

Conclusions. The scientific novelty of the study is to further develop a new method for the formation of a classified training sample for the adaptation of a spatial filter. It is shown that the current analysis of the module of the interchannel correlation coefficient allows in real time to determine the interval on which there is no passive interference and to form a training sample for adaptation of the weight coefficients of the spatial filter.

Practical significance is determined by the development of the structural scheme of the spatial adaptive filter and the obtained simulation results, while the adequacy of the model is confirmed by analytical calculations.

KEYWORDS: adaptive spatial processing, combined interference, classified training sample, modeling.

REFERENCES

1. Zhuravlev A. K., Hlebnikov V. A., Rodimov A.P. i dr. Adaptivnye radiotekhnicheskie sistemy s antennymi reshotkami. Leningrad, Izd. Leningradskogo universiteta, 1991, 544 p.
2. Abramovich JU. I., Kachur V. G. Bystrodeistvie poocherednoj nastroyki razdel'nyh sistem zashity ot kombinirovannyh pomeh, Radiotekhnika i elektronika, 1969, Vyp. 1, pp. 52–58.
3. Abramovich JU. I. Predel'naja skorost' shodimosti processov adaptivnoj nastroyki sistem kompensacii pomeh v usloviyah neklassifitsirovannoj obuchajushej vyborki, Radiotekhnika i elektronika, 1982, Vyp. 8, pp. 1534–1538.
4. Grigor'ev V. V. Kombinirovannaja obrabotka signalov v sistemah radiosvjazi. Moscow, EKO-TRENDZ, 2002, 262 p.
5. Piza D. M., Zvjagincev E. A., Moroz G. V. Metod kompensacii aktivnoj sostavljajushej kombinirovannoj pomehi v kogerentno-impul'snoj RLS, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2016, No. 6, pp. 23–29. DOI: 10.20535/S0021347016060030.
6. Piza D. M., Moroz G. V. Metody formirovaniya klassifitsirovannoj obuchajushej vyborki dlja adaptacii vesovyh koeffitsientov avtokompensatora pomeh, *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Radioelektronika*, 2018, No. 1, pp. 47–54.
7. Monzingo R. A., Miller T. U. : per. s angl. pod red. Leksachenko V. A. Adaptivnye antennye reshotki: vvedenie v teoriju. Moscow, Radio i svjaz', 1986, 445 p.
8. Ivlev D. N., Orlov I. JA., Sorokina A. V., Fitasov E. S. Adaptivnye algoritmy kompensacii pomeh: uchebno-metodicheskoe posobie ; Min-vo obrazovaniya i nauki RF, Nizhnenovgorodskij gos. universitet im. N. I. Lobachevskogo. Nizhnij Novgorod, NNGU im. N. I. Lobachevskogo, 2014, 8 p.
9. Piza D. M., Lavrent'ev V. N., Semenov D. S. Metody formirovaniya klassifitsirovannoj obuchajushej vyborki dlja avtokompensatora pomeh pri vremja-prostranstvennoj fil'tracii signalov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 18–22. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-2.
10. Bespalov D. P. i dr.; red. : Surygina L.K Atlas oblakov / Fever. Sluzhba po gidrometeorologii i monitiringu okruzhajushej sredy (Ros-gidromet), Gl. geofiz. observatorija im. A. I. Voejkova. Sankt-Peterburg, D'ART, 2011, 248 p.
11. Shirman JA. D. Razreshenie i szhatie signalov. Moscow, Sov. radio, 1974, 360 p.

TRANSIENT PROCESS AT LOW-ORDER FREQUENCY DEPENDENT DIGITAL COMPONENTS

Ukhina A. V. – Post-graduate student, Odessa National Polytechnic University Computing systems Department, Odessa, Ukraine.

Sitnikov V. S. – Dr. Sc., Professor, Odessa National Polytechnic University Computing systems Department, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. When constructing specialized and programmable mobile systems, there arises the problem of system restructuring, under system functioning conditions breach because of changes in the noise-signaling environment or the system operating conditions. Any rearrangement of the system's digital frequency-dependent components leads to the occurrence of transient process, which duration is determined by the components characteristics. The traditional approach to the transient process analysis refers to the zero initial conditions, however, the intelligent sensors and specialized computer systems operation as well as parameters adjustment as well as other system components can be performed under non-zero initial conditions. This implies the need for a large number of computations, not feasible sometimes in real time. Here essential is to assess the duration of process' transition to readjustment process to provide the system operability under new conditions.

Objective. To estimate the transient process' maximum duration when rearrangement, to determine the possible rearrangements range and width, taking into account the system stability.

Method. This research carrying out improved is the indirect method of transient process duration estimating by the transfer function poles simplifying the irrational function expansion.

Results. The effected analysis with relevant modeling and theoretical verification allowed obtaining relations to estimate the transient process maximum duration and to determine possible modifications range and width taking into account the system stability. Upon research results we built the dependencies of transient process duration onto the cutoff respective frequency. Simplified is the representation of relation used to determine the transient process length at the expense of decomposing into order series.

Conclusions. The results obtained allow us to estimate the transient process duration upper limit by improving the indirect method of estimating the transient process duration along the transfer function poles, while simplifying the irrational function expansion, that making possible, before the rearrangement beginning, considering the given new relative cutoff frequency and the component order, to predict the component stability afterwards. From a practical point of view, this reduces the calculations amount and due to the predicted result, increases the specialized computer system overall and by-components efficiency for specified performance criteria. The results obtained are applicable to the design of computer systems' microprocessor components.

KEYWORDS: filtering, intelligent sensors, transient process duration analysis, filter parameters rearrangement.

ABBREVIATIONS

DTC – discrete transient characteristics;

LO FDDC – low-order frequency-dependent digital components;

LPF – low-pass filter.

NOMENCLATURE

t_{III} – transient process time;

a, b – real coefficients;

N – transient process duration;

A – constant depending on the initial conditions at an equivalent relative damping constant τ ;

β – complex root modulus;

τ – relative damping constant;

ω_c – relative cutoff frequency;

$H(z)$ – transfer function;

T – quantification period;

f_d – linear discretisation frequency;

f – linear cutoff frequency;

z – complex variable;

Δ – some given number.

INTRODUCTION

A rapid microprocessor equipment development, its computational power growth, along to the cost decrease,

enabled modern microprocessors' incorporation into various specialized computer systems components. The combination of a measuring transducer and a microprocessor at such systems allows performing basic operations to transform and increase the measurement information reliability at those data origination point [1–6]. Such sensors are called smart sensors.

In accordance with the Fieldbus Foundation ideology and t standard, typical algorithms for measurement information processing (filtration, scaling, linearization, etc.), control and regulation are transferred to the lowest control level; this one of intelligent sensors and actuators [1, 4–6]. For example, the choice of filters and their parameters in accordance with the interference characteristics is based on the sensor signal analysis or the control command.

Such situation involves the need to develop adjustable LO FDDC, because their connection considering it is possible to construct a FDDC of any order. It should be noted that the FDDC concept is broader than this one of digital filter. Such structure of an adjustable high-order digital filter allows much easier tuning and rearrangement [7, 8].

1 PROBLEM STATEMENT

The operating conditions at an intelligent sensor may vary. When some operating conditions change the filter shall readjust to control these changes in accordance with the specified criterion. If the changes are slow, i.e. occur

over time exceeding the filter transient process duration, the filter, as a rule, is tracking them [9, 10]. The change speed increasing the adjustable filter efficiency will decrease, because the filter does not have time enough to fully retune during that change time (in this case, its transient process has not been ended).

Then, there arises the problem of analyzing the transient process duration and type, as well as estimating the similar LO FDDCs; transient process maximum duration when the transfer functions coefficients are rearranged.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

It is known from the systems theory that the transient process duration is most often determined by the transfer function root at minimal real part [11–15]. A classical approach to the transient process duration analysis of the implies zero initial conditions. However, the operation of intelligent sensors, specialized computer systems, and parameters adjustment can occur even under non-zero initial conditions. Such an analysis is rather complicated and requires large calculations with different variants of the transient process, which sometimes is not feasible in real time.

When creating intelligent sensors and specialized computer systems, which include a large number of components, such an analysis is rather problematic. Therefore, several authors suggest setting, at the design stage, the system critical frequency, that shall be higher than the frequency of possible interference or effects on the system [11, 16].

In addition, it is proposed to estimate not the time of the transient itself, but only the exponential time constant, serving to approximate the transient process or time of the studied transient process [16].

When engineering analysis of the system, it is proposed to take as the first approximation departing point the transient process duration at zero initial conditions [17].

Since basically systems operate under non-stationary conditions, several foreign authors suggest analyzing the quasi-stationary duration, for example, based on statistical linearization methods. In this case, the quasi-stationary regions should overpass the system transient process duration [18].

All these approaches determine the range of possible changes or rearrangements when system adaptation or restructuring takes place.

Works [19, 20] expose results of transient processes' analysis for digital automatic control systems.

Usually, the transient process quality is estimated by direct or indirect indicators [12]. Direct indicators characterize immediately the transition process itself, as a response to a typical impact (usually stepwise). Indirect indicators evaluate the transient process by locating the characteristic equation roots or the poles of the transfer function, according to the system frequency characteristics or integral estimates. In general, the transient process quality is affected by both the transfer function's poles and zeros location.

3 MATERIALS AND METHODS

To analyse the transient process, we use the discrete transition characteristic (DTC) influenced by the δ -pulse, thus analysing the transient process free component and the single step response, as well as the studied transient process forced component [10, 20–21].

The transient process duration is defined as the time interval from the time, e.g., the stepwise action has been applied to the time point after which the deviations of the output value from its new steady-state cipher become less than a certain predetermined number Δ . In general, this value is determined by the device task and condition, but usually this cipher is taken at a level 5% of the steady-state value. Depending on the device, such time is specified as the number of output value oscillations or as (4–5) τ , where τ is the relative attenuation constant. Therefore, everything depends on the type of transient process: oscillatory, aperiodic or monotonic [12, 19, 20].

4 RESULTS

Let us consider the effect on the first-order and second-order FDDC transient process duration and type on the example of the low and high pass filters transfer functions when the relative cut-off frequency $\bar{\omega}_c$ changes on

the segment, $\bar{\omega}_c = [0.1 \div 0.9]$, where $\bar{\omega}_c = \frac{2\pi f}{\pi f_d}$, $\bar{\omega}_c \in [0 \div 1]$.

The transient process duration was determined in relative units: cycles, as $N = t_{III} \cdot f_d$. Such representation of the result allows comparing different FDDCs at different sampling rates.

The analysis results are given in Tables 1–4, showing the relative frequency, transfer function poles, and the components' transient process duration in cycles.

Table 1 – Duration of the first-order FDDC transient process free component

$\bar{\omega}_c$	0.1	0.26	0.42	0.58	0.74	0.9
β	0.7265	0.3959	0.1263	– 0.1263	– 0.3959	– 0.7265
HP	7	5	4	4	5	7
LP	7	5	4	4	5	7

Table 2 – Duration of the first-order FDDC transient process forced component

$\bar{\omega}_c$	0.1	0.26	0.42	0.58	0.74	0.9
β	0.7265	0.3959	0.1263	– 0.1263	– 0.3959	– 0.7265
HP	11	5	4	4	4	6
LP	11	5	4	4	4	6

Table 3 – Duration of the second-order FDDC transient process free component

$\bar{\omega}_c$	0.1	0.26	0.42	0.58	0.74	0.9
z	$0.7805 \pm 0.1793i$	$0.4517 \pm 0.3401i$	$0.1476 \pm 0.4065i$	$-0.1476 \pm 0.4065i$	$-0.4517 \pm 0.3401i$	$-0.7805 \pm 0.1793i$
HP	11	6	6	6	4	7
LP	7	7	5	6	6	11

Table 4 – Duration of the second-order FDDC transient process forced component

$\bar{\omega}_c$	0.1	0.26	0.42	0.58	0.74	0.9
z	$0.7805 \pm 0.1793i$	$0.4517 \pm 0.3401i$	$0.1476 \pm 0.4065i$	$-0.1476 \pm 0.4065i$	$-0.4517 \pm 0.3401i$	$-0.7805 \pm 0.1793i$
HP	11	8	6	5	4	6
LP	16	7	5	4	6	9

5 EXPERIMENTS

To analyze and evaluate the transient process duration, a simulative modeling was carried out with the mathematical package SciLab.

In Fig. 1 and Fig. 2 shown is the free component transient process type when the δ -pulse is applied to the first and second order low-pass filters.

It can be seen from the figures that, for relative cut-off frequency small values, the transient process is aperiodic, and for relative cut-off frequency large values the process is oscillatory with a damped amplitude.

Based on the above, the dependence between transient process duration and the relative cutoff frequency is plotted, Fig. 3 and Fig. 4.

The obtained data allow estimating the transient process maximum duration to select the range of possible effects on the component operation and the component transfer function coefficients adjustment range.

6 DISCUSSION

Theoretical research and simulative modeling showed that to estimate the transient process duration upper limit, the relations proposed in [11–12] can be modified.

For example, in [12] the author shows that the transient process duration is determined only by the complex root module β or by the module of the bigger (from among two) real root. The process discrete values at the points of time quantization will be located inside the region bounded by the symmetric envelopes

$$\varphi(t) = \pm A e^{-\frac{\ln(\beta t)}{T}},$$

where $T = \frac{1}{f_d}$ – quantization period, A – constant, depending on the initial conditions, containing an equivalent relative damping constant τ . In accordance with these provisions, obtained is the theoretical curve shown in Fig. 3 and Fig. 4.

The results obtained in a generalized form for digital systems can be represented by the relation [21]

$$N = \frac{a}{|\ln(\beta)|} + b, \quad (1)$$

where a, b – real coefficients ($1 < a < 3, 2 < b < 4$), β – complex root module or module of the bigger real root, $0 < \beta < 1$.

However, in this form the obtained ratio is difficult to use at microprocessor and computer systems. Therefore, we replace $\ln(\beta)$ by expanding into power series [23, 24]. Then transforming and simplifying, we obtain the following representation

$$-\ln(\beta) = 2 \frac{1-\beta}{1+\beta} \left[1 + \frac{(1-\beta)^2}{3(1+\beta)^2} + \frac{(1-\beta)^4}{5(1+\beta)^4} \right].$$

After modeling and experimental verification, it is possible to relay onto the first term

$$-\ln(\beta) = 2 \frac{1-\beta}{1+\beta}.$$

In this case, relation (1), taking into account the simplification, can be represented as follows

$$N = \frac{a}{2} \cdot \frac{1+\beta}{1-\beta} + b.$$

Graphically the theoretical dependence between of the transient process duration upper limit in cycles that shall be $N = f(\bar{\omega}_c)$, where $\bar{\omega}_c$ – the relative cutoff frequency, determined by the component transfer function coefficients a and b has the form shown in Fig. 5.

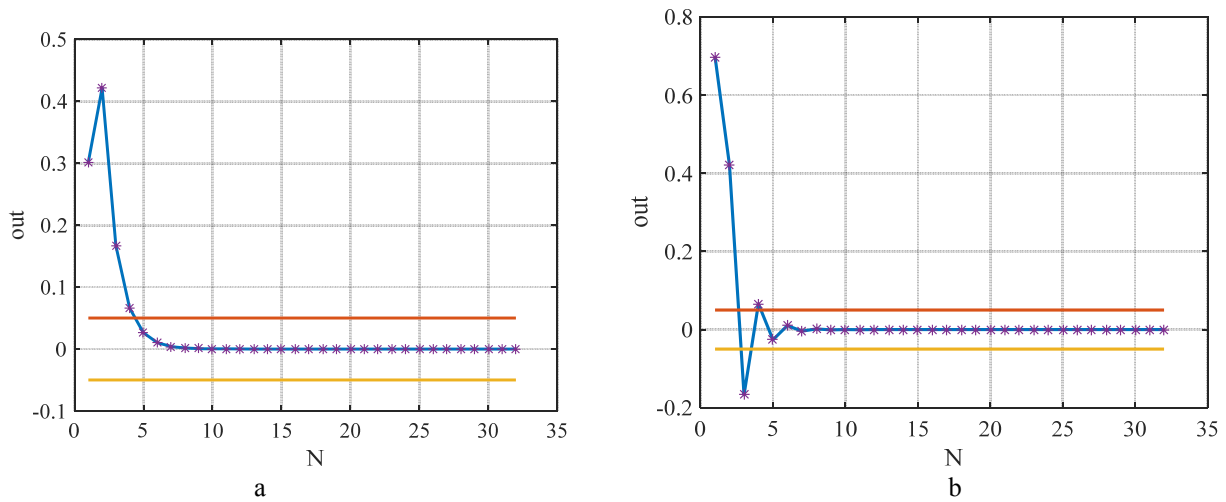


Figure 1 – 1st order low-pass filter transient process at:
a – $\bar{\omega}_c = 0.26$, $\beta = 0.3959$; b – $\bar{\omega}_c = 0.74$, $\beta = -0.3959$

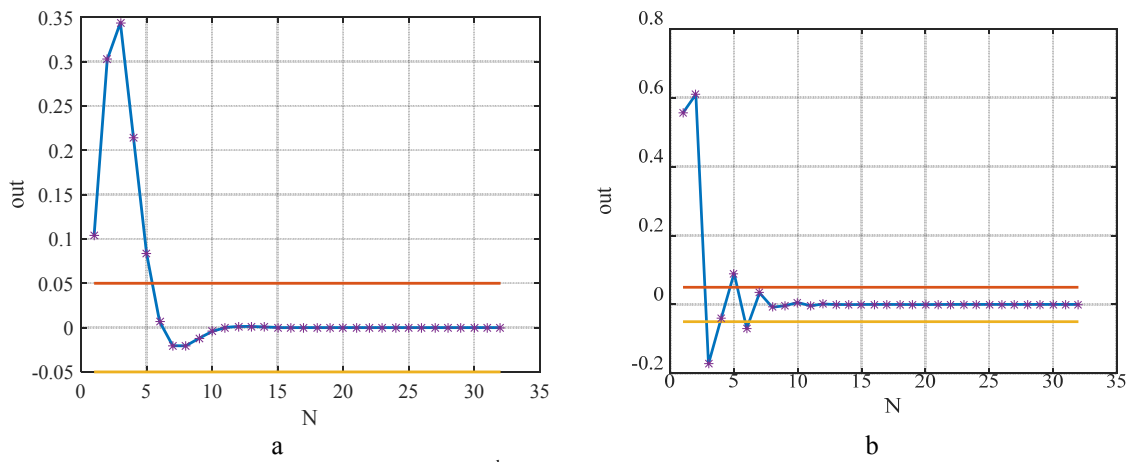


Figure 2 – 2nd order low-pass filter transient process at:
a – $\bar{\omega}_c = 0.26$, $z = 0.4517 \pm 0.3401i$; b – $\bar{\omega}_c = 0.74$, $z = -0.4517 \pm 0.3401i$

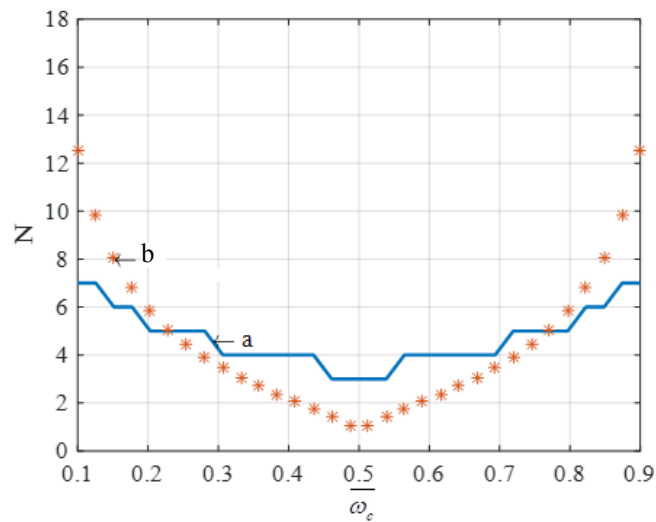


Figure 3 – 1st order low-pass filter transient process duration dependency on the relative cut-off frequency $\bar{\omega}_c$:
a – experimental; b – theoretical

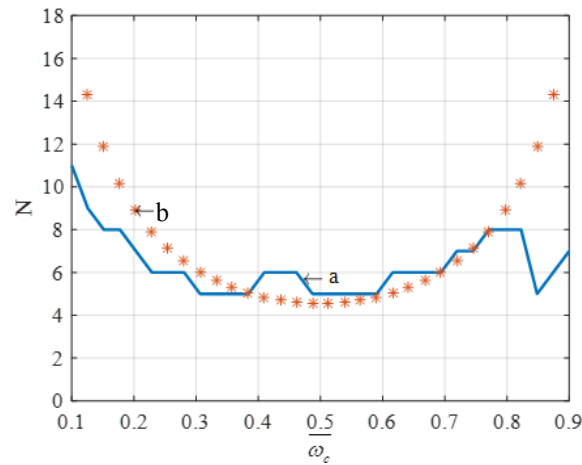


Figure 4 – 2nd order low-pass filter transient process duration dependency on the relative cut-off frequency $\bar{\omega}_c$:
a – experimental; b – theoretical

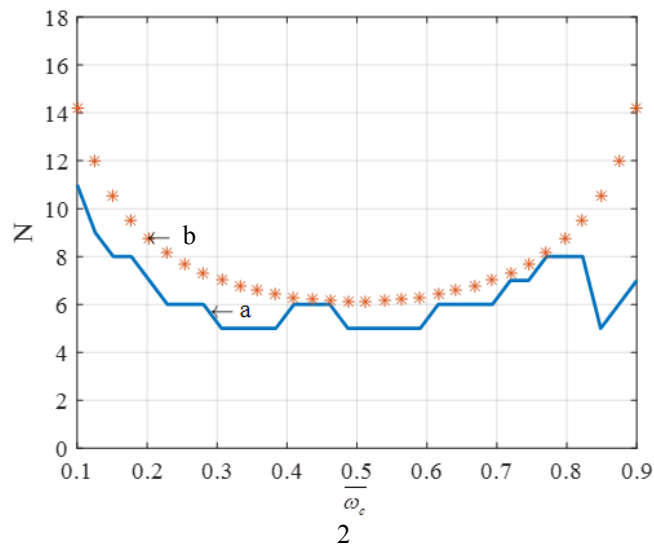
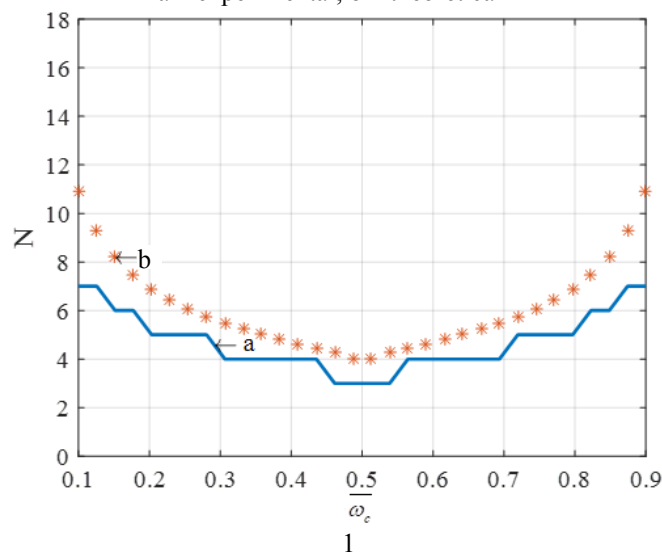


Figure 5 – Graph of the transient process duration upper limit for the frequency-dependent component

$$1 - 1^{\text{st}} \text{ order type } H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1}}{1 + b_1 z^{-1}}; \quad 2 - 2^{\text{nd}} \text{ order type } H(z) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}};$$

a – experimental; b – theoretical

CONCLUSIONS

At the issue of analysis, simulation and experimental verification carried out, we obtained relationships allowing us to estimate the transition process upper limit as a function of the relative cut-off frequency and the frequency-dependent component. Such a representation of the transient process duration upper limit estimation renders possible to analyze the of the specialized computer system components capacities when their parameters or transfer function coefficients and whole system properties undergo changes, therefore to determine the possible rearrangements ranges and widths, taking into account the system stability. This is especially important when adjusting the coefficients of frequency-dependent components in adaptive systems. Results obtained therefore are applicable to the design of specialized computer systems adjustable frequency-dependent components, for example, an ultrasonic rangefinder [6].

REFERENCES

1. Borisova L. F. Metody analiza i rascheta perehodnykh protsessov v elektricheskikh tsepyakh, *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy*, 2014, No. 6, pp. 113–116.
2. Borodianskii I. M., Turulin I. I. Primenenie rekursivnykh KIKh-filtrov dlya podavleniya pomekh pri avtomaticheskoy kontrole soprotivleniya izolyatsii, *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki*, 2016, No. 10(183), pp. 99–110.
3. Voitovich I.D., Korsunskii, V.M. Intellectualnye sensory. Moscow, Internet-Universitet Informatsionnykh Tekhnologii; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2011, 624 p.
4. Tuzlukov V. Signal Processing in Radar Systems. CRC Press, 2013, 596 p.
5. Kocon S., Piskowski J. Digital finite impulse response notch filter with non-zero initial conditions, based on an infinite impulse response prototype filter, *ASC Publications Anal. Chem.*, 2014, 86, pp. 3508–3516. dx.doi.org/10.1021/ac404150d.
6. Ukhina A.V., Bilenko A.A., Sitnikov V.S. Povyshenie effektivnosti programmno-tekhnicheskikh kompleksov v ASU TP AES. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost, 2016, No. 3, pp. 70–76.
7. Popov D. I. Analiz tsifrovyykh sistem obrabotki signalov. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Tekhnicheskie nauki, 2016, No. 2(18), pp. 83–92.
8. Sytnikov V. S., Stupen P. V., Piven B. O. Vplyv osoblyvostei kaskadiv tsifrovogo filtru vysokogo poriyadku na vykhidnyi shum kvantovannya, *Elektrotekhnicheskie i kompiuternye sistemy*, 2013, No. 9(85), pp. 97–101.
9. Dzhigan, V. Adaptivnye filtry i ikh prilozheniya v radio-tekhnikе i svyazi, *Sovremennaya elektronika*, 2013, No. 9, pp. 56–63.
10. Dorf R. C., Bishop R. H. Modern Control Systems. Prentice Hall, NJ 07458, 2001, 832 p.
11. Besekerskii V. A., Popov E. P. Teoriya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya. Moscow, Nauka, 1975, 768 p.
12. Kuznetsov B.I., Sergeev V.E., Chernyshev V.M. Mikroprotsechnoe upravlenie mnogokanalnyimi sistemami vysokoi tochnosti. Kiev, Tekhnika, 1990, 208 p.
13. Ivanov B. A., Yushchenko A. S. Teoriya diskretnykh sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, Nauka, 1983, 336 p.
14. Kuo B. C. Digital Control Systems. Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980, 448 p.
15. Iserman R. Digital Control Systems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. York, 1981, 541p.
16. Anderson B.D.O., Bitmead R. R., Johnson C. R. Stability of Adaptive Systems: passivity and averaging analysis. The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 1986, 263 p.
17. Schulze K-P, Rehberg K-J. Entwurf von adaptiven Systemen Eine Darstellung fur Ingenieure. Veb Verlag Technik, Berlin, 1990, 448 p.
18. Prikladnye matematicheskie metody analiza v radiotekhnike Ed. by G. V. Obrezkova. Moscow, Vyssh. Shk., 1985, 343 p.
19. Ed. by K. P. Pupkova, N. D. Egupova Metody klassicheskoi i sovremennoi teorii avtomaticheskogo upravleniya. Matematicheskie modeli, dinamicheskie kharakteristiki i analiz sistem avtomaticheskogo upravleniya. Moscow, Izd-vo MGTUim. N.E. Bauman, 2004, 654 p.
20. Zhuravlev A. Yu, Pavlov A. V., Zhurba V. O. Metodika povysheniya obshchei ustoychivosti i korrektsii pryamykh pokazatelei kachestva perekhodnykh protsessov v tsifrovyykh sistemakh upravleniya, *Kompressionnoe i energeticheskoe mashinostroenie*, 2012, No. 1, pp. 36–40.
21. Kisel A. G., Sitnikov V. S., Ukhina A. V. Analiz dlitelnosti perekhodnogo protsessa pri nenulevykh nachalnykh usloviyakh. *Problemy informatyky ta kompiuternoi tekhniki*, 2017, pp. 100–102.
22. Ukhina A. V., Sitnikov V. S., Sitnikova V. A. Primenenie komponentov spetsializirovannykh sistem pri provedenii eksperimentalnykh medikobiologicheskikh issledovaniy. «Datchyky, prylady ta systemy-2017», 2017, pp. 39–41.

Received 19.02.2018.
Accepted 03.04.2018.

УДК 004.052

ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС У ЦИФРОВИХ ЧАСТОТНО-ЗАЛЕЖНИХ КОМПОНЕНТАХ НИЗЬКОГО ПОРЯДКУ

Ухіна Г. В. – аспірант кафедри «Комп'ютерні системи» Інституту комп'ютерних систем Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна.

Ситніков В. С. – д-р техн. наук, професор кафедри «Комп'ютерні системи» Одеського національного політехнічного університету, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. При побудові спеціалізованих і програмованих мобільних систем виникає завдання перебудови системи, коли порушуються умови функціонування системи через зміни поєднано-сигнального оточення або умов роботи системи.

Будь-яка перебудова цифрових частотно-залежних компонент системи призводить до виникнення в системі перехідного процесу, тривалість якого визначається характеристиками компонент. Традиційний підхід до аналізу перехідного процесу здійснюється при нульових початкових умовах, однак робота інтелектуальних датчиків, спеціалізованих комп'ютерних систем і перебудова параметрів може здійснюватися при ненульових початкових умовах. Це призводить до необхідності великого числа обчислень, що іноді не можливо у реальному масштабі часу. У цих умовах необхідно оцінити тривалість перехідного процесу до процесу перебудови, щоб забезпечити роботу системи до нової перебудови.

Ціль. Оцінити максимальну тривалість перехідного процесу, визначити діапазон і ширину можливих перебудов з урахуванням забезпечення стійкості системи.

Метод. У роботі вдосконалено непрямий метод оцінки тривалості перехідного процесу по полюсах передавальної функції за рахунок спрощення розкладання іраціональної функції.

Результати. Проведений аналіз, моделювання і теоретична перевірка дозволили отримати співвідношення для оцінки максимальної тривалості перехідного процесу, визначити діапазон і ширину можливих перебудов з урахуванням забезпечення стійкості системи. Знайдена залежність виду перехідного процесу від відносної частоти зрізу. Побудовано залежності тривалості перехідного процесу від відносної частоти зрізу. Спрощено представлення співвідношення для визначення тривалості перехідного процесу за рахунок розкладання в ступеневий ряд.

Висновки. Отримані результати дозволяють оцінити верхню межу тривалості перехідного процесу, можливості компоненти спеціалізованої комп'ютерної системи при зміні параметрів, при цьому забезпечивши її стійкість. Результати застосовують при проектуванні мікропроцесорних компонент комп'ютерних систем.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: фільтрація, інтелектуальні датчики, аналіз тривалості перехідного процесу, перебудова параметрів фільтру.

УДК 004.052

ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС В ЦИФРОВЫХ ЧАСТОТНО-ЗАВИСИМЫХ КОМПОНЕНТАХ НИЗКОГО ПОРЯДКА

Ухина А. В. – аспирант кафедры «Компьютерные системы» Института компьютерных систем Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина.

Ситников В. С. – д-р техн. наук, профессор кафедры «Компьютерные системы» Одесского национального политехнического университета, Одесса, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. При построении специализированных и программируемых мобильных систем возникает задача перестройки системы, когда нарушаются условия функционирования системы из-за изменения помехо-сигнальной обстановки или условий работы системы. Любая перестройка цифровых частотно-зависимых компонент системы приводит к возникновению в переходного процесса, длительность которого определяется характеристиками компонент. Традиционный подход к анализу переходного процесса осуществляется при нулевых начальных условиях, однако работа интеллектуальных датчиков специализированных компьютерных систем и перестройка параметров, а также других компонент системы может осуществляться при ненулевых начальных условиях. Это приводит к необходимости большого числа вычислений, что иногда не осуществимо в реальном масштабе времени. В этих условия необходимо оценить длительность переходного процесса до процесса перестройки, чтобы обеспечить работу системы в новых условиях.

Цель. Оценить максимальную длительность переходного процесса при перестройке, определить диапазон и ширину возможных перестроек с учетом обеспечения устойчивости системы.

Метод. В работе усовершенствован косвенный метод оценки длительности переходного процесса по полюсам передаточной функции за счет упрощения разложения иррациональной функции.

Результаты. Проведенные анализ и моделирование позволили получить соотношения для оценки максимальной длительности переходного процесса, определить диапазон и ширину возможных перестроек с учетом обеспечения устойчивости системы. Построены зависимости длительности переходного процесса от относительной частоты среза. Упрощено представление соотношения для определения длительности переходного процесса за счет разложения в степенной ряд.

Выводы. Полученные результаты позволяют оценить верхнюю границу длительности переходного процесса, за счет усовершенствования косвенного метода оценки длительности переходного процесса по полюсам передаточной функции при упрощении разложения иррациональной функции, что дает возможность до начала перестройки при заданной новой относительной частоте среза и порядке компоненты дать прогноз об устойчивости компоненты после перестройки. С практической точки зрения это сокращает объем вычислений и за счет прогноза повышает эффективность работы системы и компоненты специализированной компьютерной системы при заданных критериях качества работы. Результаты применимы при проектировании микропроцессорных компонент компьютерных систем.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фильтрация, интеллектуальные датчики, анализ длительности переходного процесса, перестройка параметров фильтра.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Борисова Л. Ф. Методы анализа и расчета переходных процессов в электрических цепях / Л. Ф. Борисова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 6. – С. 113–114.
2. Бородинский И. М. Применение рекурсивных КИХ-фильтров для подавления помех при автоматическом контроле сопротивления изоляции / И. М. Бородинский, И. И. Турулин // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2016. – № 10 (183). – С. 99–110.
3. Войтович И. Д. Интеллектуальные сенсоры / И. Д. Войтович, В. М. Корсунский – М. : Интернет-Университет

- Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 624 с.
4. Tuzlukov V. Signal Processing in Radar Systems / V. Tuzlukov. – CRC Press, 2013. – 596 p.
 5. Kocon S., Piskorowski J. Digital finite impulse response notch filter with non-zero initial conditions, based on an infinite impulse response prototype filter / S. Kocon, J. Piskorowski // ASC Publications Anal. Chem. – 2014. – 86. – P. 3508–3516. dx.doi.org/10.1021/ac404150d
 6. Ухина А.В. Повышение эффективности программно-технических комплексов в АСУ ТП АЭС / А. В. Ухина, А. А. Биленко, В. С. Ситников // Ядерная и радиационная безопасность – 2016. – № 3. – С. 70–76.
 7. Попов Д. И. Анализ цифровых систем обработки сигналов / Д. И. Попов // Известия высших учебных заведений. Технические науки. – 2016. – №2 (38). – С. 83–92.
 8. Ситніков В. С. Вплив особливостей каскадів цифрового фільтру високого порядку на вихідний шум квантування / В. С. Ситніков, П. В. Ступень, Б. О. Півень // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2013. – №9(85). – С. 97–101.
 9. Джиган В. Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы / В. Джиган. – М. : Техносфера, 2013. – 528 с.
 10. Dorf R.C., Bishop R.H. Modern Control Systems / R. C. Dorf, R. H. Bishop. – Prentice Hall, NJ 07458, 2001. – 832 p.
 11. Бесекерский В. А. Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. – М. : Наука, 1975 – 768 с.
 12. Кузнецов Б. И. Микропроцессорное управление многоканальными системами высокой точности / Б. И. Кузнецов, В. Е. Сергеев, В. М. Чернышев. – К. : Техніка, 1990. – 208 с.
 13. Иванов В. А. Теория дискретных систем автоматического управления / В. А. Иванов, А. С. Ющенко. – М. : Наука, 1983. – 336 с.
 14. Kuo B. C. Digital Control Systems / B. C. Kuo. – Holt, Rinehart and Winston, Inc., 1980. – 448 p.
 15. Iserman R. Digital Control Systems / R. Iserman. – Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, N. York, 1981. – 541 p.
 16. Anderson B.D.O., Bitmead R.R., Johnson C.R. Stability of Adaptive Systems: passivity and averaging analysis / B.D.O. Anderson, R. R. Bitmead, C. R. Johnson. – The MIT Press Cambridge, Massachusetts, London, England, 1986. – 263 p.
 17. Schulze K-P., Rehberg K-J. Entwurf von adaptiven Systemen Eine Darstellung für Ingenieure / K-P. Schulze, K-J. Rehberg. – Veb Verlag Technik, Berlin, 1990. – 448 p.
 18. Прикладные математические методы анализа в радиотехнике – Под ред. Г. В. Обрезкова. – М. : Высш. Шк., 1985. – 343 с.
 19. Методы классической и современной теории автоматического управления. Т.1. Математические модели, динамические характеристики и анализ систем автоматического управления / Под ред. К. П. Пупкова, Н. Д. Егупова – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 654 с.
 20. Журавлев А. Ю. Методика повышения общей устойчивости и коррекции прямых показателей качества переходных процессов в цифровых системах управления / А. Ю. Журавлев, А. В. Павлов, В. О. Журба // Компрессионное и энергетическое машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 36–40.
 21. Кисель А. Г. Анализ длительности переходного процесса при ненулевых начальных условиях / А. Г. Кисель, В. С. Ситников, А. В. Ухина // «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (ПІКТ-2017). Праці VI Міжнар. наук.-практ. конф. (Чернівці, Україна, жовтень 5–8, 2017). – С. 100–102.
 22. Ухина А. В. Применение компонентов специализированных систем при проведении экспериментальных медико-биологических исследований / А. В. Ухина, В. С. Ситников, В. А. Ситникова // «Датчики, прилади та системи-2017». Тези VI Міжнар. наук.-техн. конф. (Черкаси-Миколаїв-Херсон-Лазурне, Україна, вересень 18–22, 2017). – С. 39–41.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 004.042:004.94

STRUCTURAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF IDEF0 FUNCTIONAL BUSINESS PROCESS MODELS

Godlevskiy M. D. – Dr. Sc., Professor, Head of the department of Software Engineering and Management Information Technologies, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine.

Orlovskiy D. L. – PhD, Associate professor, Associate professor of the department of Software Engineering and Management Information Technologies, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine.

Kopp A. M. – Post-graduate student of the Department of Software Engineering and Management Information Technologies, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. A relevant problem of an approach development used to reduce system or random errors which occur during business process models design is solved. The object of the research includes graphical and mathematical models which describe business process structure.

Objective. Minimization of systematic or random errors based on the development of an approach to formation and analysis of a business process structure in IDEF0 notation.

Method. The approach to formation and analysis of a business processes structure in IDEF0 notation is proposed. Balancing coefficient, which was modified and augmented, considering weight coefficients of arcs of various types, is used for IDEF0 diagrams analysis. Cohesion types defined in the ISO/IEC/IEEE 2476 standard, which weight coefficients are calculated using their values normalization, are used to define values of arc weight coefficients.

Results. The approach to IDEF0 diagrams analysis, which allows defining structural changes of diagrams to satisfy balancing requirements, has been developed. Recommendations obtained as a result of IDEF0 diagrams analysis, which describe product purchase and software release processes, and also recommendations of DevOps concept and SCOR supply chain reference model have been used to transform the source diagrams according to the balancing requirements. Further research may consider using of expert judgments for making decisions on recommendations development.

Conclusions. The proposed approach can be used to support activities of collecting, storing, and sharing organizational knowledge allowing to analyze and improve business process models before they are added into an enterprise repository for future reuse to design new solutions. Next studies will consider various approaches to business process models representation in an enterprise repository, corresponding to Archimate, ARIS, and other notations.

KEYWORDS: business process, modeling, IDEF0 diagram, business process model analysis, balancing, cohesion.

ABBREVIATIONS

ARIS is an Architecture of Integrated Information Systems;

DFD is a Data Flow Diagram;

RUP is a Rational Unified Process;

SCOR is a Supply Chain Operations Reference.

NOMENCLATURE

A_i is a number of arcs related to the i -th block of IDEF0 diagram, $i = \overline{1, n}$;

B is an optimization criterion that represents balancing coefficient that considers weights of arcs of various types, as well as tunneled arcs usage;

© Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M, 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-6

D is a matrix of $n \times m$ size, which elements d_{ij} represent a number of arcs of the j -th type related to the i -th block of diagram, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$;

ΔD is a matrix of $n \times m$ size, which elements Δd_{ij} represent changes within a number of arcs of the j -th type related to the i -th block of diagram, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$;

$\Delta D_{\min}$ is a matrix of $n \times m$ size, which elements represent lower boundaries of elements of the matrix ΔD ;

$\Delta D_{\max}$ is a matrix of $n \times m$ size, which elements represent upper boundaries of elements of the matrix ΔD ;

K_b is a balancing coefficient;

m is a number of arc types (input, output, control, mechanism, and call), $m = 5$;
 n is a number of blocks on the IDEF0 diagram;
 T is a matrix of $n \times (m-1)$ size, which elements t_{ij} represent a number of tunneled arcs of the j -th type related to the i -th block of diagram, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m-1}$;
 w_{ij} is a weight coefficient of the arc of j -th type, which is related to the i -th block of diagram, $w_{ij} \in [0, 1]$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$;
 λ is a tunneling coefficient, $\lambda \in [0, 1]$;
 μ_l is a weight coefficient of the l -th cohesion type, $l = \overline{0, 6}$.

INTRODUCTION

Today process approach is extremely popular management approach. It assumes considering an organization as a set of business processes that produce value for customers. Business process might be described as a set of activities that takes one or several types of resources at the “input” and produce a product that is valuable for a customer at the “output” [1].

Graphical models of business processes were widely disseminated in the modern practice of organizational management. There were developed and successfully used various notations and modeling tools intended to create business process models. This paper considers the methodology of functional modeling and graphical notation IDEF0 [2]. It is focused on the development, analysis, reengineering, and integration of information systems as well as supported business processes. Business modeling is one of the core processes of the RUP software development methodology [3, 4].

Business process modeling, including usage of the IDEF0 notation, is a subjective activity that might cause random or systematic errors related to the analyst’s individual perception, the lack of domain research, etc. At the same time, modeling tools provide only formal validation of developed diagrams especially by checking only the syntax compliance according to the certain modeling notation.

The object of study includes graphical and mathematical models that describe business process structure.

The subject of study is development of an approach to decrease a number of random or systematic errors occurred during business process modeling.

The purpose of the work is minimization of a number of systematic or random errors which are based on the development of an approach to formation and analysis of a business process structure in IDEF0 notation.

1 PROBLEM STATEMENT

The considered problem assumes business process models described using IDEF0 diagrams as the input data. IDEF0 shows logical relations between functional blocks (business processes, sub-processes, tasks) which are represented by arcs of five types: input, output, control,

mechanism, and call (fig. 1). Particularly, the call arc illustrates relations between blocks (or even between parts of models) across different models and provides connection between models or different parts of the same model.

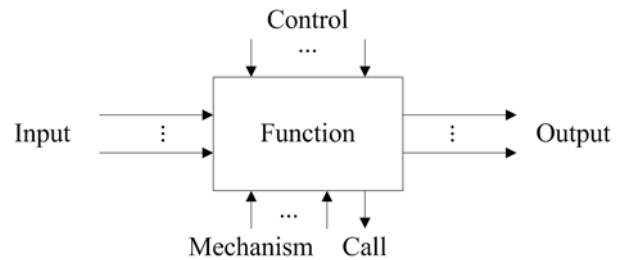


Figure 1 – Connection of arcs to blocks on IDEF0 diagrams

The earlier known balancing coefficient is used to analyze structure of IDEF0 diagrams [5, 6]:

$$K_b = \left| \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i - \max_{i=1, n} \{A_i\} \right|.$$

However using of the balancing coefficient provides only common estimation of IDEF0 diagrams but does not allow analyzing their balancing in terms of various impacts (input, output, control, mechanism, and call) on diagram’s blocks. This might be considered as the significant shortcoming of the approach.

Hence, it’s important to develop criterion and restrictions that allow forming recommendations in order to design optimal structure of business process models using the IDEF0 notation.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Besides graphical business process models widely used in the modern practice of the organizational management, the well-known and powerful analytical tool has existed for a long time. Petri nets are used in the area of discrete systems research. Since business processes belong to this class of systems, it is possible to analyze those using Petri nets [7].

In order to apply modeling features of Petri nets, business process models should be transformed into the corresponding nets [8]. Earlier Petri nets were used to analyze business process models in the IDEF0 notation [9]. But analysis of business process models in the IDEF0 notation requires transformation of these models into Petri nets which causes difficulties related to the various types of IDEF0 diagrams arcs related to the diagrams blocks according to the certain rules (fig. 1).

Proper design of IDEF0 diagrams requires achieving the value of balancing coefficient which is close to 0 and decreasing when the decomposition level is increasing [5]. IDEF0 diagrams should be balanced which means that situations when numbers of arcs connected to various blocks are significantly different are not allowed [6]. These situations usually indicate errors related to the design and execution of business process [5].

Thus, balancing analysis of IDEF0 diagram should consider cohesion types of functional blocks [10, 11]. The

cohesion types defined in the ISO/IEC/IEEE 2476 standard (table 1) are used to analyze IDEF0 diagrams and data flow diagrams DFD for the functional and data cohesion respectively [10]. Earlier the balancing coefficient that considers various cohesion types was used to analyze data flow diagrams [12].

Hierarchical relations within the units of business system called “silos” are typical for the functional management approach. Such functional areas cause isolation of processes and, therefore, resources involved in the process executions [13]. Cohesion types with levels 4–6 are the most important to obtain diagrams of good quality (table 1). Developers should achieve a maximum number of relations of these types [10, 11]. Cohesion types with levels 0–3 indicate that relations between blocks are weak or do not exist at all (table 1) [11]. In this case direct relations between organizational units (departments, manufacturing, branches, etc.) almost do not exist which means that “silos” exist in an organization. These shortcomings might be eliminated by implementing process management features that assumes creation of the direct relations between business processes [13].

IDEF0 notation assumes domain modeling as the hierarchical system of diagrams. This hierarchy could be obtained as the result of decomposition of the functional block and, therefore, the so called child diagram is obtained. In case when several arcs don't need to be considered on the parent and/or child diagram, IDEF0 diagram feature called tunneling might be used [2]. There might be situations when some interface arcs do not need to be considered in child diagrams lower or upper than certain decomposition level within a hierarchy. On the other hand, it might be necessary to hide detailing of some “conceptual” interface arcs below certain threshold. The arrow marked as the tunnel near the block means that data associated with this arc are not necessary to be considered on the next level of decomposition. The arrow marked as the tunnel near the borderline means that data associated with this arc does not exist on the parent diagram (fig. 2) [14].

Arcs I2 and C2 of the parent diagram A1 do not exist on the child diagram A12. An output O2 of the child diagram A12 is not related to the parent block and does not exist on the diagram A1 (fig. 2). Analysis of IDEF0 diagrams requires considering various types of impacts on the diagram blocks, as well as considering presence of the tunneled arcs.

Table 1 – Cohesion types of IDEF0 diagrams blocks

Cohesion type	Level, l	Description
Coincidental	0	Blocks aren't related at all
Logical	1	Blocks of diagrams of various decomposition levels
Temporal	2	Blocks of diagrams of the same decomposition level
Procedural	3	Blocks of the same diagram
Communicational	4	Blocks have common inputs, outputs or mechanisms
Sequential	5	Output of the preceding block is the input of the subsequent
Functional	6	Output of the preceding block is the control of the subsequent

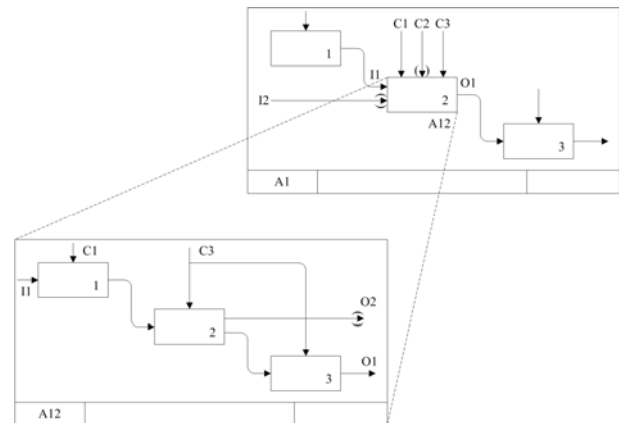


Figure 2 – Example of tunnel arcs on IDEF0 diagrams

As the result of the literature review we summarized that existing formal approaches [5, 6–9] does not provide solutions of the considered problem. Therefore, this study should be focused on the development of the approach to formation and analysis of a business process structure in IDEF0 notation.

3 MATERIALS AND METHODS

Some diagrams might not fit the recommendation of the minimum value achievement of balancing coefficient because of features of business processes these diagrams describe (e.g., manufacturing process consumes a lot of components and produces one product) [5]. The weight coefficient of arcs related to the diagram blocks should be considered in order to resolve this problem. This allows considering roles of each arc within the described business process execution.

The weight coefficients of arcs w_{ij} are proposed to be defined using cohesion types (tab. 1). The weights of cohesion types μ_l should be calculated using normalization of their levels that increase from the coincidental (0) to functional type (1) according to the ISO/IEC/IEEE 24765 standard [10]:

$$\mu_l = \frac{l}{\max_{l=0,6}\{l\}}, l = \overline{0,6}.$$

Hence, the weight coefficients of arcs w_{ij} of the IDEF0 diagram will take various values μ_l according to the chosen cohesion type (tab. 1). This study does not consider problems related to selection and explanation of expert judgment methods (e.g., Saaty's pairwise comparison) used to define weights of cohesion types. This might be a subject of future research.

The integer matrix D represents the number of arcs of various types, which are related to the IDEF0 diagram blocks. The matrix ΔD represents structural changes that allow obtaining the IDEF0 diagram suitable for balancing requirements. The elements Δd_{ij} of this matrix are also integer values. The upper and lower boundaries of values that represent changes within numbers of arcs of various types, which related to the IDEF0 diagram blocks, are represented using matrices $\Delta D_{\min}$ and $\Delta D_{\max}$. Moreover, there are restrictions that each IDEF0 diagram block might be connected to at least one arc of each type except call.

The following optimization problem allows obtaining required structural changes ΔD that will provide the minimum value of balancing coefficient:

$$B = \left| \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} w_{ij} \cdot (d_{ij} + \Delta d_{ij} - \lambda \cdot t_{ij}) + w_{im} \cdot (d_{im} + \Delta d_{im}) - \max_{i=1, n} \left\{ \sum_{j=1}^{m-1} w_{ij} \cdot (d_{ij} + \Delta d_{ij} - \lambda \cdot t_{ij}) + w_{im} \cdot (d_{im} + \Delta d_{im}) \right\} \right| \rightarrow \min_{\{\Delta d_{ij}\}},$$

$$d_{ij} + \Delta d_{ij} > 0, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m},$$

$$\Delta D_{\min} \leq \Delta D \leq \Delta D_{\max}.$$

The optimization criterion B represents the balancing coefficient that considers weight coefficients of arcs of various types, which are related to the IDEF0 diagram blocks, as well as possibility of tunneled arcs usage.

The tunneling coefficient λ might be defined using the following equation:

$$\lambda = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} t_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} (d_{ij} + \Delta d_{ij})}.$$

The value $\lambda = 1$ indicates that the IDEF0 diagram does not contain tunneled arcs, while value $\lambda = 0$ indicates that the IDEF0 diagram contains only tunneled arcs.

4 EXPERIMENTS

IDEF0 notation might be used for business process modeling in various areas. Further design and analysis of IDEF0 diagrams is outlined as an example. The example includes a sample pair of business processes related to the software release and product purchase respectively.

The following IDEF0 diagram (fig. 3) describes business processes of the software release.

The number of blocks on this diagram is $n^1 = 5$. The matrix of the numbers of arcs related to the IDEF0 diagram blocks as well as restrictions matrices are following:

$$D^1 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 1 & 3 & 0 \\ 4 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \Delta D_{\min}^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Delta D_{\max}^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Since the IDEF0 diagram (fig. 3) does not contain tunneled arcs, matrix of tunneled arcs T^1 is zero-matrix.

The next considered IDEF0 diagram describes product purchase processes (fig. 4).

The number of blocks on this diagram is $n^2 = 4$. The matrix of the numbers of arcs related to the IDEF0 diagram blocks, as well as restrictions matrices, and matrix of the number of tunneled arcs are following:

$$D^2 = \begin{pmatrix} 4 & 1 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 2 & 0 \end{pmatrix}, \Delta D_{\min}^2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$\Delta D_{\max}^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, T^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

5 RESULTS

Calculated for the considered IDEF0 diagrams values $K_b^1 = 1$ and $K_b^2 = 2$ do not correspond to balancing requirements. It is necessary to define structural changes that will provide minimum values of the balancing coefficient K_b and optimization criterion B based on the solution of proposed optimization problem.

The weights μ_l that were calculated using the cohesion types levels (tab. 1) [10] are shown in table 2.

Table 2 – Weights of cohesion types

l	0	1	2	3	4	5	6
μ_l	0	0,17	0,33	0,5	0,67	0,83	1

The weight coefficients of arcs w_{ij}^1 , w_{ij}^2 related to blocks of the considered IDEF0 diagrams were selected from the set of the obtained weights μ_l based on the considered cohesion types (tab. 1):

1) input and output arcs correspond to the sequential cohesion (they connect output of the preceding block with the input of the subsequent):

$$w_{i1}^1 = w_{i2}^1 = \mu_5 = 0,83, i = \overline{1, n^1},$$

$$w_{j1}^2 = w_{j2}^2 = \mu_5 = 0,83, j = \overline{1, n^2};$$

2) control arcs correspond to the procedural cohesion (they impact on the blocks of the same diagram):

$$w_{i3}^1 = \mu_3 = 0,5, i = \overline{1, n^1}, w_{j3}^2 = \mu_3 = 0,5, j = \overline{1, n^2};$$

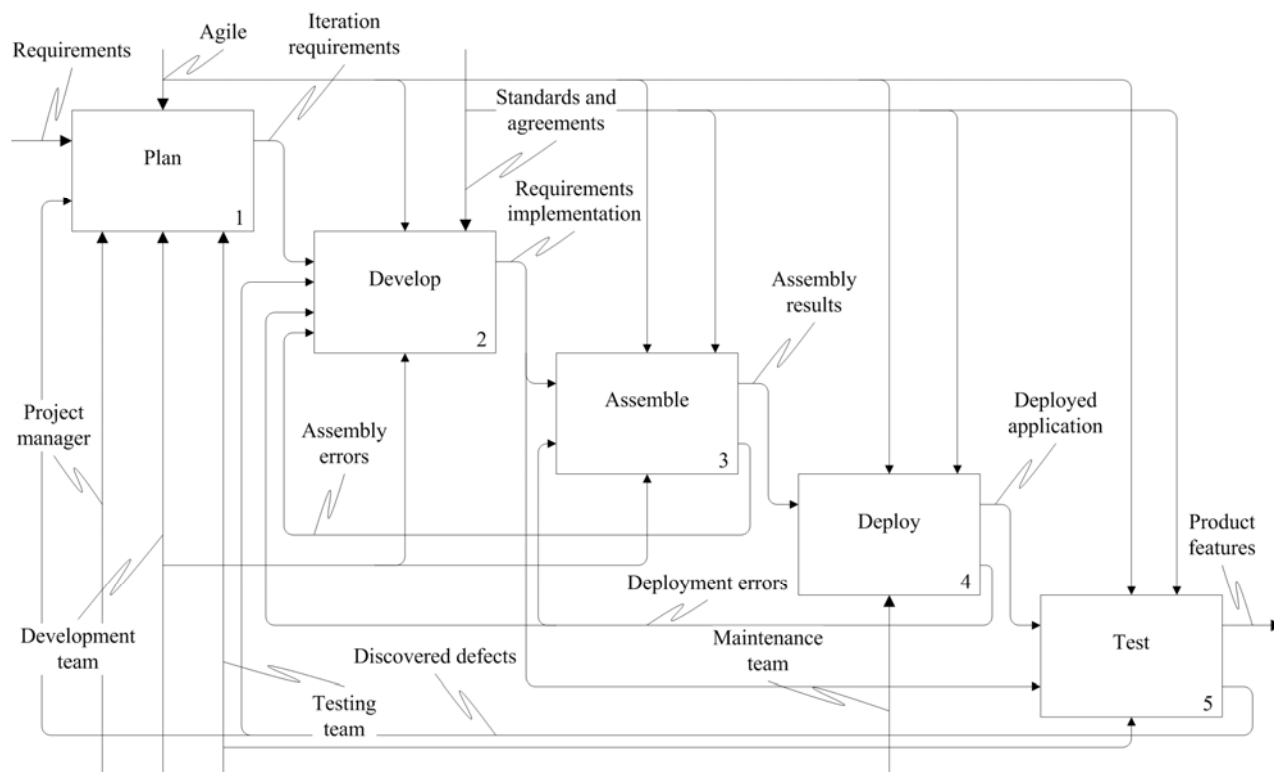


Figure 3 – Original diagram that describes software release processes

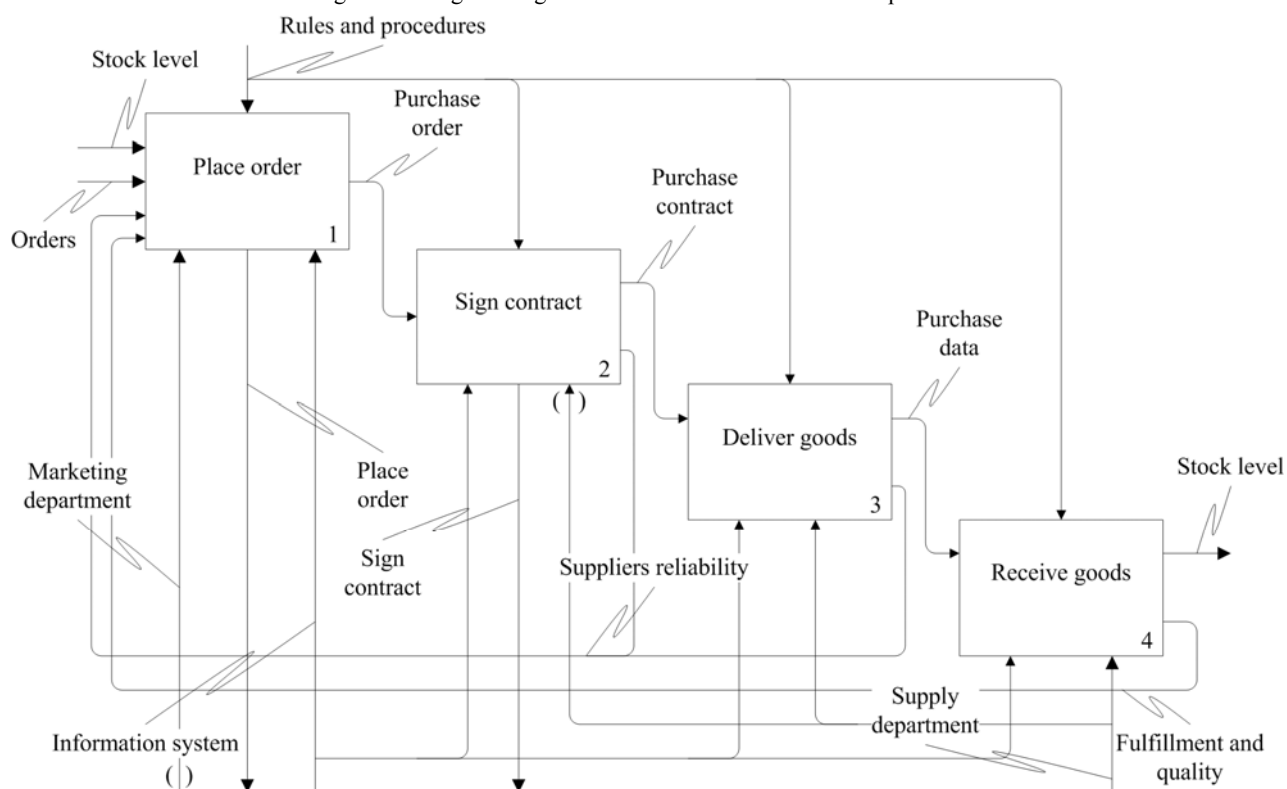


Figure 4 – Original diagram that describes product purchase processes

3) mechanism arcs correspond to the communicational cohesion (they are common for the blocks):

$$w_{i4}^1 = \mu_4 = 0,67, \quad i = \overline{1, n^1}, \quad w_{j4}^2 = \mu_4 = 0,67, \quad j = \overline{1, n^2};$$

4) call arcs correspond to the logical cohesion (they are related to the blocks of different model):

$$w_{j5}^2 = \mu_1 = 0,17, \quad j = \overline{1, n^2}.$$

As the result of optimization problem solution, the following values of balancing coefficients of the considered IDEF0 diagrams were obtained (tabl. 3).

Table 3 – Balancing coefficients values

Coefficient	Description	Diagram 1	Diagram 2
Balancing coefficient K_b	Before transformation	1	2
	After transformation	0	0,5
Optimization criterion B	Before transformation	0,83	1,03
	After transformation	0,17	0,15

Calculations were performed using Microsoft Excel tool “Solver”. Since a number of blocks on the diagrams according to the IDEF0 standard might be from 3 to 6, the size of proposed optimization problem allows performing calculations using Microsoft Excel.

The matrix of structural changes and the matrix of numbers of arcs connected to the blocks of IDEF0 diagram that describes software release processes are the following:

$$\Delta D^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D^1 + \Delta D^1 = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 2 & 4 & 0 \\ 4 & 1 & 3 & 1 & 0 \\ 2 & 2 & 3 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 2 & 3 & 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

The matrix of structural changes and matrix of numbers of arcs connected to the blocks of IDEF0 diagram that describes product purchase processes are the following:

$$\Delta D^2 = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad D^2 + \Delta D^2 = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 0 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

6 DISCUSSION

The DevOps concept allows development, testing, and maintenance units to implement current business requirements of the continuous software release by organizing interaction of these groups [15]. The implementation of the process management features according to the DevOps concept and obtained recommendations related to the structural changes ΔD^1 allowed obtaining the following IDEF0 diagram (fig. 5).

For example, the original IDEF0 diagram (fig. 3) contains planning, development, and assembly processes that were related to the deployment process only because they were executed during the same software release iteration which corresponds to the procedural cohesion. Now the transformed diagram (fig. 5) contains these processes related because they are executed by the same resources (DevOps team) which corresponds to the communicational cohesion. This improvement eliminates functional areas called “silos” that are typical for the functional management approach.

The obtained recommendations related to the structural changes ΔD^2 , as well as the recommendations of the supply-chain reference model SCOR (processes, best practices, metrics, etc.) allowed obtaining the following IDEF0 diagram (fig. 6) [16].

The sample calculations required to check the validity of the proposed approach were performed for the IDEF0 diagrams that describe business processes of various domains – software release and product purchase. The considered IDEF0 diagrams were developed using the trial-version of Erwin Process Modeler.

Unlike the reviewed formal approaches [5, 6-9], the proposed approach allows analyzing balancing of IDEF0 diagrams in terms of various types of impacts and presence of tunneled arcs as well as defining structural changes that provide IDEF0 diagrams suitable for the balancing requirements [10, 11].

The shortcomings of the proposed approach are complexity of the considered optimization problem at big size (for hierarchical system of diagrams) and high requirements for business analyst’s skills (deep knowledge of the IDEF0 methodology).

CONCLUSIONS

In this paper we proposed an approach to formation and analysis of a business process structure in IDEF0 notation.

The scientific novelty of the obtained results is that the earlier known approach based on the use of the balancing coefficient of IDEF0 diagrams was modified and augmented with considering the weights coefficients of arcs of various types. In order to calculate the values of these coefficients the cohesion types defined in the ISO/IEC/IEEE 24765 standard are used. The weights of these types are calculated using normalization of their levels. The approach to analysis of IDEF0 diagrams allows defining structural changes in which diagrams will fulfill balancing requirements.

The practical significance of the achieved outcomes is that the recommendations obtained as the result of analysis of IDEF0 diagrams, which describe product purchase and software release processes, as well as the recommendations of the DevOps concept and supply-chain operations reference model SCOR, allowed transforming original IDEF0 diagrams according to the balancing requirements.

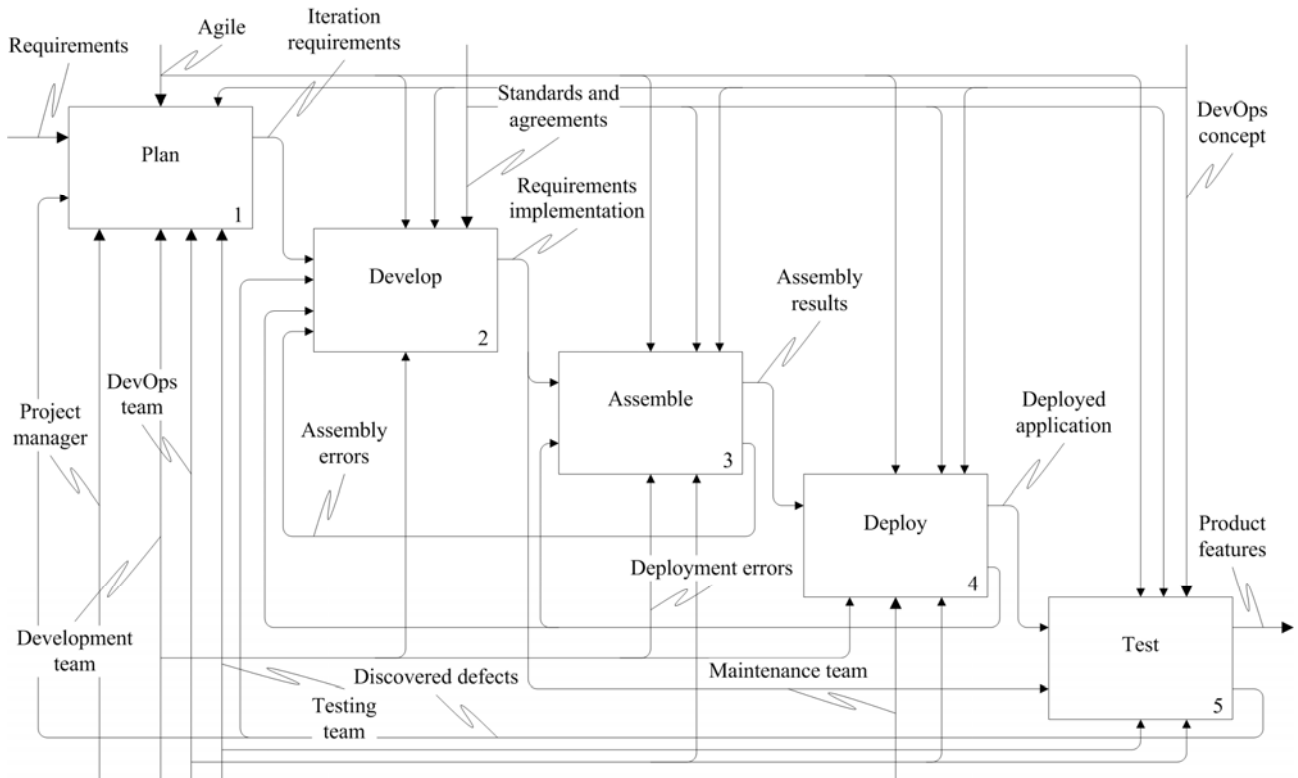


Figure 5 – Transformed diagram that describes software release processes

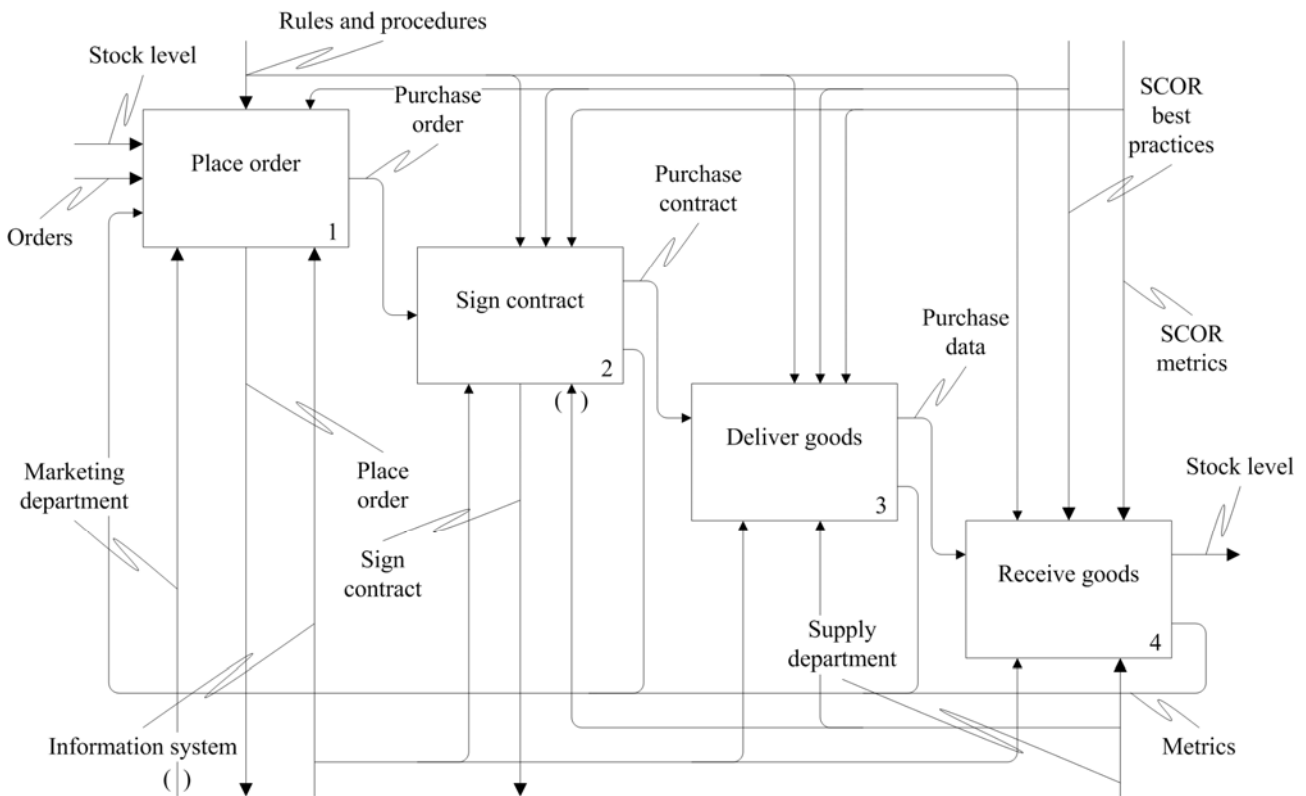


Figure 6 – Transformed diagram that describes product purchase processes

The proposed approach might be used to support activities related to storing and sharing of the organizational knowledge by supporting analysis and enhancement of
© Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M, 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-6

business process models before they are stored into the enterprise repository for their future reusing to create new solutions.

Prospects for further research include considering the use of expert judgments related to the selection and explanation of the cohesion types scale, as well as to definition of arcs weight coefficients for making decisions on recommendations development. Various approaches to presentation of business process models within the enterprise repository using Archimate, ARIS, and other notations will be also considered in future work.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work is performed during the dissertational research “Models and information technologies of the process approach to management of business structures of an enterprise” in the post-graduate course at National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” in the 122 “Computer science” specialty. The research results are also used within the training process in “Design of information systems” course for bachelor students in 122 “Computer science” specialty.

REFERENCES

1. Hammer M., Champy J. Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution. Zondervan, 2009, 272 p.
2. IDEF0 : Integration Definition for Function Modeling. [Effective from 1993-12-21]. Gaithersburg. National Institute of Standards and Technology, 1993, 128 p.
3. Shuja A. K., Krebs J. RUP Reference and Certification Guide [Text]. Pearson Education, 2007, 336 p.
4. Grover V., Kettinger W. J. Process think: winning perspectives for business change in the information age. IGI Global, 2000, 399 p.
5. Zamiatina O. M. Modelirovanie sistem: uchebnoe posobie. Tomsk, Izd-vo TPU, 2009, 204 p.
6. SADT methodology: Structured Analysis and Design Techniques [Electronic resource]. Access mode: http://apex.tpu.ru/ap/RRPFO.MATERIAL?p_id=5396&type_file=2.
7. van der Aalst W. M. P., Stahl C. Modeling Business Processes-A Petri Net-Oriented Approach. Cooperative Information Systems series, MIT Press, 2011, Vol. 61, P. 62.
8. Dorner M. G. Algoritm preobrazovanja modela biznes-procesov v odnoveketnye seti Petri, *Modelirovanie i analiz informacionnyh sistem*, 2010, Vol. 17, No. 2, pp. 5–16.
9. Kopp A. M., Orlovskiy D. L. Ob odnom podhode k resheniju zadachi optimizacii struktury biznes-procesov predpriyatija [Tekst], *Visnyk NTU «HPI». Seriya: Systemnyj analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii*, 2015, No. 58, pp. 102–108.
10. Systems and software engineering. Vocabulary. ISO/IEC/IEEE 24765:2010. [Effective from 2010-12-15]. Geneva, ISO, 2010, 418 p.
11. McConnell S. Code complete, Pearson Education, 2004, 960 p.
12. Kopp A., Orlovskiy D. Razrabotka podhoda k analizu i optimizacii diagramm potokov dannyh, *ScienceRise*, 2017, Vol. 7, pp. 33–42. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.107048.
13. Mamonov V. I., Saharov I. V. Algoritm formirovanija organizacionnoj struktury na osnove sistemy biznes-procesov predpriyatija, *Nauchnyj vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2008, No. 4, pp. 27–42.
14. Smith D. K. 10.2.2 IDEF0 Lessons Learned, *INCOSE International Symposium*, 2006, Vol. 16, No. 1, pp. 1382–1395. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2006.tb02820.x
15. Bass L., Weber I., Zhu L. DevOps: A Software Architect's Perspective. Addison-Wesley Professional, 2015, 352 p.
16. McCormack K. P., Johnson W. C. Supply chain networks and business process orientation: advanced strategies and best practices. CRC Press, 2016, 240 p.

Article was submitted 25.05.2018.
After revision 12.06.2018.

УДК 004.042:004.94

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ IDEF0-МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

Годлевський М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Орловський Д. Л. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Копп А. М. – аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено актуальну задачу розробки методу, який дозволяє знизити кількість системних або випадкових помилок, що виникають під час побудови моделей бізнес-процесів. Об'єктом дослідження є графічні та математичні моделі, які відображають структуру бізнес-процесів. Мета роботи – мінімізація системних або випадкових помилок на основі розробки методу формування та аналізу структури бізнес-процесів в нотатії IDEF0.

Метод. Запропоновано метод формування та аналізу структури бізнес-процесів в нотатії IDEF0. Для аналізу діаграм IDEF0 використовується коефіцієнт збалансованості, який було модифіковано та доповнено з урахуванням вагових коефіцієнтів дуг різних видів. Для визначення значень даних коефіцієнтів використовуються типи зв'язності, визначені у стандарті ISO/IEC/IEEE 24765, вагові коефіцієнти яких розраховуються за допомогою нормування їх значущості.

Результати. Розроблено метод аналізу діаграм IDEF0, який дозволяє визначати структурні зміни, за яких діаграми будуть задовольняти вимогам збалансованості та функціональної зв'язності. Рекомендації, отримані в результаті аналізу діаграм IDEF0, що описують процеси закупки продукції та випуску ПЗ, а також рекомендації концепції DevOps та референтної моделі операцій у ланцюгах поставок SCOR, дозволили перетворити вихідні діаграми відповідно до вимог збалансованості. У подальшому при прийнятті рішень про виробітку рекомендацій можуть бути використані експертні судження.

Висновки. Запропонований метод може бути використаний для підтримки діяльності по накопиченню та розповсюдженню організаційних знань, дозволяючи аналізувати та вдосконалювати моделі бізнес-процесів, перш ніж вони будуть додані до корпоративного репозиторію для їх повторного використання при створенні нових рішень. У подальшому будуть розглянуті різні способи представлення моделей бізнес-процесів у корпоративному репозиторії, що відповідають нотаціям Archimate, ARIS та ін.

© Godlevskiy M. D., Orlovskiy D. L., Kopp A. M, 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-6

КЛЮЧОВІ СЛОВА: бізнес-процес, моделювання, діаграма IDEF0, аналіз моделі бізнес-процесів, збалансованість, зв'язність.

УДК 004.042:004.94

СТРУКТУРНИЙ АНАЛІЗ І ОПТИМІЗАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ IDEF0-МОДЕЛЕЙ БІЗНЕС-ПРОЦЕСОВ

Годлевський М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Орловський Д. Л. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

Копп А. М. – аспірант кафедри програмної інженерії та інформаційних технологій управління Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. Решена актуальна задача розробки методу, дозволяючого знизити кількість системних або випадкових помилок, що виникають при побудові моделей бізнес-процесів. Об'єктом дослідження є графічні та математичні моделі, що відображають структуру бізнес-процесів. Мета роботи – мінімізація системних або випадкових помилок на основі розробки методу формування та аналізу структури бізнес-процесів в нотатції IDEF0.

Метод. Предложено метод формування та аналізу структури бізнес-процесів в нотатції IDEF0. Для аналізу діаграм IDEF0 використовується коефіцієнт збалансованості, який був модифікований і доповнений з урахуванням вагових коефіцієнтів двох різних видів. Для визначення значень даних коефіцієнтів використовуються типи зв'язності, визначені в стандарті ISO/IEC/IEEE 24765, вагові коефіцієнти яких розраховуються шляхом нормування їх значимості.

Результати. Розроблено метод аналізу діаграм IDEF0, що дозволяє визначати структурні зміни, при яких діаграми будуть задовольняти вимогам збалансованості. Рекомендації, отримані в результаті аналізу діаграм IDEF0, описують процеси закупівлі продукції та випуску ПО, а також рекомендації концепції DevOps та референтної моделі операцій в ланцюгу поставок SCOR, дозволили перетворити вихідні діаграми відповідно до вимогам збалансованості. В подальшому при прийнятті рішень про виробництво рекомендацій можуть бути використані експертні судження.

Висновки. Предложено метод може бути використаний для підтримки діяльності по накопиченню та поширенню організаційних знань, дозволяючи аналізувати та вдосконалювати моделі бізнес-процесів, перш ніж вони будуть додані в корпоративний репозиторій для їх повторного використання при створенні нових рішень. В подальшому будуть розглянуті різні способи представлення моделей бізнес-процесів в корпоративному репозиторії, що відповідають нотациям Archimate, ARIS та ін.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: бізнес-процес, моделювання, діаграма IDEF0, аналіз моделі бізнес-процесів, збалансованість, зв'язність.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Hammer M. Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution / M. Hammer, J. Champy. – Zondervan, 2009. – 272 p.
2. IDEF0 : Integration Definition for Function Modeling. – [Effective from 1993-12-21]. – Gaithersburg : National Institute of Standards and Technology, 1993. – 128 p.
3. Shuja A. K. RUP Reference and Certification Guide / A. K. Shuja, J. Krebs. – Pearson Education, 2007. – 336 p.
4. Grover V. Process think: winning perspectives for business change in the information age / V. Grover, W. J. Kettinger. – IGI Global, 2000. – 399 p.
5. Замятин О. М. Моделирование систем : учебное пособие / О. М. Замятин. – Томск : Изд-во ТПУ, 2009. – 204 с.
6. SADT methodology: Structured Analysis and Design Techniques [Electronic resource]. – Access mode: http://apex.tpu.ru/ap/RRPFO.MATERIAL?p_id=5396&type_file=2.
7. van der Aalst W. M. P. Modeling Business Processes-A Petri Net-Oriented Approach. Cooperative Information Systems series / W. M. P. van der Aalst, C. Stahl // MIT Press. – 2011. – Vol. 61. – P. 62.
8. Дорпер М. Г. Алгоритм преобразования моделей бизнес-процессов в одноцветные сети Петри / М. Г. Дорпер // Моделирование и анализ информационных систем. – 2010. – Т. 17, № 2. – С. 5–16.
9. Копп А. М. Об одном подходе к решению задачи оптимизации структуры бизнес-процессов предприятия / А. М. Копп, Д. Л. Орловский // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Системний аналіз, управління та інформаційні технології. – 2015. – № 58. – С. 102–108.
10. Systems and software engineering. Vocabulary. ISO/IEC/IEEE 24765:2010. – [Effective from 2010-12-15]. – Geneva: ISO, 2010. – 418 p.
11. McConnell S. Code complete / S. McConnell. – Pearson Education, 2004. – 960 p.
12. Копп А. Разработка подхода к анализу и оптимизации диаграмм потоков данных / А. Копп, Д. Орловский // ScienceRise. – 2017. – Vol. 7. – P. 33–42. DOI: 10.15587/2313-8416.2017.107048.
13. Мамонов В. И. Алгоритм формирования организационной структуры на основе системы бизнес-процессов предприятия / В. И. Мамонов, И. В. Сахаров // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2008. – № 4. – С. 27–42.
14. Smith D. K. 10.2.2 IDEF0 Lessons Learned / D. K. Smith // INCOSE International Symposium. – 2006. – Vol. 16, No. 1. – P. 1382–1395. DOI: 10.1002/j.2334-5837.2006.tb02820.x
15. Bass L. DevOps: A Software Architect's Perspective / L. Bass, I. Weber, L. Zhu. – Addison-Wesley Professional, 2015. – 352 p.
16. McCormack K. P. Supply chain networks and business process orientation: advanced strategies and best practices / K. P. McCormack, W. C. Johnson. – CRC Press, 2016. – 240 p.

TWO METHODS FOR CONSTRUCTION OF SUBOPTIMISTIC AND SUBPESSIMISTIC SOLUTIONS OF THE INTERVAL PROBLEM OF MIXED-BOOLEAN PROGRAMMING

Mamedov K. Sh. – Dr. Sc., Professor of Baku State University and head of Department of the Institute of Control Systems of the National Academy of Sciences of Azerbaijan, Azerbaijan, Baku.

Mammadli N. O. – Doctorant, Institute of Control Systems, Azerbaijan National Academy of Sciences, Baku, Azerbaijan.

ABSTRACT

Context. The interval problem of mixed Boolean programming having numerous economic applications is considered. The object of the study was a model of the integer programming.

Objective. Development of methods for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions of the mixed Boolean programming interval problem.

Two methods for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions of mixed Boolean programming problems with interval initial data are introduced. These methods are based on some economic interpretation of the model considered.

Method. Two methods for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions of mixed Boolean programming problems with interval initial data are introduced. These methods are based on some economic interpretation of the considered model. In the first method a criterion of selecting unknowns for assigning values, which is based on the principle of profit maximum for each unit of expenditure is introduced. Since the coefficients of the problem are intervals, two strategies are chosen: optimistic and pessimistic. In the optimistic strategy, the idea of choosing unknowns is used, which corresponds to the maximum ratio of the corresponding maximum profit to the minimum expenditure. And in the pessimistic strategy, the idea of maximum ratio of the minimum profit to the maximum expenditure is used. In the second method, the concept of a non-linearly increasing penalty (price) for using a unit of the remaining resources is introduced, that on the right side is bounded. Taking into account the principles of the above first and second methods, using this concept of penalty (price), methods for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions have been developed.

Results. The algorithms for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions to the interval problem of mixed Boolean programming are developed.

Conclusions. A software package was developed for constructing suboptimistic and subpessimistic solutions to the interval problem of mixed Boolean programming. A number of computational experiments have been carried out over random problems of various dimensions.

KEYWORDS: an interval problem of mixed Boolean programming, optimistic, pessimistic, sub-optimistic and sub-pessimistic solutions, upper and lower bounds, errors, experiments.

NOMENCLATURE

N – the number of all variables,
 n – the number of boolean variables,
 m – number of bounders,
 $I = [1, \dots, n]$ – set of indexes of variables, taking boolean values;
 $R = [n+1, n+2, \dots, N]$ – set of indexes of variables, taking continuous values;
 $\underline{c}_j, \bar{c}_j, \underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}, \underline{b}_i, \bar{b}_i$ – given positive integers;
 j_* – fixed item;
 x_j – j -th unknown;
 X – dimensionnal vector;
 X^{op} – an optimistic solution;
 f^{op} – an optimistic value;
 X^p – a pessimistic solution;
 f^p – a pessimistic value;
 $\bar{q}_i, \underline{q}_i$ – a penalty (price) for using the i -th resource for the optimistic and pessimistic solutions, respectively;

$\bar{r}_i, \underline{r}_i$ – use of the i -th resource for the optimistic and pessimistic solutions, respectively;
 $\bar{Q}_j, \underline{Q}_j$ – the total penalty for using the remaining resources for the unknowns x_j for an optimistic and pessimistic solutions, respectively;
 $\bar{f}_{op}, \bar{f}_p$ – upper bounds of the suboptimistic and subpessimistic values of the objective function, respectively;
 $f_{so}^1, f_{so}^2, f_{so.sht}^1, f_{so.sht}^2, f_{sp}^1, f_{sp}^2, f_{sp.sht}^1, f_{sp.sht}^2$ – suboptimistic and subpessimistic values of the objective function obtained by the 1-st and 2-nd methods (non-linearly increasing penalty) corresponding to the 1-st and 2-nd approaches;
 X^{so} – a suboptimistic solution;
 f^{so} – a suboptimistic value;
 X^{sp} – a subpessimistic solution;
 f^{sp} – a subpessimistic value;
 $\delta_{so}^1, \delta_{so}^2, \delta_{so.sht}^1, \delta_{so.sht}^2, \delta_{sp}^1, \delta_{sp}^2, \delta_{sp.sht}^1, \delta_{sp.sht}^2$ – relative errors of the suboptimistic and subpessimistic values of

the objective function from the optimistic and pessimistic values obtained by the 1-st and 2-nd methods (non-linearly increasing penalty) corresponding to the 1-st and 2-nd approaches;

$k_{so}, k_{so.sht}, k_{sp}, k_{sp.sht}$ – the number of remaining continuous variables after the application of the 1-st and 2-nd methods (nonlinearly increasing penalty) with the second approach for construction suboptimistic and subpessimistic solutions, respectively.

INTRODUCTION

At the beginning of the mixed Boolean programming problems with interval data, we give some economic interpretation.

Let there are many objects. Some of these objects can be used or ignored, and the rest of the objects can be used to some extent. Suppose for the use of these objects, the resources belonging to a certain interval were distinguished.

If a fixed object is selected for use (or partial use), then the possible costs will be within the specified interval.

In this case, the profit also belongs to a given other interval. It is required to choose for use (or partial use) such objects, the total costs of which do not exceed the allocated resources included in the corresponding intervals, and the total profit will be maximum. Taking the corresponding variables, we obtain a mathematical model of mixed-Boolean programming with the interval initial data. Here the aim is to develop methods for solving of the obtained problem, taking into account the basic properties of the model. In addition, carry out comparative computational experiments to identify the quality of the developed methods.

1 PROBLEM STATEMENT

The following problem is considered:

$$\sum_{j=1}^n [\underline{c}_j, \bar{c}_j] x_j + \sum_{j=n+1}^N [\underline{c}_j, \bar{c}_j] x_j \rightarrow \max \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^n [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] x_j + \sum_{j=n+1}^N [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] x_j \leq [\underline{b}_i, \bar{b}_i], (i = \overline{1, m}), \quad (2)$$

$$0 \leq x_j \leq 1, (j = \overline{1, N}), \quad (3)$$

$$x_j = 1 \vee 0, (j = \overline{1, n}), (n \leq N). \quad (4)$$

Here it is assumed that $\underline{c}_j > 0, \bar{c}_j > 0, \underline{a}_{ij} \geq 0, \bar{a}_{ij} \geq 0, \underline{b}_i > 0, \bar{b}_i > 0$ ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, N}$) are given integers.

We note the following natural conditions for the coefficients of the problem (1)–(4). First, for each conditions must be satisfied $\sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} > \bar{b}_i, (i = \overline{1, m})$.

Conversely, if for all these conditions are not satisfied, then the solution $X = (1, 1, 1, \dots, 1)$ will satisfy the system (2)–(4) and it will be the optimal solution. On the other hand, if

for some fixed i_* the condition $\sum_{j=1}^N \bar{a}_{i_* j} \leq \bar{b}_{i_*}, (i = \overline{1, m})$ is

fulfilled then the inequality i_* is not a restriction and it is excluded from the system (2). We assume that the above natural conditions are fulfilled for the problem (1)–(4).

This problem is called the problem of mixed-Boolean programming with interval data or simply the interval problem of mixed-Boolean programming. The considered problem (1)–(4) is a generalization of the Boolean programming problems, interval Boolean programming problems, and linear programming problems. In the case of $n = 0$ we obtain the linear programming problem with interval data, in the case of $n = N$ an interval Boolean programming problem is obtained, in the case of $\underline{c}_j = \bar{c}_j, \underline{a}_{ij} = \bar{a}_{ij}, \underline{b}_i = \bar{b}_i, (i = \overline{1, m}, j = \overline{1, N})$ the well-known Boolean or mixed-Boolean programming problem is obtained.

In the beginning, for problems (1)–(4) we give some economic interpretation. Let there are N objects. From each object $n (n \leq N)$ you can use or ignore, and for other objects $N - n$ you can use to some extent. Assume that the resources included in the interval $[\underline{b}_i, \bar{b}_i] (i = \overline{1, m})$ are allocated to use these objects. If the j -th object ($j = \overline{1, N}$) is selected for use (or partial use), then the possible costs enter the interval $[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}] (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$, while the profit belongs to the interval $[\underline{c}_j, \bar{c}_j] (j = \overline{1, N})$.

It is required to choose for use (or partial use) such objects, which total costs did not exceed the allocated resources involved in the interval $[\underline{b}_i, \bar{b}_i] (i = \overline{1, m})$, and the total profit was maximum. Obviously, taking variables $x_j = \begin{cases} 1, & \text{if } j\text{-th object is taken} \\ 0, & \text{otherwise, } (j = \overline{1, n}), \end{cases}$ and $0 \leq x_j \leq 1, (j = \overline{n+1, N})$, then the mathematical model of the problem will be in the form (1)–(4).

To construct solutions for problem (1)–(4), we have introduced two criteria for choosing the number of unknowns and assigning specific values. Based on these criteria, two methods for constructing solutions have been developed.

2 LITERATURE REVIEW

It should be noted that since all the particular cases of problem (1)–(4) are in NP-complete class, this problem also belongs to the class NP-complete; difficult-solvable [1–2]. As far as we know, the interval problem of mixed Boolean programming has not yet been investigated. In spite of this, some classes of interval integer-programming problems were investigated in [3–6].

In this article, for the problem (1)–(4), the concepts of admissible, optimistic, pessimistic, suboptimistic and sub-

pessimistic solutions are introduced and methods for their solution are developed. These concepts are an extension of the concepts introduced in [7, 8]. It should be noted that a number of approximate and exact algorithms for solving the classical Boolean programming problem are presented in [9, 10]. And in [11] specific methods for construction of a suboptimal (or approximate) solution of Boolean programming problems were developed. The basic principles of interval calculus are presented in [12]. It should be noted that the concepts of a linearly-increasing penalty to construct an approximate Boolean programming solution were introduced in [13]. And in this paper a more powerful criterion is introduced, which we call a nonlinearly-increasing penalty for a more general class of problems.

3 MATERIALS AND METHODS

First we introduce an analog of the concepts introduced by the authors in [7, 8] for a more general class of mixed Boolean programming problems.

Definition 1. N -dimensional vector $X = (x_1, \dots, x_N)$ satisfying the system of conditions (2)–(4) for $\forall a_{ij} \in [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ and $\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$ is called an admissible solution of problem (1)–(4).

From this definition it immediately follows that the concepts of the optimal solution and the optimal value of the function (1) must have a different meaning, in contrast to the known ones. Because it is necessary to ensure that the sum of some intervals is not exceeded from a given specific interval $[\underline{b}_i, \bar{b}_i]$ and that the maximum of some other intervals is reached. To this end, we introduce a few more definitions.

Definition 2. An admissible solution $X^{op} = (x_1^{op}, x_2^{op}, \dots, x_N^{op})$, is called to be an optimistic solution of problem (1)–(4) if that satisfies the inequalities $\sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} x_j^{op} \leq b_i$, for $\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$, and in this, the value of the function

$$f^{op} = \sum_{j=1}^N \bar{c}_j x_j^{op} \text{ will be maximal.}$$

Definition 3. An admissible solution $X^p = (x_1^p, x_2^p, \dots, x_N^p)$ is called to be a pessimistic solution of problem (1)–(4) if that satisfies the inequalities $\sum_{j=1}^N \bar{a}_{ij} x_j^p \leq b_i$ for $\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$, and in this, the value of the function $f^p = \sum_{j=1}^N \underline{c}_j x_j^p$ will be maximal.

From these definitions it is clear that in order to find the optimistic and pessimistic solutions of problem (1)–(4) it is necessary to solve many problems of mixed-Boolean programming, which is included in the class of NP-complete ones. And this requires unreal time to find the solution of large size problems. Therefore, we have introduced the following concepts of suboptimistic and subpessimistic i.e. approximate solutions of problem (1)–(4) and have developed algorithms for finding them.

Definition 4. An admissible solution $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_N^{so})$ is called to be a sub-optimistic solution of the problem (1)–(4) if that satisfies the conditions $\sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} x_j^{so} \leq b_i$ for $\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$ and the

value of the function $f^{so} = \sum_{j=1}^N \bar{c}_j x_j^{so}$ will take a large value.

Definition 5. An admissible solution $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_N^{sp})$ is called to be a sub-pessimistic solution of the problem (1)–(4) if that satisfies the conditions $\sum_{j=1}^N \bar{a}_{ij} x_j^{sp} \leq b_i$ for $\forall b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$ and in

this, the value of the function $f^{sp} = \sum_{j=1}^N \underline{c}_j x_j^{sp}$ will take a large value.

Theoretical justification of the 1st method.

Using the above economic interpretation of problem (1)–(4) introduced in paragraph 1, we derive the criterion of choosing unknowns for assigning specific values. Let the j -th object ($j = \overline{1, N}$) be selected for use (or partial use). Then, the necessary expenses should be included in the interval $[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N}$). In this case, the obtained profit is included in the given interval $[\underline{c}_j, \bar{c}_j]$ ($j = \overline{1, N}$). Obviously, the profit per unit of consumption included in the interval $[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]$ ($i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N}$) will be at least

$$\min_i \frac{[\underline{c}_j, \bar{c}_j]}{[\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]} = \frac{[\underline{c}_j, \bar{c}_j]}{\max_i [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]} \quad (j = \overline{1, N}).$$

From here it is directly visible that it is necessary to choose a number j_* , which is determined from the following conditions:

$$x_j = 1 \vee 0, (j = \overline{1, n}), (n \leq N). \quad (4)$$

$$\max_j \frac{[\underline{c}_j, \bar{c}_j]}{\max_i [\underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}]} = \frac{[\underline{c}_{j_*}, \bar{c}_{j_*}]}{\max_i [\underline{a}_{ij_*}, \bar{a}_{ij_*}]} \quad (5)$$

Using the formula (5) and taking into account the above definitions 4 and 5, we obtain the following criteria for choosing the number j_* of unknowns x_{j_*} for construction of suboptimistic and subpessimistic solutions, respectively:

$$j_* = \arg \max_j \frac{\bar{c}_j}{\max_i \underline{a}_{ij}}. \quad (6)$$

$$j_* = \arg \max_j \frac{\underline{c}_j}{\max_i \bar{a}_{ij}}. \quad (7)$$

Thus, to construct a suboptimistic solution, one can use criterion (6), and for a sub-pessimistic solution, (7). In this case, it is necessary to take into account the case in what interval is j_* i.e. $j_* \in [1, \dots, n] \equiv I$ or $j_* \in [n+1, n+2, \dots, N] \equiv R$.

Theoretical justification of the 2nd method (nonlinearly-increasing penalty method). We write the problem (1)–(4) in the following equivalent form for fixed b_i , $b_i \in [\underline{b}_i, \bar{b}_i]$, $(i = \overline{1, m})$:

$$\sum_{j=1}^n [\underline{c}_j, \bar{c}_j] x_j + \sum_{j=n+1}^N [\underline{c}_j, \bar{c}_j] x_j \rightarrow \max \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^n [\underline{\alpha}_{ij}, \bar{\alpha}_{ij}] x_j + \sum_{j=n+1}^N [\underline{\alpha}_{ij}, \bar{\alpha}_{ij}] x_j \leq 1, (i = \overline{1, m}), \quad (9)$$

$$0 \leq x_j \leq 1, (j = \overline{1, N}), \quad (10)$$

$$x_j = 1 \vee 0, (j = \overline{1, n}), (n \leq N). \quad (11)$$

Here $\underline{\alpha}_{ij} = \underline{a}_{ij} / b_i$, $\bar{\alpha}_{ij} = \bar{a}_{ij} / b_i$, $b_i := 1$, $(i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$. It is obvious, that $\underline{c}_j > 0$, $\bar{c}_j > 0$, $0 \leq \underline{\alpha}_{ij} \leq 1$, $0 \leq \bar{\alpha}_{ij} \leq 1$, $\underline{\alpha}_{ij} \geq 0$, $\bar{\alpha}_{ij} \geq 0$, $(i = \overline{1, m}, j = \overline{1, N})$.

Proceeding from problem (8)–(11), we construct the following problem (12)–(15) and (16)–(19) which we call optimistic and pessimistic, respectively.

$$\sum_{j=1}^n \bar{c}_j x_j + \sum_{j=n+1}^N \underline{c}_j x_j \rightarrow \max, \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^n \underline{\alpha}_{ij} x_j + \sum_{j=n+1}^N \bar{\alpha}_{ij} x_j \leq 1, (i = \overline{1, m}), \quad (13)$$

$$0 \leq x_j \leq 1, (j = \overline{1, N}), \quad (14)$$

$$x_j = 1 \vee 0, (j = \overline{1, n}), (n \leq N). \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^n \underline{c}_j x_j + \sum_{j=n+1}^N \bar{c}_j x_j \rightarrow \max, \quad (16)$$

$$\sum_{j=1}^n \bar{\alpha}_{ij} x_j + \sum_{j=n+1}^N \underline{\alpha}_{ij} x_j \leq 1, (i = \overline{1, m}), \quad (17)$$

$$0 \leq x_j \leq 1, (j = \overline{1, N}), \quad (18)$$

$$x_j = 1 \vee 0, (j = \overline{1, n}), (n \leq N). \quad (19)$$

For optimistic problems (12)–(15) below, a method for constructing suboptimistic solutions was developed. Similarly, it is possible to develop a method for constructing subpessimistic of solutions of problems (16)–(19).

The process of constructing of a suboptimistic solution begins from an admissible solution $X^{so} = (0, 0, \dots, 0)$. Then we accept $\omega = \emptyset$ and $\underline{r}_i := 0, (i = \overline{1, m})$. Let some coordinate $x_{j_1}^{so}$ take the value of unit, for example $x_{j_1}^{so} = 1$. Then on the right-hand side of the system (13) there are resources for further use $1 - \underline{\alpha}_{ij_1}$ ($i = \overline{1, m}$). Obviously, these resources are different. With a view of constructing a final solution containing a larger number of units, i.e. in order to uniform use of the remaining resources, it is necessary to assign a penalty (price) for the use of each resource. It is clear that the penalty (price) should have such property, that at reduction of the remaining resources, the penalty for their use should increase.

If $x_{j_2}^{so} = 1$ is selected, then on the right side of the system (13) $1 - \underline{\alpha}_{ij_1} - \underline{\alpha}_{ij_2}$ ($i = \overline{1, m}$) remains. In the general case, $1 - \underline{r}_i$ ($i = \overline{1, m}$) is on the right side, where $\underline{r}_i = \sum_{j \in \omega} \underline{\alpha}_{ij}$ ($i = \overline{1, m}$), $\omega = \{j | x_j^{so} = 1\}$.

We note that in [13] a penalty is imposed, which increases linearly (proportional to) with decreasing right-hand sides, i.e. $t_i = r_i$ ($i = \overline{1, m}$) is accepted. And in this work as a penalty t_i ($i = \overline{1, m}$), $t_i = 1 / (1 - \underline{r}_i)$ ($i = \overline{1, m}$) is accepted. Obviously, with increasing used resources $\underline{r}_i$ ($i = \overline{1, m}$), the penalty for using the remaining resources increases nonlinearly, i.e. faster than linear. Therefore, this method will be called the method of non-linearly increasing fine. In other words $\lim_{\underline{r}_i \rightarrow 1} t_i = \infty$. This t_i ($i = \overline{1, m}$) provides a high price (penalty) for the use of scarce resources.

Note that the penalty in the form $t_i = \frac{1}{1 - \underline{r}_i}$ ($i = \overline{1, m}$)

was first introduced in the work for Boolean programming problems [11]. In this paper, these concepts were extended for a more general problem of partial Boolean programming

with interval data. It should be noted that in order to fewer use of the remaining smaller resources (right-hand parts of the system (13)), it is possible to increase the penalty t_i ($i = \overline{1, m}$) as follows:

$$t_i = \frac{1}{(1-r_i)^k} \quad (i = \overline{1, m}), \text{ here } k \text{ is a fixed natural}$$

number. Computational experiments have shown that the best results are obtained mainly for $k = 2$. Then the total penalty $x_j^{so} = 1$ for acceptance will be

$$q_j = \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} t_i \quad (j = \overline{1, N}).$$

At the same time, the profit per unit of the total penalty for constructing of a suboptimistic solution to take $x_j^{so} = 1$ will be $\bar{Q}_j = \bar{c}_j / q_j$ ($j = \overline{1, N}$). Obviously, it is necessary to choose $x_{j_*}^{so} = 1$, where the number j_* is determined from the following criterion:

$$\max_j \bar{Q}_j = \frac{\bar{c}_j}{q_j} = \frac{\bar{c}_{j_*}}{q_{j_*}} = \bar{Q}_{j_*} \text{ or } j_* = \arg \max_j \bar{Q}_j \quad (20)$$

To construct a suboptimistic solution using criterion (20), it is necessary to take into account the circumstances $j_* \in I$ or $j_* \in R$. The use of these circumstances in the construction of solutions are given below. To construct a subpessimistic solution, the process is carried out similarly as mentioned above, using the following criterion:

$$\max_j \bar{Q}_j = \max_j \frac{\bar{c}_j}{q_j} = \frac{\bar{c}_{j_*}}{q_{j_*}} = \bar{Q}_{j_*}. \text{ Here } \bar{q}_j = \sum_{i=1}^m \bar{\alpha}_{ij} \bar{t}_i \quad (j = \overline{1, N}), \bar{t}_i = \frac{1}{1-r_i} \quad (i = \overline{1, m}), \bar{r}_i = \sum_{j \in \omega} \bar{\alpha}_{ij} \quad (i = \overline{1, m}), \omega = \{j | x_j = 1\}. \quad (21)$$

At the beginning of the constructing process of a sub-pessimistic solution $\omega = \{\emptyset\}$ and $\bar{r}_i := 0$, ($i = \overline{1, m}$), i.e. $X^{sp} = (0, 0, \dots, 0)$ are accepted. Using the criteria (20) or (21) to construct a suboptimistic or subpessimistic solution two approaches were developed, respectively. These approaches to the construct of a suboptimistic solution was presented as follows.

I approach: In the case when for the first time it is impossible to assign to an unknown x_j^{so} , ($j \in R$) a unit, then for this unknown we take the possible fractional values, and for the remaining variables we assign zero.

In other words, if $j_* \in I$, then $x_{j_*}^{so}$ can take the values either 0 or 1. If $\alpha_{ij_*} \leq 1 - r_i$ ($i = \overline{1, m}$), then $x_{j_*}^{so} := 1$, $r_i := r_i + \alpha_{ij_*}$, ($i = \overline{1, m}$), $I := I \setminus \{j_*\}$, is accepted, and if at least for one i ($i = \overline{1, m}$), $\alpha_{ij_*} > 1 - r_i$ ($i = \overline{1, m}$), $x_{j_*}^{so} := 0$, $I := I \setminus \{j_*\}$ is accepted. If $j_* \in R$, then the unknown $x_{j_*}^{so}$ must take any values from the interval $[0, 1]$. In this case, if $\alpha_{ij_*} \leq 1 - r_i$, for all i ($i = \overline{1, m}$), then we accept $x_{j_*}^{so} := 1$, $r_i := r_i + \alpha_{ij_*}$, ($i = \overline{1, m}$), $R := R \setminus \{j_*\}$. And if at least for one i ($i = \overline{1, m}$) $\alpha_{ij_*} > 1 - r_i$ ($i = \overline{1, m}$), then we accept $x_{j_*}^{so} = \min_i \frac{1-r_i}{\alpha_{ij_*}}$, $R := R \setminus \{j_*\}$, $r_i := r_i + \alpha_{ij_*} x_{j_*}^{so}$. And for the rest j it is accepted $x_j^{so} := 0$, ($j \in I \cup R$).

Obviously, in this case, at least for one i ($i = \overline{1, m}$), $r_i = 1$ is obtained, the process of constructing a suboptimistic solution is completed.

To continue the construction process of a suboptimistic solution $X^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_N^{so})$, we find the next number j_* from the criteria (6) or (20). Construction process of this solution is completed, if $I = \emptyset$ and $R = \emptyset$.

Note that it is possible to construct a subpessimistic solution $X^{sp} = (x_1^{sp}, x_2^{sp}, \dots, x_N^{sp})$ of problem (16)–(19) similarly to the above, only using criteria (7) or (21).

II approach: Here, in the case of $j_* \in I$, the first part of the I approach still stands, and in the case of $j_* \in R$, i.e. When the unknown $x_{j_*}^{so}$ should take any values from the interval $[0, 1]$, we proceed as follows: if $\alpha_{ij_*} \leq 1 - r_i$ for all i ($i = \overline{1, m}$), then we accept $x_{j_*}^{so} := 1$, $r_i := r_i + \alpha_{ij_*}$, ($i = \overline{1, m}$) $R := R \setminus \{j_*\}$. And if it is impossible to assign a unit to an unknown $x_{j_*}^{so}$, i.e. at least for one i ($i = \overline{1, m}$) the condition $\alpha_{ij_*} > 1 - r_i$ ($i = \overline{1, m}$) is fulfilled, then for $j \in I$ we accept $x_j := 0$. And for the rest x_j^{so} ($j \in R$) we construct a linear programming problem and solve it by some well-known method. Obviously, the dimension of the obtained problem will be much smaller. These circumstances are confirmed once again in computational experiments.

Finally, we will write an algorithm for constructing of a suboptimistic solution by the nonlinearly increasing penalty method (The algorithm for constructing of a subpessimistic solution is compiled similarly).

Algorithm of the non-linearly increasing penalty method (I approach)

Step 1. Input
 $N, n, \underline{a}_{ij}, \bar{a}_{ij}, \underline{c}_j, \bar{c}_j, \underline{b}_i, \bar{b}_i, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$.

Step 2. Accept $\underline{b}_i := \bar{b}_i, \underline{\alpha}_{ij} = \frac{\underline{a}_{ij}}{\underline{b}_i}, \bar{\alpha}_{ij} = \frac{\bar{a}_{ij}}{\bar{b}_i}$,
 $\underline{b}_i := 1, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$.

Step 3. Accept
 $x_j^{so}, (j = \overline{1, N}), \omega = \{\emptyset\}, r_i := 0, (i = \overline{1, m})$ and sets
 $I := \{1, 2, \dots, n\}, R := \{n+1, n+2, \dots, N\}$.

Step 4. Compute $\underline{t}_i = 1 / (1 - r_i) (i = \overline{1, m})$,
 $\underline{q}_j = \sum_{i=1}^m \underline{\alpha}_{ij} \underline{t}_i, j \in I \cup R$.

Step 5. Compute $\bar{Q}_j = \bar{c}_j / \underline{q}_j (j \in I \cup R)$ and find
 j_* from relation $j_* = \arg \max_j \bar{Q}_j$.

Step 6. If $j_* \in I$ and for all $i (i = \overline{1, m})$ the relation
 $\underline{\alpha}_{ij_*} \leq 1 - r_i$ is fulfilled, then accept $x_{j_*}^{so} := 1$,
 $\underline{r}_i := \underline{r}_i + \underline{\alpha}_{ij_*}, I := I \setminus \{j_*\}$ and pass to step 4.

Step 7. If $j_* \in I$ and at least for one $i (i = \overline{1, m})$
the relation $\underline{\alpha}_{ij_*} > 1 - r_i$ is fulfilled, then accept
 $x_{j_*}^{so} := 0, I := I \setminus \{j_*\}$ and pass to step 4.

Step 8. If $j_* \in R$ and at least for any $i (i = \overline{1, m})$
the relation $\underline{\alpha}_{ij_*} \leq 1 - r_i$ is fulfilled, then accept
 $x_{j_*}^{so} := 1, \underline{r}_i := \underline{r}_i + \underline{\alpha}_{ij_*}, R := R \setminus \{j_*\}$ and pass to step 4.

Step 9. If $j_* \in R$ and at least for one $i (i = \overline{1, m})$,
relation $\underline{\alpha}_{ij_*} > 1 - r_i$ is fulfilled, then accept
 $x_{j_*}^{so} = \min_i \frac{1 - r_i}{\underline{\alpha}_{ij_*}}, \underline{r}_i := \underline{r}_i + \underline{\alpha}_{ij_*} x_{j_*}^{so}, R := R \setminus \{j_*\}$ and
 $x_{j_*}^{so} := 0, j \in I \cup R$.

Step 10. Compute $f^{so} := \sum_{j=1}^N \bar{c}_j x_j^{so}$.

Step 11. Print $f^{so}, x^{so} = (x_1^{so}, x_2^{so}, \dots, x_N^{so})$.

Step 12. Stop.

Note that, a suboptimistic solution of the problem
(1)–(4) is found by the application of the above algo-
rithm. And to construct sub-pessimistic solution, you
can use the same algorithm completely, but instead of
using the criterion (20), you need to use criterion (21).

It is important to note that the algorithm for con-
structing suboptimistic and sub-pessimistic solutions
by the second method, one can use this algorithm, but

in the case of $j_* \in I$ and at least for one $i (i = \overline{1, m})$, the
relation $\underline{\alpha}_{ij_*} > \bar{b}_i$ is satisfied, then we take for $x_j := 0$, and
for $j \in I$ but for all other non-fixed variables $j, j \in R$ we
compose and solve a linear programming problem of smaller
dimension. Then we add the obtained solution to the fixed
coordinates of the solution.

To estimate errors of the obtained suboptimistic and
suboptimistic values from the optimistic and pessimistic
values, the original problem is solved as a linear
programming problem and corresponding values $\bar{f}_{op}$ and
 $\bar{f}_p$ are obtained, respectively. Then the relative errors are
estimated as follows:

$$\begin{aligned} \delta_{so}^1 &\leq \frac{\bar{f}_{op} - f_{so}^1}{\bar{f}_{op}}, \delta_{so}^2 \leq \frac{\bar{f}_{op} - f_{so}^2}{\bar{f}_{op}}, \\ \delta_{so.sht}^1 &\leq \frac{\bar{f}_{op} - f_{so.sht}^1}{\bar{f}_{op}}, \delta_{so.sht}^2 \leq \frac{\bar{f}_{op} - f_{so.sht}^2}{\bar{f}_{op}}, \\ \delta_{sp}^1 &\leq \frac{\bar{f}_p - f_{sp}^1}{\bar{f}_p}, \delta_{sp}^2 \leq \frac{\bar{f}_p - f_{sp}^2}{\bar{f}_p}, \\ \delta_{sp.sht}^1 &\leq \frac{\bar{f}_p - f_{sp.sht}^1}{\bar{f}_p}, \delta_{sp.sht}^2 \leq \frac{\bar{f}_p - f_{sp.sht}^2}{\bar{f}_p}. \end{aligned}$$

It must be noted, that in development of methods for
solving problems (1)–(4), the ideas of work [9–12] were
used.

4 EXPERIMENTS

To identify the quality of the developed algorithms in
this paper, the programs of these algorithms are compiled
and a number of computational experiments were carried out
on problems of large dimension. Using the work [11], the
coefficients of these problems are chosen as randomly two-
digit or three-digit numbers as follows:

- I. $0 \leq \underline{a}_{ij} \leq 99, 1 \leq \bar{a}_{ij} \leq 99, 1 \leq \underline{c}_j \leq 99,$
 $1 \leq \bar{c}_j \leq 99, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$.
 - II. $0 \leq \underline{a}_{ij} \leq 999, 1 \leq \bar{a}_{ij} \leq 999, 1 \leq \underline{c}_j \leq 999,$
 $1 \leq \bar{c}_j \leq 999, (i = \overline{1, m}; j = \overline{1, N})$.
- $$\underline{b}_i := \left\lceil \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N \underline{a}_{ij} \right\rceil, \bar{b}_i := \left\lceil \frac{1}{3} \sum_{j=1}^N \bar{a}_{ij} \right\rceil, (i = \overline{1, m}).$$

Here $[z]$ denotes the integer part of the number z .

The results of the computational experiments are
presented in the following tables, where for each dimension,
5 different problems were calculated.

5 RESULTS

Table 1 – Experiments with two-digit coefficients ($N = 500; n = 300; m = 10$)

№	1	2	3	4	5
$\overline{f}_{op}$	22948.176	22737.032	22307.446	22490.986	21982.270
$\underline{f}_{so}^1$	22458.800	22234.909	21877.868	21908.750	21598.278
$\underline{f}_{so}^2$	22499.599	22244.156	21885.093	21916.256	21607.766
$\underline{f}_{so.sht}^1$	22867.500	22646.917	22175.650	22419.818	21853.667
$\underline{f}_{so.sht}^2$	22875.682	22700.419	22223.520	22438.152	21878.973
δ_{so}^1	0.021	0.022	0.019	0.026	0.017
δ_{so}^2	0.020	0.022	0.019	0.026	0.017
$\delta_{so.sht}^1$	0.004	0.004	0.006	0.003	0.006
$\delta_{so.sht}^2$	0.003	0.002	0.004	0.002	0.005
k_{so}	119	109	97	102	103
$k_{so.sht}$	108	97	93	102	100
$\overline{f}_p$	14039.384	14183.660	13947.478	13755.646	13584.626
$\underline{f}_{sp}^1$	13949.091	14082.000	13809.471	13609.842	13466.579
$\underline{f}_{sp}^2$	13949.091	14103.551	13824.456	13611.735	13487.778
$\underline{f}_{sp.sht}^1$	13973.145	14121.324	13877.356	13696.894	13502.867
$\underline{f}_{sp.sht}^2$	13980.549	14133.362	13887.259	13716.408	13507.457
δ_{sp}^1	0.006	0.007	0.010	0.011	0.009
δ_{sp}^2	0.006	0.006	0.009	0.010	0.007
$\delta_{sp.sht}^1$	0.005	0.004	0.005	0.004	0.006
$\delta_{sp.sht}^2$	0.004	0.004	0.004	0.003	0.006
k_{sp}	140	139	128	136	139
$k_{sp.sht}$	143	138	129	136	135

Table 2 – Experiments with two-digit coefficients ($N = 1000; n = 600; m = 10$)

№	1	2	3	4	5
$\overline{f}_{op}$	45911.804	45296.379	44437.319	45092.610	44435.775
$\underline{f}_{so}^1$	44627.593	44136.731	43596.684	44301.667	43647.305
$\underline{f}_{so}^2$	44679.811	44198.527	43610.339	44358.495	43675.640
$\underline{f}_{so.sht}^1$	45828.458	45178.727	44385.097	45017.759	44376.333
$\underline{f}_{so.sht}^2$	45896.308	45217.426	44394.583	45021.415	44397.888
δ_{so}^1	0.028	0.026	0.019	0.018	0.018
δ_{so}^2	0.027	0.024	0.019	0.016	0.017
$\delta_{so.sht}^1$	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001
$\delta_{so.sht}^2$	0.000	0.002	0.001	0.002	0.001
k_{so}	199	225	211	213	220
$k_{so.sht}$	183	211	193	196	25

Table 2 continuation

$\overline{f}_p$	27827.451	28181.955	28069.358	27822.487	27432.328
$\underline{f}_{sp}^1$	27642.257	27889.179	27762.000	27613.937	27139.276
$\underline{f}_{sp}^2$	27642.720	27903.243	27762.000	27630.092	27153.737
$\underline{f}_{sp.sht}^1$	27775.275	28094.640	28007.694	27751.538	27359.500
$\underline{f}_{sp.sht}^2$	27780.474	28127.185	28019.607	27768.076	27362.182
δ_{sp}^1	0.007	0.010	0.011	0.007	0.011
δ_{sp}^2	0.007	0.010	0.011	0.007	0.010
$\delta_{sp.sht}^1$	0.002	0.003	0.002	0.003	0.003
$\delta_{sp.sht}^2$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.003
k_{sp}	266	271	269	276	280
$k_{sp.sht}$	264	269	260	277	275

Table 3 – Experiments with three-digit coefficients ($N = 500; n = 300; m = 10$)

№	1	2	3	4	5
$\overline{f}_{op}$	207813.440	204799.686	201112.681	203689.588	199601.713
$\underline{f}_{so}^1$	203492.135	198601.718	196161.118	197544.935	193740.212
$\underline{f}_{so}^2$	204080.969	198679.476	196336.007	197629.799	194101.881
$\underline{f}_{so.sht}^1$	207116.555	204110.132	200646.886	202920.037	198132.469
$\underline{f}_{so.sht}^2$	207142.991	204348.405	200734.420	202993.009	198240.447
δ_{so}^1	0.021	0.030	0.025	0.030	0.029
δ_{so}^2	0.018	0.030	0.024	0.030	0.028
$\delta_{so.sht}^1$	0.003	0.003	0.002	0.004	0.007
$\delta_{so.sht}^2$	0.003	0.002	0.002	0.003	0.007
k_{so}	120	115	105	110	112
$k_{so.sht}$	112	106	95	108	105
$\overline{f}_p$	141571.166	142834.086	139843.917	138310.900	136465.802
$\underline{f}_{sp}^1$	140092.684	141415.095	138470.466	136071.083	134879.129
$\underline{f}_{sp}^2$	140104.789	141629.340	138705.641	136149.312	134982.791
$\underline{f}_{sp.sht}^1$	140808.383	142269.891	139219.236	137639.519	135628.630
$\underline{f}_{sp.sht}^2$	140849.800	142344.442	139375.527	137692.414	135778.228
δ_{sp}^1	0.010	0.010	0.010	0.016	0.012
δ_{sp}^2	0.010	0.008	0.008	0.016	0.011
$\delta_{sp.sht}^1$	0.005	0.004	0.004	0.005	0.006
$\delta_{sp.sht}^2$	0.005	0.003	0.003	0.004	0.005
k_{sp}	139	136	133	135	139
$k_{sp.sht}$	141	135	131	133	137

Table 4 – Experiments with three-digit coefficients ($N = 1000; n = 600; m = 10$)

№	1	2	3	4	5
$\bar{f}_{op}$	416772.431	407262.286	400559.019	410320.331	402729.978
$\underline{f}_{so}^1$	403111.858	396721.293	390388.890	401217.913	392177.833
$\underline{f}_{so}^2$	403492.387	396912.010	390687.146	401814.400	392573.481
$\underline{f}_{so.sht}^1$	416005.141	406270.986	399687.804	409494.837	401871.992
$\underline{f}_{so.sht}^2$	416238.934	406405.856	399782.798	410041.511	402047.775
δ_{so}^1	0.033	0.026	0.025	0.022	0.026
δ_{so}^2	0.032	0.025	0.025	0.021	0.025
$\delta_{so.sht}^1$	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
$\delta_{so.sht}^2$	0.001	0.002	0.002	0.001	0.002
k_{so}	218	237	214	226	232
$k_{so.sht}$	195	223	204	214	210
$\bar{f}_p$	280754.495	284249.634	282822.257	280536.958	277027.700
$\underline{f}_{sp}^1$	278290.868	280818.009	279785.821	278534.584	274033.651
$\underline{f}_{sp}^2$	278305.366	280972.875	279895.739	278678.161	274132.534
$\underline{f}_{sp.sht}^1$	279728.741	283343.339	282041.765	279638.956	276478.038
$\underline{f}_{sp.sht}^2$	280001.797	283362.542	282256.459	279670.043	276552.316
δ_{sp}^1	0.009	0.012	0.011	0.007	0.011
δ_{sp}^2	0.009	0.012	0.010	0.007	0.010
$\delta_{sp.sht}^1$	0.004	0.003	0.003	0.003	0.002
$\delta_{sp.sht}^2$	0.003	0.003	0.002	0.003	0.002
k_{sp}	265	274	265	279	279
$k_{sp.sht}$	263	269	261	278	273

6 DISCUSSION

As will be seen from the above tables it is clear that the suboptimistic and subpessimistic values obtained by 1 and 2 methods of the objective function differ from each other (non-linearly increasing penalty). Taking into account that in the second approach the apparatus of the linear programming method is being used, which gives the best result both for the 1-st and the 2-nd methods. The more practical method can be considered the 2-nd method corresponding to the 2nd approach. Because this algorithm works faster than the application of linear programming apparatus. The above experiments of the 1-st method show that the relative errors of the suboptimistic and sub-pessimistic values of the objective function from the upper and lower bounds of the suboptimistic and pessimistic values for the 1st method vary within the limits of 0.016–0.033 and 0.006–0.016, and for the 2-nd method 0.000–0.007 and

0.002–0.006 respectively. And this means that using the methods developed in this article, the relative errors are not greater than 3.3%. On the other hand, in order to apply the 2-nd approach for constructing of suboptimistic and subpessimistic solutions for problems with two-digit coefficients, for the 1-st method on the average remains 106 and 136 variables out of 500 respectively, 214 and 272 out of 1000 variables respectively, and to construct suboptimistic and subpessimistic solutions for the 2nd method, the remaining number of variables is 100 and 136 of 500, 198 and 269 of 1000 variables. The above experiments once again confirm the efficiency and practicality of the developed methods in this work.

CONCLUSIONS

Proceeding from the above, the following conclusions may be drawn. In this article effective methods for solving problems of mixed Boolean programming with interval data have been developed. As far as we know, the problem of

mixed Boolean programming with interval data has not yet been studied in detail.

To this end, the concepts of optimistic, pessimistic, suboptimistic and subpessimistic solutions were introduced. Using these concepts, two types of methods were proposed. Computational experiments have showed that the method of nonlinearly increasing penalty in most cases exceeds the first method. Therefore, to solve practical problems, it is necessary to solve both methods and choose the best.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the state budget research work of the Institute of Control Systems of ANAS "Development of solutions methods for solving algorithms and software for solving various classes of mixed integer programming problems" (State Registration No. 0101 Az 00736). We note that a particular case of this paper was considered by the authors in [7].

REFERENCES

1. Gary M., Johnson D. M. Vichislitelniye mashini i trudnoreshayemiye zadaci. Mir, 1982, 416 p.
2. Aho A., Hopcroft J., Ullman J. Postroyeniye i analiz vichislitelnix algoritmov. Mir, 1979, 536 p.
3. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function, *Control And Cybernetics*, 1980, Vol. 9, No. 4, pp. 189–202.
4. Roshin V. A., Semenova N. V., Sergiyenko I. V. Dekompozicionniy podxod k resheniyu nekotorix zadac celocislennoqo programirovaniya s netocnimi dannimi, *Journal Vichislitelnoy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki*, 1990, Vol. 30, No. 5, pp. 786–791.
5. Devyaterikova M. V., Kolokolov A. A., Kolosov A. P. *Algoritmi perebora L-klassov dla bulevoy zadaci o ryukzake s intervalnimi dannimi. Materiali III Vserossiyskoy konferencii "Problemi optimizacii i ekonomicheskoye prilozheniye"*. Omsk, Izd-vo OM GTU, 2006, P. 87.
6. Emelichev V. A., Podkopaev D. P. Quantitative stability analysis for vector problems of 0–1 programming, *Discrete Optimization*, 2010, No. 7, pp. 48–63.
7. Mamedov K. Sh., Mamedli N. O. Metodi postroyeniya suboptimisticheskoy i subpessimisticheskoy resheniy chastichno-Bulevoy zadaci o ranche s intervalnimi dannimi, *Izv. NAN Azerbaidjan*, 2016, No. 6, pp. 6–13.
8. Mamedov K. Sh., Mamedova A. H. Ponyatiya suboptimisticheskoy i subpessimisticheskoy resheniy i postroyeniye ix v intervalnoy zadace Bulevoqo programirovaniya, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 99–107.
9. Martello S., Toth P. Knapsack problems, Algorithm and Computers implementations. Chichester, John Wiley & Sons, 1990, 296 p.
10. Kovalev M. M. Diskretnaya optimizatsiya (celocislennoye programirovaniye). Moscow, U.R.S.S., 2003, 192 p.
11. Babayev J. A. Mamedov K. Sh., Mextiyev M. Q. Metodi postroyeniya suboptimalnix resheniy mnoqomernoy zadaci o ranche, *Journal Vichislitelnoy Matematiki i Matematicheskoy Fiziki*, 1978, Vol.28, No. 6, pp. 1443–1453.
12. Alefeld Q., Herzberger J. Vvedeniye v intervalniye vichisleniya. Translation from eng. Moscow, Mir, 1987, 360 p.
13. Toyoda Y. A simplified algorithm for obtaining approximate solutions to zero-one programming problems, *Management Science*, 1975, No. 12, pp. 1417–1427.

Received 05.03.2018.
Accepted 18.06.2018.

УДК 519. 852.6

ДВА МЕТОДА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СУБОПТИМИСТИЧЕСКОГО И СУБПЕССИМИСТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЙ ИНТЕРВАЛЬНОЙ ЗАДАЧИ ЧАСТИЧНО-БУЛЕВОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Мамедов К. Ш. – д-р физ.-мат. наук, профессор Бакинского Государственного Университета и зав. отделом Института Систем Управления НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку.

Мамедли Н. О. – докторант Института Системных Управлений НАН Азербайджана, Азербайджан, Баку.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена интервальная задача частично-Булевого программирования, имеющая многочисленные экономические применения. Объектом исследования являлась модель целочисленного программирования.

Цель работы. Разработка методов построения субоптимистического и субпессимистического решений интервальной задачи частично-Булевого программирования.

Метод. Введены два метода для построения субоптимистического и субпессимистического решений задач частично-Булевого программирования с интервальными исходными данными. Эти методы основаны на некоторой экономической интерпретации рассмотренной модели.

В первом методе введен критерий выбора неизвестных для присвоения значений, который основан по принципу максимальности прибыли на каждую единицу расхода. Поскольку коэффициенты задачи являются интервалами, выбраны две стратегии: оптимистическое и пессимистическое. В оптимистической стратегии используется идея выбора неизвестных, которая соответствует максимальности отношения соответствующей максимальной прибыли на минимальный расход. А в пессимистической стратегии использована идея максимальности отношения минимальной прибыли на максимальный расход.

Во втором методе введено понятие нелинейно-возрастающего штрафа (цены) за использование единицы оставшихся ресурсов т.е. в правой части ограниченный.

Учитывая принципы вышеуказанных первого и второго методов с использованием этого понятия штрафа (цены), разработаны методы построения субоптимистического и субпессимистического решений.

Результаты. Разработаны алгоритмы построения субоптимистического и субпессимистического решений интервальной задачи частично-Булевого программирования.

Выводы. Составлен программный комплекс для построения субоптимистического и субпессимистического решений интервальной задачи частично-Булевого программирования. Проведен ряд вычислительных экспериментов над случайными задачами различной размерности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: интервальная задача частично-Булевого программирования, оптимистическое, пессимистическое, субоптимистическое и субпессимистическое решения, верхняя и нижняя границы, погрешности, вычислительный эксперимент.

УДК 519.852.6

ДВА МЕТОДУ ДЛЯ ПОБУДОВИ СУБОПТИМІСТИЧЕСКОГО І СУБПЕССИМІСТИЧЕСКОГО РІШЕНЬ ІНТЕРВАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ ЧАСТКОВО-БУЛЕВОГО ПРОГРАМУВАННЯ

Мамедов К. Ш. – д-р фіз.-мат. наук, професор Бакинська Державного Університету та зав. від-ділом Інституту Систем Управління НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку.

Мамедлі Н. О. – докторант Інституту системного Управління НАН Азербайджану, Азербайджан, Баку.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянута інтервальна задача частково-Булевого програмування, що має численні економічні застосування. Об'єктом дослідження була модель цілочисельного програмування.

Мета роботи. Розробка методів побудови субоптимістичного і субпессимістичного рішень інтервального завдання частково-Булевого програмування.

Метод. Введено два методи для побудови субоптимістичного і субпессимістичного рішень задач частково-Булевого програмування з інтервальними вихідними даними. Ці методи засновані на деякій економічній інтерпретації розглянутої моделі.

У першому методі введений критерій вибору невідомих для присвоєння значень, який заснований за принципом максимальності прибутку на кожну одиницю витрат. Оскільки коефіцієнти завдання є інтервалами, обрані дві стратегії: оптимістичний і песимістичний. В оптимістичній стратегії використовується ідея вибору невідомих, яка відповідає максимальності відносини відповідної максимального прибутку на мінімальну витрату. А в песимістичній стратегії використана ідея максимальності відносини мінімального прибутку на максимальній витраті.

У другому методі введено поняття нелінійно-зростаючого штрафу (ціни) за використання одиниці ресурсів, що залишилися тобто в правій частині обмежень.

З огляду на принципи вищевказаних першого і другого методів з використанням цього поняття штрафу (ціни), розроблені методи побудови субоптимістичного і субпессимістичного рішень.

Результати. Розроблено алгоритми побудови субоптимістичного і субпессимістичного рішень інтервального завдання частково-Булевого програмування.

Висновки. Складено програмний комплекс для побудови субоптимістичного і субпессимістичного рішень інтервального завдання частково-Булевого програмування. Проведено ряд обчислювальних експериментів над випадковими завданнями різної розмірності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інтервальна задача частково-Булевого програмування, оптимістичне, песимістичне, субоптимістичне і субпессимістичне рішення, верхня і нижня межі, похибки, обчислювальний експеримент.

ЛІТЕРАТУРА/ЛИТЕРАТУРА

1. Гэри М. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи / М. Гэри, Д. М. Джонсон. – Мир, 1982, 416 с.
2. Ахо А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. М. Ульман. – Мир, 1979. – 536 с.
3. Libura M. Integer programming problems with inexact objective function / M. Libura // Control And Cybernetics. – 1980. – Vol. 9, № 4. – P. 189–202.
4. Рошин В. А. Декомпозиционный подход к решению некоторых задач целочисленного программирования с неточными данными / В. А. Рошин, Н. В. Семенова, И. В. Сергиенко // Журнал Вычислительной Математики и Математической Физики. – 1990. – Т. 30, № 5. – С. 786–791.
5. Девятерикова М. В. Алгоритмы перебора L-классов для булевой задачи о рюкзаке с интервальными данными / М. В. Девятерикова, А. А. Колоколов, А. П. Колосов // Материалы III Всероссийской конференции «Проблемы оптимизации и экономическое приложение». – Омск : Изд-во Ом ГТУ, 2006. – С. 87.
6. Emelichev V. A. Quantitative stability analysis for vector problems of 0-1 programming / V. A. Emelichev, D. P. Podkopaev // Discrete Optimisation. – 2010. – № 7. – P. 48–63.
7. Мамедов К. Ш. Методы построения субоптимистического и субпессимистического решений частично-Булевой задачи о ранце с интервальными данными / К. Ш. Мамедов, Н. О. Мамедли // Изв. НАН Азербайджана. – 2016. – № 6. – С. 6–13.
8. Мамедов К. Ш. Понятия субоптимистического и субпессимистического решений и построение их в интервальной задаче Булевого программирования / К. Ш. Мамедов, А. Г. Мамедова // Радиоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 99–107.
9. Martello S. Knapsack problems, Algorithm and Computers implementations / S. Martello, P. Toth. – Chichester : John Wiley & Sons, 1990. – 296 p.
10. Ковалев М. М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование) / М. М. Ковалев. – М. : УРСС, 2003. – 192 с.
11. Бабаев Дж. А. Методы построения субоптимальных решений многомерной задачи о ранце / Дж. А. Бабаев, К. Ш. Мамедов, М. Г. Мехтиев // Журнал Вычислительной Математики и Математической Физики. – 1978. – Т. 28, № 6. – С. 1443–1453.
12. Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херцбергер. – Пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 360 с.
13. Toyoda Y. A simplified algorithm for obtaining approximate solutions to zero-one programming problems / Y. Toyoda // Management Science. – 1975. – № 12. – С. 1417–1427.

МОДЕЛІ І МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ АВТОНОМНОЇ НАВІГАЦІЇ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНИХ БЕЗПІЛОТНИХ АПАРАТІВ

Москаленко В. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Москаленко А. С. – канд. техн. наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Суми, Україна.

Коробов А. Г. – аспірант кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Суми, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність теми статті полягає в тому, що питання вибору оптимальних в інформаційному та вартісному сенсах моделей і методів аналізу даних в системах автономної навігації за умов апіорної невизначеності, ресурсних та інформаційних обмежень є недостатньо дослідженим і в повній мірі досі не вирішене.

Мета статті – підвищити в інформаційному та вартісному сенсах ефективність функціонування автономної системи навігації малогабаритного безпілотного апарату на місцевості за даними від візуальних та інерційних сенсорів, що функціонує в режимах навчання та екзамєну за умов обмежених обчислювальних ресурсів та обсягів навчальної вибірки.

Методи дослідження базуються на використанні технології згорткових нейронних мереж для формування ознакового опису візуальних спостережень, алгоритмів розріджено-кодуєчого нейронного газу для навчання згорткових фільтрів, моделі опорних векторів для регресійного аналізу даних, на принципах математичної статистики та теорії інформації для побудови та оцінки функціональної ефективності класифікаційних вирішальних правил.

Результати. Розроблено нові моделі і методи інтелектуальної інформаційної технології автономної навігації для малогабаритних безпілотних апаратів, що дозволяє здійснювати навчання найбільш обчислювально трудомісткої складової системи, – екстрактора ознакового опису спостережень, – без учителя в процесі прямого поширення сигналу. При цьому запропоновано критерій вибору оптимальних в інформаційному і вартісному сенсах параметрів моделі аналізу даних і показано за результатами фізичного моделювання, що достовірність сформованих вирішальних правил прийнятна для практичного використання.

Висновки. Запропоновано архітектуру згорткової мережі і метод її навчання без вчителя для формування ознакового опису спостережень у задачі автономної навігації на основі алгоритму розріджено кодуєчого нейронного газу. Розроблено критерій вибору параметрів аналізу даних і за результатами фізичного моделювання доведено придатність до практичного використання розроблених алгоритмів навігації на невідомій місцевості. Практична цінність отриманих результатів для безпілотної авіації полягає у формуванні сучасної науково-методологічної основи проектування здатних навчатися автономних систем навігації малогабаритних апаратів, що функціонують за умов ресурсних та інформаційних обмежень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: навігація, візуальна одометрія, безпілотний літальний апарат, згорткова нейронна мережа, нейронний газ, інформаційний критерій, метод опорних векторів.

АБРЕВІАТУРИ

GPS – система глобального позиціонування;

IMU – інерційні вимірювальні одиниці (гіроскоп, акселерометр, магнітометр);

LiDaR – технологія отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища поглинання і розсіяння світла в оптично прозорих середовищах;

NED – географічна система координат, осі якої спрямовані на Північ, Схід і вздовж місцевої вертикалі;

SLAM – система одночасної локалізації та картографування;

БЛА – безпілотний літальний апарат.

НОМЕНКЛАТУРА

a_t – команда оператора щодо реакції на перешкоду;

$b_{r,i}^{(j)}$ – i -та ознака двійкового ознакового подання

j -го спостереження в r -му класі розпізнавання;

C – критерій обчислювальної трудомісткості алгоритмів;

$C_{\min}$ – мінімально можливе значення критерію трудомісткості алгоритмів системи відповідно;

D – множина базисних векторів (словник);

d_m – базисний вектор (нейрон згорткового шару);

$\bar{E}$ – усереднений за алфавітом класів інформаційний критерій ефективності навчання розпізнавати перешкоди;

$E_{\max}$ – максимально можливе значення інформаційного критерію навчання класифікатора;

G – область допустимих значень параметрів функціонування системи;

g – вектор параметрів функціонування навігаційної системи;

J – комплексний критерій ефективності інтелектуальної навігаційної системи;

K_1 – кількість послідовних кадрів зображення в сірих тонах, що інтерпретуються як канали вхідного багатоканального зображення;

K_2 – коефіцієнт кількості згорткових фільтрів у кожному шарі згорткової мережі;

L – кількість допусків на значення кожної ознаки;
 N – кількість ознак розпізнавання;
 n – кількість спостережень;
 R – потужність алфавіту класів розпізнавання;
 $T_{L,l,i}$ – нижній поріг l -го допуску на значення i -ї ознаки;
 $T_{U,l,i}$ – верхній поріг l -го допуску на значення i -ї ознаки;
 v_t – зображення кадру в момент часу t ;
 $x^{(j)}$ – ознакове подання j -го спостереження;
 x_t – локальна координата камери, отримана за даними глобальної системи позиціонування;
 y_t – локальна координата камери, отримана за даними глобальної системи позиціонування;
 z_t – локальна координата камери, отримана за даними глобальної системи позиціонування;
 Δx – відносні переміщення камери по осі x між кадрами зображення;
 Δy – відносні переміщення камери по осі y між кадрами зображення;
 Δz – відносні переміщення камери по осі z між кадрами зображення;
 α_r, β_r – помилки першого та другого роду відповідно для r -го класу розпізнавання;
 $\delta_{i,l}, \delta_{\max}$ – поточне та максимальне значення параметра l -го контрольного допуску на значення i -ї ознаки;
 ε – значення середньо-квадратичної помилки регресії при визначенні зміни координат камери в просторі;
 $\varepsilon_{\min}$ – мінімально допустиме значення помилки регресійної моделі;
 $\eta_1, \eta_0, \eta_{\text{final}}$ – поточне, початкове та кінцеве значення коефіцієнта швидкості навчання швидкості навчання;
 $\lambda_t, \lambda_0, \lambda_{\text{final}}$ – поточне, початкове та кінцеве значення розміру околу сусідства нейронів;
 $\varphi(x)$ – функцію нелінійного відображення спостереження x з вхідного простору ознак у багатовимірний простір вторинних ознак.

ВСТУП

Безпілотна авіація знаходить широке застосування у точному землеробстві, розвідувальних та рятувальних операціях, транспорті та відео зйомці. Проте на сьогоднішній день практично відсутні малогабаритні БЛА загального призначення, здатні здійснювати в автономному режимі навігацію та ідентифікацію об'єктів інтересу на місцевості. Існуючі рішення або не здатні до переналаштування і адаптації під нову прикладну задачу і умови експлуатації, або викорис-

товують дороге програмно-апаратне забезпечення і мають порівняно високу вагу.

Розробка інформаційних технологій, що забезпечують зниження вимог до апаратних ресурсів БЛА та підвищення достовірності рішень, які автономно приймаються бортовою системою, за умов нестаціонарності середовища та мінливості об'єктів інтересу є актуальною задачею. Її вирішення дозволяє зменшити вагу, вартість та розширити функціональні можливості бортової системи, що зробить БЛА конкурентоздатним на ринку безпілотної авіації. При цьому питання вибору оптимальних в інформаційному та вартісному сенсах моделей і методів аналізу даних в системах автономної навігації за умов апріорної невизначеності, ресурсних та інформаційних обмежень є недостатньо дослідженим і в повній мірі досі не вирішене.

Об'єкт дослідження – слабоформалізований процес прийняття рішень бортовою системою малогабаритного безпілотної апарату під час автономної навігації за умов ресурсних та інформаційних обмежень.

Предметом дослідження є моделі і методи інтелектуальної інформаційної технології обробки даних, прийняття рішень та оптимізації параметрів функціонування системи автономної навігації для малогабаритних безпілотної апаратів.

Мета статті – підвищити в інформаційному та вартісному сенсах ефективність функціонування автономної системи навігації малогабаритного безпілотної апарату на місцевості за даними від візуальних та інерційних сенсорів, що функціонує в режимах навчання та екзамєну за умов обмежених обчислювальних ресурсів та обсягів навчальної вибірки.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай сформовано анотований набір відеокadrів $\{c_t = \langle v_t, x_t, y_t, z_t, a_t \rangle \mid t = \overline{1, n}\}$, $a_t \in \{A_r^o \mid r = \overline{1, R}\}$, де A_r^o клас розпізнавання, що характеризує перешкоду.

Дано структурований вектор просторово-часових параметрів функціонування системи навігації БЛА, який у загальному випадку має структуру

$$g = \langle e_1, \dots, e_{\xi_1}, \dots, e_{\Xi_1}, f_1, \dots, f_{\xi_2}, \dots, f_{\Xi_2} \rangle, \quad (1)$$

$$\Xi_1 + \Xi_2 = \Xi$$

При цьому відомі обмеження на відповідні параметри функціонування:

$$R_{\xi_1}(e_1, \dots, e_{\xi_1}, \dots, e_{\Xi_1}) \leq 0; \quad R_{\xi_2}(f_1, \dots, f_{\xi_2}, \dots, f_{\Xi_2}) \leq 0.$$

Необхідно в процесі машинного навчання системи навігації визначити оптимальні значення координат вектору (1), які забезпечують максимум комплексного критерію J

$$J = \frac{\overline{E}}{E_{\max}} \cdot \frac{\varepsilon_{\min}}{\varepsilon} \cdot \frac{C_{\min}}{C}, \quad (2)$$

$$g^* = \arg \max_g \{J(g)\}. \quad (3)$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У працях [1, 2] досліджуються методи глобального позиціонування, ґрунтовані на комплексному аналізі даних від GPS та IMU з використанням розширеного фільтра Калмана. Даний підхід дозволив компенсувати недоліки обох сенсорних систем, однак визначення місцезнаходження всередині залізобетонних будівель чи при несприятливих погодних умовах залишається проблематичним. Крім того точність глобального позиціонування складає декілька метрів, що ускладнює реалізацію навігації в складі рою чи на місцевості з перешкодами. У зв'язку з цим багато досліджень спрямовано на підвищення ефективності і надійності GPS/IMU навігації за рахунок використання додаткових сенсорних систем, найбільш інформативною з яких є відеокамери БЛА [3].

Одним із сучасних підходів до вирішення задачі навігації на основі аналізу зображень, відзнятих з бортової відеокамери, є використання алгоритмів співставлення схожих ознак (Feature-Based Navigation) або контрольних точок місцевості [4]. Даний підхід ґрунтований на порівнянні поточних зображень з попередніми еталонними зображеннями, як правило, отриманими, коли GPS сигнал був гарантовано коректним. Система порівнює місце схожих ознак отриманих зображень (для яких в бортовій пам'яті можуть бути записані координати), щоб з їх допомогою визначити місцезнаходження БЛА. Однак такий підхід потребує наявності бази еталонних зображень і може бути непридатним в ситуаціях необхідності оперативної реакції на зміни зовнішньої обстановки і прийняття рішень в реальному темпі часу.

У працях [3, 5] розробляються методи візуальної одометрії, де положення апарату оцінюється покроково залежно від того, як змінюються зображення, отримані з відеокамери під часу руху БЛА у навколишньому середовищі. Для того, щоб візуальна одометрія ефективно працювала потрібні достатня освітленість, статичне середовище, насичена текстура та наявність достатнього перекриття послідовних кадрів з метою відстеження спільних ознак на різних кадрах зображення. Для навігації у невідомій місцевості у працях [6, 7] розвивається технологія SLAM для одночасної локалізації та картографування, де побудована карта дозволяє обмежити помилку оцінки положення БЛА. При цьому врахування у системах візуальної одометрії чи SLAM інформації від IMU дозволяє зменшити помилку викликану нестатичними елементами середовища. Проте побудована в SLAM 3D-структура часто є неефективною в середовищах, де відсутні відстежувані ознаки (наприклад, стіни). SLAM, ґрунтований на стереозорі для оцінки глибини, також має низьку продуктивність у регіонах без текстури та може постраждати від дзеркальних відбитків [7]. Крім того, сучасні реалізації SLAM та візуальної одометрії є досить трудомісткими і їх запуск на слабких обчислювальних пристроях може призвести до обмежених можливостей у реальному темпі часу та неадекватних результатів.

© Москаленко В. В., Москаленко А. С., Коробов А. Г., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-8

Наявність накопичених відеоданих спостереження полегшує задачу розробки навігаційної системи. Отримані дані можуть бути використані для навчання багатопланових нейронних мереж вирішувати задачі визначення координат та уникнення перешкод. У працях [8, 9] використовувалися згорткові нейронні мережі для навігації за зображеннями стерео камери, однак більшість загальнодоступних безпілотних апаратів мають лише одну вбудовану камеру, а навчання згорткової мережі потребує великих обсягів розмічених зразків та обчислювальних ресурсів, що робить подібні рішення непрактичними. Проте запропоновані у праці [10] методи навчання розріджено-кодуючих згорткових фільтрів без вчителя дозволяє зменшити вимоги до обсягу розмічених зразків та зменшити обчислювальне навантаження. При цьому запропоновані у працях [11, 12] методи навчання з учителем, ґрунтовані на методі опорних векторів та інтелектуальній інформаційно-екстремальній технології дозволяють побудувати обчислювально ефективні вирішальні правила з прийнятною для практичного використання точністю за вибірками обмеженого обсягу.

Таким чином, найбільш перспективним напрямком розвитку систем навігації автономних малогабаритних БЛА є використання згорткових нейронних мереж для аналізу візуальної інформації. При цьому одним із шляхів зменшення обчислювального навантаження на бортову систему під час навчання та екзамени є реалізація методів навчання розріджено-кодуючих згорткових фільтрів без вчителя для екстракції ознакового опису спостережень та методів інтелектуальної інформаційно-екстремальної технології і опорних векторів.

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Для формування вхідного математичного опису інтелектуальної інформаційної системи використовуються навчальні набори KITTI Vision Dataset [9], що містять як послідовність кадрів зображення з відеокамери, що рухається, так і дані про переміщення за трьома координатами, виміряні з використанням GPS та LiDaR [9]. Для навчання моделі дані про переміщення переводяться в локальну систему координат NED та визначаються відносні переміщення камери Δx , Δy , Δz між сусідніми кадрами відеозображення.

Схема інтелектуальної навігаційної системи малогабаритного БЛА показана на рис. 1.

Для екстракції ознакового опису візуальних спостережень пропонується використовувати згорткову нейронну мережу, на вхід якої подається багатоканальне зображення, утворене вибіркою серії послідовних відеокadrів у сірих тонах. Для формування високорівневого ознакового опису спостережень згорткова мережа має багатопланову структуру, фільтри якої навчаються без вчителя послідовно шар за шаром. Для прогнозування перешкод руху і вироблення відповідної реакції використовується інформаційно-екстремальний класи-

фікатор, що навчається з учителем за навчальними зразками, закодованими відповідним ознаковим описом. Регресійна модель в рамках методу опорних векторів використовується для відображення візуальних ознак та даних від інерційних сенсорів у відповідну оцінку переміщення камери в просторі.

На рис. 2 показана 4-х шарова архітектура згорткової нейронної мережі, на першому шарі якої знаходяться тривимірні фільтри різних масштабів: $5 \times 5 \times K_1$, $3 \times 3 \times K_1$ та $1 \times 1 \times K_1$. Кількість фільтрів регулюється параметром K_2 . Для збереження однакового розміру карт ознак, сформованих різномасштабними фільтрами, використовується техніка доповнення нулями [9]. У другому та третьому шарах крок сканування карти ознак різномасштабними фільтрами дорівнює 3 та 2 відповідно.

На рис. 2 не показано функцію активації, що застосовується до кожної карти ознак. Для обчислення активації нейронів пропонується використовувати метод ортогонального узгодженого переслідування (Orthogonal Matching Pursuit) та функцію $y = \max(0, x)$, проте для уникнення втрат інформації можна подвоїти карту ознак використовуючи функцію вигляду $y = \{\max(0, x), \max(0, -x)\}$.

Навчання без вчителя згорткових фільтрів пропонується здійснювати за алгоритмом розріджено-кодууючого нейронного газу, що розглядався і досліджувався у праці [10]. Вхідними даними для алгорит-



Рисунок 1 – Узагальнена схема інтелектуальної навігаційної системи малогабаритного БЛА

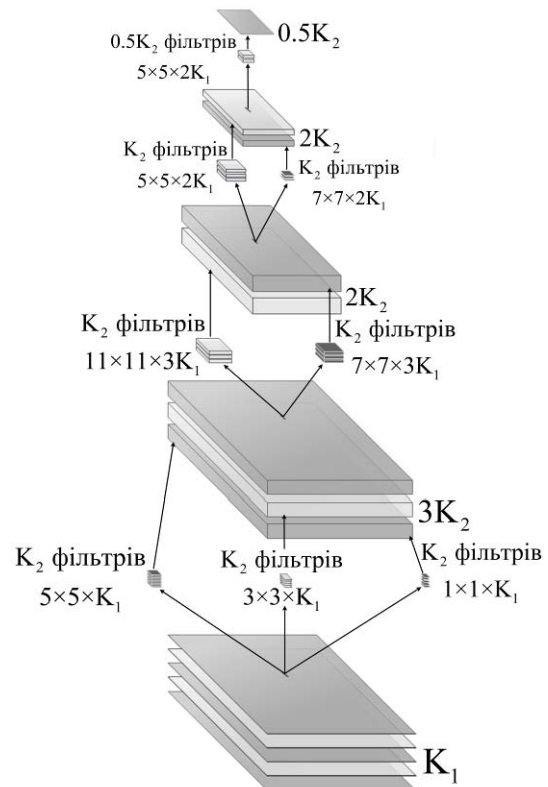


Рисунок 2 – Архітектура згорткової мережі для формування ознакового опису візуальних спостережень в навігаційній системі БЛА

му розріджено-кодууючого нейронного газу є потужність словника базисних векторів M , розмірність простору ознак N , $\lambda_0, \lambda_{\text{final}}$ – початкове та кінцеве значення коефіцієнта розміру околу сусідів, $\eta_0, \eta_{\text{final}}$ – початкове та кінцеве значення коефіцієнта швидкості навчання. Розглянемо основні кроки алгоритму:

- 1) Ініціалізація словника базисних векторів $D = (d_1, \dots, d_M)$ випадковими числами з рівномірного розподілу.
- 2) Ініціалізація лічильника навчальних векторів $t := 1$.
- 3) Вибір випадкового вектору x з множини навчальних векторів X .
- 4) Нормалізація векторів із словника $D = (d_1, \dots, d_M)$ шляхом приведення до одиничної довжини.
- 5) Обчислення поточних значень коефіцієнта розміру околу сусідів λ_t та швидкості навчання η_t :

$$\lambda_t := \lambda_0 (\lambda_{\text{final}} / \lambda_0)^{t/t_{\text{max}}};$$

$$\eta_t := \eta_0 (\eta_{\text{final}} / \eta_0)^{t/t_{\text{max}}}.$$

- 6) Обчислення міри схожості вхідного вектору x до базисних векторів $d_k \in D$ для їх сортування

$$-(d_{i_0}^T x)^2 \leq \dots \leq -(d_{i_k}^T x)^2 \leq \dots \leq -(d_{i_{M-1}}^T x)^2.$$

7) Оновлення координат базисних векторів $d_{i_k} \in D$ за правилом Ойа [10]

$$d_{i_k} := d_{i_k} + \eta_t \exp(-k / \lambda_t) y(x - y d_{i_k}), \\ y := c_{i_k}^T x, \quad k = \overline{0, M-1}.$$

8) Якщо $t < t_{\max}$, то інкремент лічильника $t := t + 1$ та перехід до кроку 3.

Інформаційно-екстремальний класифікатор, що здійснює оцінку перешкоди, здійснює адаптивне квантування ознакового опису на основі алгоритму грубого двійкового кодування навчальної матриці $\{x_{r,i}^{(j)} \mid i = \overline{1, N}; j = \overline{1, n_r}; r = \overline{1, R}\}$, що полягає у порівнянні значення i -ї ознаки з відповідним нижнім $T_{L,l,i}$ та верхнім $T_{U,l,i}$ межами l -го несиметричного поля контрольних допусків, які розраховуються за формулами

$$T_{L,l,i} = x_{i,\max} \left[1 - \frac{\delta_{i,l}}{\delta_{\max}} \right], \quad T_{U,l,i} = x_{i,\max}, \quad l = \overline{1, L}.$$

Формування бінарної навчальної матриці $\{b_{r,i}^{(j)} \mid i = \overline{1, N \cdot L}; j = \overline{1, n_r}; r = \overline{1, R}\}$ здійснюється за правилом

$$b_{r,l \cdot N + i}^{(j)} = \begin{cases} 1, & \text{if } T_{L,l,i} \leq x_{r,i}^{(j)} \leq T_{U,l,i}; \\ 0, & \text{else.} \end{cases}$$

Обчислення значень координат двійкового еталонного вектору x_m , відносно якого відбувається побудова в радіальному базисі контейнерів класів, здійснюється за правилом

$$b_{r,l \cdot N + i} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \frac{1}{n_r} \sum_{j=1}^{n_r} b_{r,l \cdot N + i}^{(j)} > \frac{1}{n} \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^{n_r} b_{r,l \cdot N + i}^{(j)}; \\ 0, & \text{інакше.} \end{cases}$$

Як критерій ефективності машинного навчання класифікатора розглядається нормована модифікація інформаційної міри Кульбака [13]:

$$E_r = \frac{1 - (\alpha_r + \beta_r)}{\log_2(2 + \zeta) + r \log_2 10} \cdot \log_2 \left[\frac{2 - (\alpha_r + \beta_r) + \zeta}{(\alpha_r + \beta_r) + \zeta} \right], \quad (4)$$

де α_r, β_r – помилки першого та другого роду класифікаційних рішень щодо належності вхідних векторів до класу A_r^o ; ζ – будь-яке мале додатне число, яке вводиться для уникнення невизначеності при діленні на нуль.

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 будеться $M \cdot (M-1) / 2$ двохкласових класифікаторів [12]. У режимі екзамєну рішення про належність вектору-реалізації x одному з класів алфавіту $\{A_r^o\}$ приймається за геометричною функцією належності, описаною в праці [12].

Для навчання регресійної функції $y = f(x)$, вихідна змінна $y^{(t)} \in R$ якої відповідає зміні координат камери $\Delta x, \Delta y$, або Δz , використовується набір навчальних даних $(x^{(t)}, y^{(t)})_{t=1}^n$, де $x^{(t)} \in R^N$, що складається з візуальних ознак та вимірів інерційних сенсорів. Регресійна функція є лінійною у вторинному просторі ознак і має наступний вигляд

$$f(x) = (\omega, \varphi(x)) + b, \quad (5)$$

$$\varphi: R^n \rightarrow H, \quad \omega \in H. \quad (6)$$

де ω і b є коефіцієнтами, що знаходяться під час навчання; H – багатовимірний простір вторинних ознак.

Коефіцієнти ω і b можуть бути знайдені шляхом мінімізації наступного виразу:

$$\min R(\omega, \xi, \xi^*) = \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + \Psi \sum_{t=1}^n (\xi_t^* + \xi_t) \quad (7)$$

$$y^{(t)} - (\omega, \varphi(x)) - b \leq \varepsilon + \xi_t^* \\ (\omega, \varphi(x)) + b - y^{(t)} \leq \varepsilon + \xi_t \quad (8) \\ \xi_t^*, \xi_t \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad \varepsilon \geq 0.$$

де Ψ – коефіцієнт регуляризації; ξ, ξ^* – змінні нев'язки, що вимірюють похибку знизу та зверху відповідно; ε – нечутливість функції втрат, яка означає, що якщо $f(x)$ знаходиться в діапазоні $y^{(t)} \pm \varepsilon$, то помилка не враховується.

Оптимізаційна задача (7) є задачею квадратичного програмування з лінійними обмеженнями, яка може бути вирішена введенням множників Лагранжа і застосуванням умов Коруша-Куна-Такера (Karush-Kuhn-Tucker) для вирішення дуальної задачі [11]:

$$\min R(v, v^*) = \sum_{t=1}^n (v_t^* - v_t) (v_j^* - v_j) K(x^{(t)}, x^{(j)}) + \quad (9)$$

$$+ \varepsilon \sum_{t=1}^n (v_t^* + v_t) - \sum_{t=1}^n y^{(t)} (v_t^* - v_t), \\ \sum_{t=1}^n (v_t^* + v_t) = 0, \quad (10)$$

$$0 \leq v_t, v_t \leq \frac{\Psi}{l}, \quad t = 1, 2, \dots, n,$$

де v_i і v_i^* є множниками Лагранжа, асоційовані з обмеженнями (10); $K(x^{(t)}, x^{(j)}) = \varphi(x^{(t)}) \cdot \varphi(x^{(j)})$.

Типовий приклад ядерної функції є поліноміальне ядро і Гаусове ядро. У загальному випадку регресійна функція має вигляд

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (v_i^* - v_i) K(x^{(i)}, x) + b.$$

В алгоритмі навчання регресійної моделі на опорних векторах не всі навчальні зразки можуть стати опорними. Лише вектори, що знаходяться на границі мають ймовірність стати опорними. Граничний вектор не обов'язково є опорним, проте опорний вектор обов'язково повинен бути граничним. Оскільки частка опорних векторів в повному наборі зразків є досить малою, то вибір для навчання граничних векторів, що можуть стати опорними, дозволяє знизити ресурсні потреби алгоритму. Інкрементальне навчання регресійної моделі на опорних векторах можна реалізувати шляхом визначення опуклої межі дискретних точок при виборі множини граничних векторів як множини навчальних. При цьому опукла межа дискретних точок є межею, що може оточувати всі дискретні точки, які, як правило, сформовані як найвіддаленіші точки через з'єднання. Тому після обробки першої підвибірki сформовані опорні вектори порівнюються з векторами наступних підвбірок за кутом нахилу, для формування множини граничних векторів, як векторів максимального нахилу. Кожен крок такого доповнення може супроводжуватися перенавчанням.

Таким чином, запропонована модель екстрактора ознак дозволяє здійснити послідовне пошарове навчання без вчителя як на розмічених так і нерозмічених даних і сформувати високорівневий ознаковий опис спостережень, що враховує просторово-часові закономірності, а запропоновані методи машинного навчання з учителем є невибагливими до ресурсів і здатними забезпечити прийнятну для практичного застосування достовірність вирішальних правил навігаційної системи БЛА.

4 КСПЕРИМЕНТИ

Для навчання екстрактора ознак використовуються як навчальні, так і тестові відеопослідовності набору KITTI Vision Dataset без врахування будь-яких анотацій. Для зменшення обчислювальної трудомісткості алгоритмів зображення стискають до роздільної здатності 200x200 пікселів. При цьому процедура повторюється для різних значень параметра K_1 та K_2 , що впливають як на інформативність ознакового опису, так і на обчислювальну трудомісткість. Трудомісткість C пропонується вимірювати кількістю операцій Mul та Add, що виконуються під час згортки фільтрів з зображенням чи картою ознак. Для архітектури мережі, показаної на рис. 2, трудомісткість може бути обчислена так

$$C = K_2(2706472K_1 + 4438784K_2). \quad (11)$$

Для класифікатора та регресора оптимальна конфігурація згорткового екстрактора може відрізнитися, оскільки вони відповідають за різні задачі. Тому компромісний варіант з точки зору точності вирішальних правил і обчислювальної трудомісткості екстрактора візуальних ознак обирається за комплексним критерієм (2).

У регресійній моделі на опорних векторах пропонується використовувати радіально-базисне ядро, формула якого має вигляд

$$K(x^{(i)}, x^{(j)}) = \exp(\gamma \|x^{(i)} - x^{(j)}\|^2), \gamma \geq 0,$$

де γ – коефіцієнт ядра, значення якого за замовчуванням дорівнює $\gamma = 1/N$.

Алфавіт класів $\{A_r^o\}$ розпізнавання, що описують характерні перешкоди і відповідні команди реакції, має потужність рівну $R=5$. Перший клас розпізнавання A_1^o характеризує нормальний стан слідування вздовж заданої траєкторії. Класи A_2^o та A_3^o відповідають повороту вліво на 45 та 90 градусів відповідно. Класи A_4^o та A_5^o відповідають повороту вправо на 45 та 90 градусів відповідно. Обсяг навчальних зразків кожного класу становить $n_r = 500$.

Оптимізація параметрів поля контрольних допусків $\{\delta_{m,l,i}\}$ та інших генотипних параметрів для інформаційно-екстремального класифікатора полягає в пошуку екстремуму функції критерію (4) 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 [12, 13].

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. 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 критерію ефективності навчання (4). 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 $Gbest$. При цьому задано такі параметри настройки популяційного алгоритму: максимальна швидкість частинок $V_{max,i} = 2$, константи прискорення частинок $c_1 = c_2 = 1$, кількість агентів рою $n_a = 100$, коефіцієнт інерції $w = 0,95$ та кількість ітерацій $K_{ITER} = 3000$.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для виявлення тенденції зміни усереднених значень часткових та комплексного критерію при зростанні параметрів K_1 та K_2 , які впливають на розмір згорткового екстрактора (рис. 2), було здійснено фізичне моделювання для трьох фіксованих значень кожного з цих параметрів (табл. 1).

Таблиця 1 – Залежність часткових та комплексного критерію від параметрів екстрактора ознакового опису K_1 та K_2

K_1	K_2	$\bar{E} / E_{\max}$	$\varepsilon_{\min} / \varepsilon$	$C_{\min} / C$	J
3	4	0,083	0,112	1,000	0,009296
5	4	0,101	0,188	0,827	0,015703
7	4	0,098	0,200	0,705	0,013818
3	8	0,28	0,688	0,297	0,057214
5	8	0,29	0,756	0,264	0,057879
7	8	0,29	0,775	0,238	0,053491
3	16	0,39	0,968	0,082	0,030957
5	16	0,55	1,000	0,077	0,04235
7	16	0,51	1,000	0,072	0,03672

Аналіз табл. 1 показує, що збільшення значень параметрів K_1 та K_2 у загальному випадку призводить до зростання достовірності і обчислювальної трудомісткості вирішальних правил класифікатора та регресора. При цьому збільшення параметра K_1 мало впливає на ефективність класифікатора внаслідок зниження ефективності ройового пошуку при значному зростанні розмірності простору ознак, в той час як помилка регресії в рівній мірі чутлива до значення K_1 та K_2 . Однак враховуючи те, що достовірність вирішальних правил росте повільніше за обчислювальну трудомісткість при зростанні K_1 та K_2 , то компромісний варіант обирається за значенням комплексного критерію J . Тобто оптимальними вважаємо такі значення параметрів $K_1^* = 5$ та $K_2^* = 8$.

При оптимальній конфігурації екстрактора ознакового опису усереднене значення інформаційного критерію функціональної ефективності дорівнює $\bar{E} = 0,29$, при якій точність за навчальною матрицею становить 95,2%, а точність за тестовою матрицею становить 94%. Кількість допусків на кожну ознаку розпізнавання дорівнює $L=3$ і обирається як мінімальне значення, при якому інформаційний критерій (4) за тестовою матрицею перестає зростати. На рис. 3 показано графік зміни усередненого інформаційного критерію ефективності (4) від кількості ітерацій ройового пошукового алгоритму.

Аналіз рис. 3 показує, що вже з 1000-ї ітерації зростання інформаційного критерію (4) уповільнилося, а з 2500-ї ітерації майже не змінювалося. Така динаміка зміни критерію свідчить про те, що подальше зростання інформаційного критерію можливе лише при підвищенні інформативності ознакового опису шляхом збільшення K_1 та K_2 , або удосконалення структури екстрактора (рис. 2).

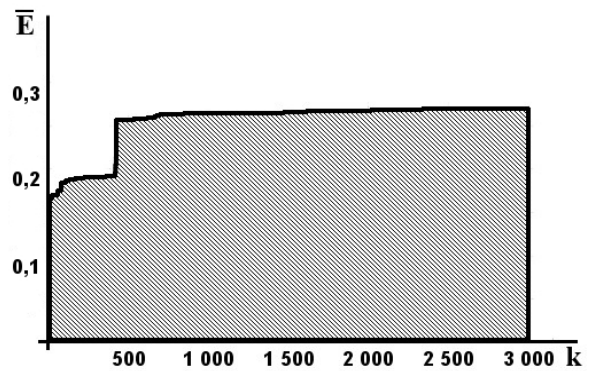


Рисунок 3 – Графік залежності інформаційного критерію (4) від кількості ітерацій ройового алгоритму оптимізації параметрів контрольних допусків на значення ознак розпізнавання

Таким чином, запропонована модифікація згорткової нейронної мережі дозволяє сформувати ознаковий опис спостережень, придатний для задач навігації.

При цьому, зростання інформаційного критерію класифікатора корелює зі зменшенням помилки регресії, тому інформаційний критерій ефективності навчання класифікатора може використовуватися для оптимізації параметра екстрактора K_2 , який впливає на кількість фільтрів в кожному шарі. Однак вибір параметра K_1 , що характеризує глибину ознакового опису в часі, слід здійснювати з урахуванням вимог до точності регресійної моделі для оцінки переміщення камери. Збільшення параметрів K_1 та K_2 обмежується зростанням обчислювальної складності, тому подальші удосконалення запропонованих моделей і методів полягають в удосконаленні архітектури згорткової мережі.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Для наглядної оцінки ефективності машинного навчання навігаційної системи можна порівняти еталонну траєкторію, виміряну за допомогою GPS та LiDaR, з реконструйованою траєкторією, побудованою з використанням навченої моделі аналізу даних. На рис. 4а показано еталонну траєкторію (пунктирна лінія) та реконструйовану траєкторію (суцільна лінія), побудовану за запропонованими алгоритмами та тестовими вхідними даними з бази КІТТІ [9]. На рис. 4б показано результати аналогічного експерименту, але з використанням моделі, запропонованої у праці [9].

Аналіз рис. 4 показує, що точність реконструкції траєкторії в обох випадках є прийнятною для практичного використання і суттєво не відрізняється, однак у розробленій моделі аналізу даних набагато менше параметрів і є можливість до навчання без вчителя без використання обчислювально трудомісткого алгоритму градієнтного спуску.

Для оцінки точності класифікаційних вирішальних правил під час розпізнавання характеру перешкоди та вибору реакції на неї на рис. 5 показано графіки залежності інформаційного критерію ефективності навчання (4) від радіусу контейнера кожного з класів розпізнавання алфавіту $\{A_i^o\}$.

Аналіз рис. 5 показує, що клас A_1^0 має безпомилкове за навчальною вибіркою радіально-базисне вирішальне правило, а значення інформаційного критерію вирішальних правил решти класів не досягає граничного значення, однак точність вирішальних правил кожного класу за тестовою вибіркою перевищує 90%. Тому пропуск перешкоди чи хибне спрацювання на поточному кадрі можуть бути компенсовані при правильному розпізнаванні наступних кадрів відеопотоку.

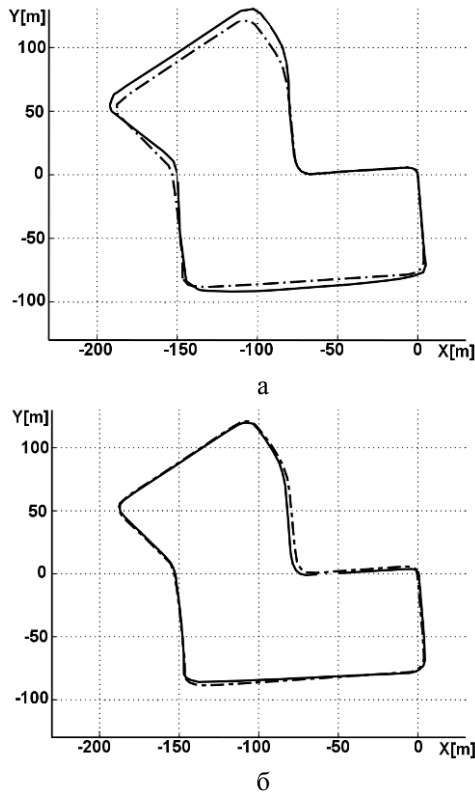


Рисунок 4 – Еталонна та реконструйована траєкторії:
а – розроблена модель; б – модель, запропонована у праці [9]

Таким чином, фізичне моделювання показало, що запропоновані моделі і методи інформаційної технології аналізу даних дозволяють реалізувати прийнятну для практичного використання систему автономної навігації малогабаритних БЛА на відомій місцевості, оскільки навчання і тестування відбувалося за даними однієї і тієї ж бази КІТТІ [8, 9].

ВИСНОВКИ

1. Наукова новизна одержаних результатів:

- вперше запропоновано модель автономної системи навігації малогабаритного БЛА, складовими частинами якої є згортковий екстрактор ознак, який навчається без вчителя, регресор на опорних векторах, який навчається інкрементально з вчителем за даними від візуальних та інерційних сенсорів, та інформаційно-екстремальний класифікатор перешкод, який навчається з учителем командам реакції на перешкоди, що дозволяє знизити вимоги до обчислювальних ресурсів;
- вперше запропоновано модель 4-х шарової згорткової мережі, яка приймає на вхід ряд послідовних кадрів, що інтерпретуються як канали одного зображення і ска-

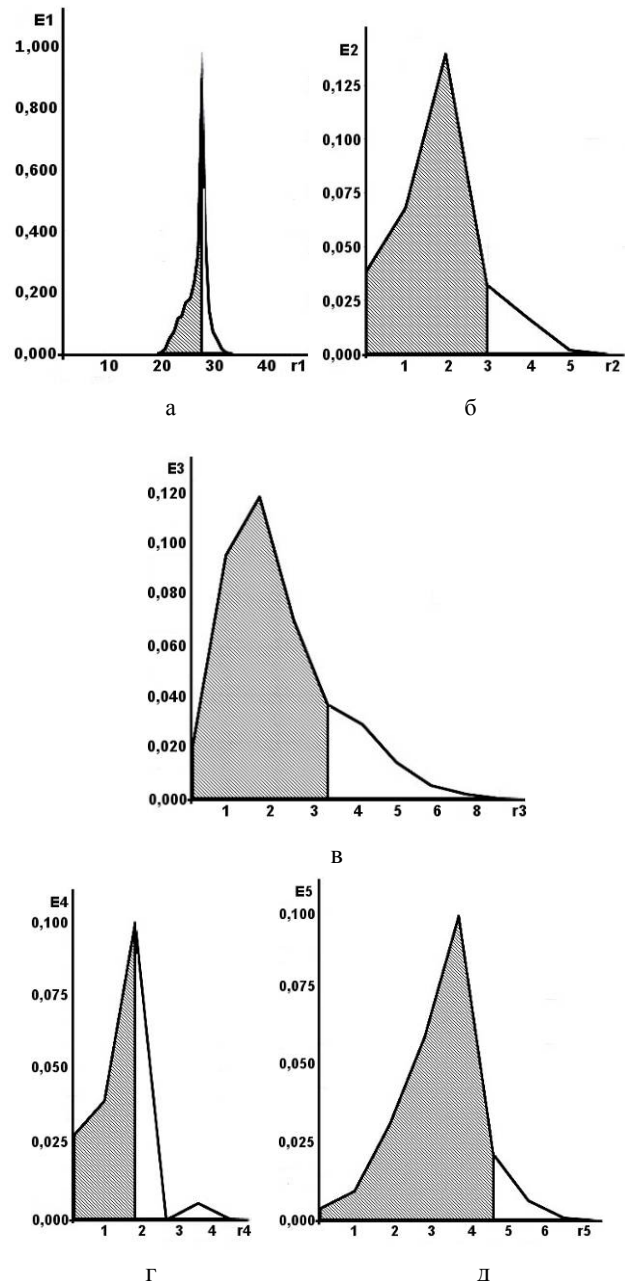


Рисунок 5 – Залежність інформаційного критерію ефективності навчання класифікатора від радіусів контейнерів

класів : а – клас A_1^0 ; б – клас A_2^0 ;
в – клас A_3^0 ; г – клас A_4^0 ; д – клас A_5^0

нуються різномасштабними фільтрами, та метод навчання згорткових фільтрів без вчителя на основі розріджено кодуемого нейронного газу, що дозволяє здійснювати навчання в процесі прямого поширення сигналу без використання методу зворотного поширення помилки;

– удосконалено метод оцінки ефективності моделі аналізу даних у задачі навігації шляхом мультиплікативної згортки частинних критеріїв, що дозволяє обрати оптимальні в інформаційному та вартісному сенсах параметри функціонування системи.

2. Практична цінність отриманих результатів для безпілотної авіації полягає у формуванні сучасної науково-методологічної основи проектування здатних навчатися автономних систем навігації малогабаритних БЛА, що функціонують за умов ресурсних та інформаційних обмежень. При цьому результати імітаційного моделювання підтверджують високу ефективність отриманих вирішальних правил при визначенні переміщення в просторі та розпізнаванні перешкод за даними відеопотоку та інерційних сенсорів.

ПОДЯКИ

Робота виконана на базі лабораторії інтелектуальних систем кафедри комп'ютерних наук Сумського державного університету при фінансовій підтримці МОН України в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи ДР № 0117U003934.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРИ

1. Wang S. An Accurate GPS-IMU/DR Data Fusion Method for Driverless Car Based on a Set of Predictive Models and Grid Constraints. *Sensors* [Electronic resource] / S. Wang, Z. Deng, G. Yin // Basel, Switzerland : Multidisciplinary Digital Publishing Institute. – 2016. – Vol. 16(3). – P. 280–293. DOI 10.3390/s16030280.
2. Suwandi B. Low-cost IMU and GPS fusion strategy for apron vehicle positioning. / B. Suwandi, T. Kitasuka, M. Aritsugi // TENCON 2017 IEEE Region 10 Conference, 2017, Penang, Malaysia, 5–8 Nov. 2017 : proceedings. – P. 449–454. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8227906.
3. Mary B. A. Pose Estimation of a Mobile Robot Based on Fusion of IMU Data and Vision Data Using an Extended Kalman Filter. [Electronic resource] / B. A. Mary, P. H. Gerhard // *Sensors*. – 2017. – Vol. 17(10). – P. 2164. DOI: 10.3390/s17102164.
4. A Feature Based Navigation System for an Autonomous Underwater Robot / J. Folkesson, J. Leederkerken, R. Williams, A. Patrikalakis // In: Laugier C., Siegwart R. (eds) *Field and Service Robotics*. Springer Tracts in Advanced Robotics. – Springer : Berlin, Heidelberg. – 2008. – Vol. 42. – P. 105–114. DOI 10.1007/978-3-540-75404-6_10.
5. Predictive monocular odometry (PMO): What is possible without RANSAC and multiframe bundle adjustment? / N. Fanani, A. Stürck, M. Ochs, H. Bradler, R. Mester // *Image and Vision Computing volume*. – 2017. – Vol. 68. – P. 3–13 DOI: 10.1016/j.imavis.2017.08.002.
6. Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age / C. Cadena, L. Carlone, H. Carrillo et al // *IEEE Transactions on Robotics*. – 2016. – Vol. 32. – No. 6. – P. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754.
7. Dorian G.-L. Real-time monocular object SLAM / G.-L. Dorian, S. Marta, D. T. Juan, J.M.M. Montiel // *Robotics and Autonomous Systems*. – 2016. – Vol. 75. – I. PB. – P. 435–449. DOI: 10.1016/j.robot.2015.08.009.
8. Ayoul Th. UAV Navigation above Roads Using Convolutional Neural Networks [Electronic resource] / Th. Ayoul, T. Buckley, F. Crevier // Available from: <http://cs231n.stanford.edu/reports/2017/pdfs/553.pdf>.
9. Mohanty V. DeepVO : A Deep Learning approach for Monocular Visual Odometry [Electronic resource] / V. Mohanty // *Computer Vision and Pattern Recognition*. – 2016. Available from: <https://arxiv.org/pdf/1611.06069.pdf>.
10. Labusch K. Sparse Coding Neural Gas: Learning of Overcomplete Data Representations / K. Labusch, E. Barth, T. Martinetz // *Neurocomputing*. – 2009. – Vol. 72. – I. 7–9. – P. 1547–1555. DOI:10.1016/j.neucom.2008.11.027.
11. Xu H. A New SVR Incremental Algorithm Based on Boundary Vector [Electronic resource] / H. Xu, R. Wang, K. Wang // *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE 2010)*, Wuhan, China 10–12 Dec. 2010 : proceedings. – Zürich : Springer, 2010. – P. 145–149. DOI: 10.1109/CiSE.2010.5676955.
12. Moskalenko V. V. Information-extreme algorithm of the system for recognition of objects on the terrain with optimization parameter feature extraction. / V. V. Moskalenko, A. G. Korobov. // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2017. – No 2. – P. 38–45. DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-7.
13. Москаленко В. В. Інтелектуальна система підтримки прийняття рішень для функціонального діагностування на гамма-камері / В. В. Москаленко, А. С. Риждова, А. С. Довбиш // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2015. – № 4. – С. 52–58. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-4-8.

Article was submitted 23.03.2018.

After revision 02.04.2018.

УДК 004.032.26:007.052:629.7.072

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ АВТОНОМНОЙ НАВИГАЦИИ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНЫХ БЕСПИЛОТНЫХ АППАРАТОВ

Москаленко В. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук, Сумской государственной университет, Сумы, Украина.

Москаленко А. С. – канд. техн. наук, ассистент кафедры компьютерных наук, Сумской государственной университет, Сумы, Украина.

Коробов А. Г. – аспирант кафедры компьютерных наук, Сумской государственной университет, Сумы, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность темы статьи заключается в том, что вопрос выбора оптимальных в информационном и стоимостном смыслах моделей и методов анализа данных в системах автономной навигации в условиях априорной неопределенности, ресурсных и информационных ограничений недостаточно исследованным и в полной мере до сих пор не решен. Цель статьи – повысить в информационном и стоимостном смыслах эффективность функционирования автономной системы навигации малогабаритного беспилотного аппарата на местности по данным от визуальных и инерционных сенсоров, работает в режимах обучения и экзамена в условиях ограниченных вычислительных ресурсов и объемов обучающей выборки.

Методы исследования базируются на использовании технологии сверточных нейронных сетей для формирования признаковового описания визуальных наблюдений, алгоритмов разреженно-кодирующего нейронного газа для обучения сверточных фильтров, модели опорных векторов для регрессионного анализа данных, на принципах математической статистики и теории информации для построения и оценки функциональной эффективности классификационных решающих правил.

Результаты. Разработаны новые модели и методы интеллектуальной информационной технологии автономной навигации для малогабаритных беспилотных аппаратов, позволяет осуществлять обучение наиболее вычислительно трудоемкой составляющей системы, – экстрактора признаковового описания наблюдений, – без учителя в процессе прямого распространения сигнала. При этом предложен критерий выбора оптимальных в информационном и стоимостном смыслах параметров модели анализа данных и показано по результатам физического моделирования, что достоверность сформированных решающих правил приемлемая для практического использования.

© Москаленко В. В., Москаленко А. С., Коробов А. Г., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-8

Выводы. Предложена архитектура сверточной сети и метод ее обучения без учителя для формирования признакового описания наблюдений в задаче автономной навигации на основе алгоритма разреженно кодирующего нейронного газа. Разработан критерий выбора параметров анализа данных и по результатам физического моделирования доказано пригодность к практическому использованию разработанных алгоритмов навигации на неизвестной местности. Практическая ценность полученных результатов для беспилотной авиации заключается в формировании современной научно-методологической основы проектирования обучающихся автономных систем навигации малогабаритных аппаратов, функционирующих в условиях ресурсных и информационных ограничений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: навигация, визуальная одометрия, беспилотный летательный аппарат, сверточная нейронная сеть, нейронный газ, информационный критерий, метод опорных векторов.

UDC 004.032.26:007.052:629.7.072

MODELS AND METHODS OF INTELLECTUAL INFORMATION TECHNOLOGY OF AUTONOMOUS NAVIGATION FOR COMPACT DRONES

Moskalenko V. V. – PhD, Associate professor of Computer Science department, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

Moskalenko A. S. – PhD, Teaching assistant of Computer Science department, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

Korobov A. G. – postgraduate student of Computer Science department, Sumy State University, Sumy, Ukraine.

ABSTRACT

Context of this article topics is that the issues of choosing the optimal in information and cost sense of models and methods of data analysis in autonomous navigation systems under a priori uncertainty, resource and information constraints are not sufficiently investigated and are still not fully resolved.

Objective – to increase the efficiency of the autonomous navigation system of a compact drone on the terrain, based on data from visual and inertial sensors, operating in training and exam modes in the conditions of limited computing resources and the volume of the training sample, in the information and value sense.

Methods of a research are based on the usage of technology of convolutional neural networks for the formation of a feature representation of visual observations, sparse-coding neural gas algorithms for the training of convolutional filters, the model of support vectors for regression analysis of data, on the principles of mathematical statistics and information theory for constructing and evaluating the functional efficiency of classification decision rules.

Results: new models and methods of information intelligent technology of autonomous navigation for compact drones have been developed, allowing the training of the most computationally labor-intensive component of the system, the feature extractor from observation, in unsupervised manner in the process of direct propagation of the signal. In this case, the criterion for choosing the optimal parameters in information and cost sense for model of data analysis is proposed, and it is shown by the results of physical modeling that the validity of the formed decision rules is acceptable for practical use.

Conclusions. The architecture of the convolutional neural network and the method of its unsupervised learning for the formation of a feature representation of observations in the autonomous navigation problem based on the algorithm of sparse coding neural gas is proposed. The criterion for choosing data analysis parameters is developed and according to the results of physical modeling, the suitability for practical use of developed algorithms of navigation on unknown terrain is proved. The practical value of the results obtained for unmanned aviation is to form a modern scientific and methodological basis for designing capable of training autonomous navigation systems for compact drones operating in the conditions of resource and information constraints.

KEYWORDS: navigation, visual odometry, unmanned aerial vehicle, convolutional neural network, neural gas, information criterion, support vector method.

REFERENCES

1. Wang S., Deng Z., Yin G. An Accurate GPS-IMU/DR Data Fusion Method for Driverless Car Based on a Set of Predictive Models and Grid Constraints. *Sensors* [Electronic resource]. Basel, Switzerland, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016, Vol. 16(3), pp. 280–293. DOI 10.3390/s16030280.
2. Suwandi B., Kitasuka T., Aritsugi M. Low-cost IMU and GPS fusion strategy for apron vehicle positioning, *TENCON 2017 IEEE Region 10 Conference*, 2017, Penang, Malaysia, 5–8 Nov. 2017 : proceedings, pp. 449–454. DOI: 10.1109/TENCON.2017.8227906.
3. Mary B., Gerhard P. H. A. Pose Estimation of a Mobile Robot Based on Fusion of IMU Data and Vision Data Using an Extended Kalman Filter. [Electronic resource], *Sensors*, 2017, Vol. 17(10), P. 2164. DOI: 10.3390/s17102164.
4. Folkesson J., Leederkerken J., Williams R., Patrikalakis A. A Feature Based Navigation System for an Autonomous Underwater Robot, In: *Laugier C., Siegwart R. (eds) Field and Service Robotics. Springer Tracts in Advanced Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, Vol. 42, pp. 105–114. DOI 10.1007/978-3-540-75404-6_10.
5. Fanani N., Stürck A., Ochs M., Bradler H., Mester R. Predictive monocular odometry (PMO): What is possible without RANSAC and multiframe bundle adjustment? *Image and Vision Computing volume*, 2017, Vol. 68, pp. 3–13. DOI: 10.1016/j.imavis.2017.08.002.
6. Cadena C., Carlone L., Carrillo H. et al Past, Present, and Future of Simultaneous Localization And Mapping: Towards the Robust-Perception Age, *IEEE Transactions on Robotics*, 2016, Vol 32, No. 6, pp. 1309–1332. DOI: 10.1109/TRO.2016.2624754.
7. Dorian G.-L., Marta S., Juan D. T., Montiel J.M.M. Real-time monocular object SLAM, *Robotics and Autonomous Systems*, 2016, Vol. 75, I. PB, pp. 435–449. DOI:10.1016/j.robot.2015.08.009.
8. Ayoul Th., Buckley T., Crevier F. UAV Navigation above Roads Using Convolutional Neural Networks [Electronic resource], Available from: <http://cs231n.stanford.edu/reports/2017/pdfs/553.pdf>.
9. Mohanty V. DeepVO : A Deep Learning approach for Monocular Visual Odometry [Electronic resource], *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2016, Available from: <https://arxiv.org/pdf/1611.06069.pdf>.
10. Labusch K., Barth E., Martinetz T. Sparse Coding Neural Gas: Learning of Overcomplete Data Representations, *Neurocomputing*, 2009, Vol. 72, I. 7–9, pp. 1547–1555. DOI:10.1016/j.neucom.2008.11.027.
11. Xu H., R. Wang, Wang K. A New SVR Incremental Algorithm Based on Boundary Vector [Electronic resource], *International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering (CiSE 2010)*, Wuhan, China 10–12 Dec. 2010, proceedings. Zürich, Springer, 2010, pp. 145–149. DOI: 10.1109/CiSE.2010.5676955.
12. Moskalenko V. V., Korobov A. G. Information-extreme algorithm of the system for recognition of objects on the terrain with optimization parameter feature extraction, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 38–45. DOI 10.15588/1607-3274-2017-2-7.
13. Moskalenko V. V., Rizhova 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.

DESIGNING OF AUTONOMOUS HEAT SUPPLY SYSTEMS AND OPTIMIZATION OF ENERGY RESOURCES AT THEIR EXPLOITATION

Stenin A.I. – Dr. Sc., Professor of the Department of Technical Cybernetics at Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

Pas'ko V. – PhD, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics at Igory Sikorsky Kiev Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine.

Drozdovych I. – PhD, Research Associate at Institute of Telecommunications and Global Information, Space National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Relevance. To solve most of the tasks facing the housing and communal services of the country, it is necessary to create and implement new efficient energy-saving technologies and units, the development of which will solve the problem of reducing heat consumption and metal consumption when using individual heat points in district heating systems.

Goal. Increase in the efficiency of autonomous heat supply systems (AHSS) for housing and communal services objects. Ensuring effective means of analyzing complex systems and processes in multi-circuit heat exchangers for heating and hot water supply systems.

Method. To achieve this goal, a systematic approach was applied to the analysis of thermal and hydraulic processes occurring in the autonomous heat supply systems and modeling of heat exchange processes in multi-circuit heat exchangers. To solve the boundary value problem, an iterative procedure is proposed. On the experimental stand, the model is explored, experimental data are obtained.

Results. The dependence of the coolant consumption in the circuits and the amount of heat are established theoretically and experimentally. An iterative procedure is developed. Studies were carried out on the basis of the experimental stand. Based on the results of the experiments, a nomogram of thermal calculation of a multi-circuit heat exchanger was constructed.

Conclusions. The experiments carried out on the experimental stand developed by the authors of the experiment fully confirm the correctness of the theoretical results obtained and provide an effective tool for constructing industrial samples.

KEYWORDS: autonomous heat supply system, heat exchangers of a coiled type, tank-accumulator, basic design parameters, optimization of energy resources, experimental stand.

ABBREVIATIONS

HW – hot water supply;

AHSS – automated heat supply systems;

TA – tank-accumulator;

HE – heat-exchanging unit;

MHUT – a multi-loop unit with the accumulating tank;

ITP – individual thermal point;

HAU – heating-accumulating unit.

NOMENCLATURE

T_{env} – the environmental temperature;

$\Delta\tau$ – the temperature of the premier contour;

τ – the time period;

Q_i – heat power;

G_i – outlet temperature in the i -contour;

c_i – heat capacities of the incandescent heat carriers in the i -contour;

t_i^I – the temperature at the entry of the i -contour;

t_i^{cp} – average temperatures of the i -contour heat carriers;

t_i^{II} – the temperature at the exit of the i -contour;

F_i – diameter of the i -contour;

k_i – heat consumption in the i -contour;

$k_{общ}$ – total heat consumption;

A_i – square of the tube cross-section of the heat carrier contour ($i=1$), heat system contour coil ($i=2$), hot water supply system coil ($i=3$), hot water tank-accumulator ($i=4$).

INTRODUCTION

Development and improvement of the energy-saving technologies in the modern heat exchanging systems is restrained in many respects by the absence of the calculating method and modern computing complexes allowing to adequately forecast the state of such systems in the whole equipment load range. The list of unsettled issues regarding the improvement of the centralized heat supply systems requires the scientific search and development of the recommendations for their practical application. That is why the work efficiency and heat supply systems exploitation increase at the expense of the new models (units) development resources saving technologies implementation is a highly relevant scientific and technical problem for Ukraine. In this respect, one of the heat exchanging unit prospective models is the model of a heat exchanger of a coiled type with the tank-accumulator patented by one of the authors [1].

In fig. 1 the MHUT cross-section, which heat exchanging processes are investigated in this work, is presented.

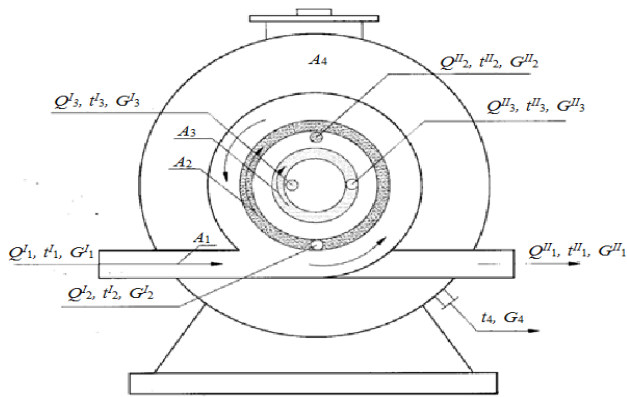


Figure 1 – MHUT of a coiled type cross-section

The MHUT work is realized in the following way: the premier heat carrier enters the HE intertube space, created by the frame and the coiled tubes. Having given its heat through the surface of the heating and hot water supply systems coils and the surface of the tank-accumulator frame goes back to the heat source. The running water heats and enters the hot water supply system coil, where it heats up to 55–60°C and afterwards it flows into the accumulating container, from which the water is consumed for the hot water supply needs. The heating water is constantly circulating in the second coil with the help of the noiseless pump.

1 PROBLEM STATEMENT

The known parameters in the heat-exchanging unit are temperatures of the hot heat carrier t_1^I and t_1^{II} at the entry and exit of the heat exchanging unit frame; temperatures of the incandescent heat carriers of the heating contour t_2^I and t_2^{II} with the consumption G_2 ; temperature of the incandescent heat carriers of the third contour of the hot water supply system t_3^{II} and t_3^I with the consumption G_3 , which flows into the hot water tank-accumulator.

The unknown parameters are the following seven parameters:

- consumption of the premier heat carrier G_1 ;
 - initial and terminal water temperatures t_4 in the tank-accumulator;
 - water consumption with the TA, entering the hot water supply system according to the daily consumption schedule G_4 ;
 - diameters of the first, second, third and fourth contours of the heat exchanging unit F_1 , F_2 , F_3 and F_4 .
- It is necessary to solve the following tasks for the chosen MHUT construction:
- to define the principles of the constructive parameters basic meanings calculation in the fixed work regime;
 - to develop the algorithm of the energy resources optimization during the MHUT exploitation.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

It is known that the most complete evaluation of the created heat exchanger efficiency has to take into consideration the convection, mass, volume and cost characteristics, units and components workability and unification degree indexes, exploitation indexes. Hence, during the analysis of any heat exchangers, it is necessary to take into consideration so many parameters that at first sight there seems to be no use in the analytical solution receiving trial, which might allow getting the desired evaluation. Especially taking into account that the analytical solution of the full Navier-Stokes equation has not been found yet [3].

While creating the new and more effective heat exchangers the aim is to decrease the specific consumption of materials, work, resources, energy, consumable during the work comparing to the existing heat exchangers indexes. The specific consumption for the heat exchanging units is the consumption related to the thermal productivity under the set conditions [4]. Until recently the heat exchanging units calculation has come to the fixed work regimes calculation and finding such parameters as the temperatures average difference, heat transfer coefficients, heat transfer surface and hydraulic bearings [5]. However, during the modern automated autonomous heat supply systems creation, it is necessary to have the quantitative dependencies in the form of mathematical models characterizing both fixed and flexible heat exchanging units work regimes. Partially these issues have been considered in the work [6] in which the scientific foundations of the mathematical description of heat transfer processes in the heat exchanging units multithreaded stage have been developed in the form of the ordinary linear differential equations system as the simplified longitudinal model of the full Navier-Stokes equation. In the article [7], the modelling of the heat exchange process in the intermediate heat exchanger of a coiled type, which is a part of the heat extraction contour of the “UNITERM” reactor unit fulfilled using the hydro and gas dynamical package ANSYS CFX, is considered. The given article is the further development of the works mentioned above oriented towards the AHSS of the housing and communal services.

3 MATERIALS AND METHODS

The calculation of the constructive parameters of the heat exchangers of a coiled type for the independent heating and hot water supply systems is based on the thermal balance equation and the heat transfer equation combined solution.

We define the MHUT thermal power for the heating Q_2 and hot water supply Q_3 system contours from the formulae:

$$Q_2 = G_2 \cdot c_2 (t_2^{II} - t_2^I), \quad (1)$$

$$Q_3 = G_3 \cdot c_3 (t_3^{II} - t_3^I), \quad (2)$$

where C_2 and C_3 is the thermal capacity of the heat carriers with the t_2^{cp} and t_3^{cp} average heat carriers temperatures:

$$t_2^{cp} = \frac{t_2^H + t_2^I}{2} \text{ и } t_3^{cp} = \frac{t_3^H + t_3^I}{2}, \quad (3)$$

Considering the thermal losses through the external surface of the tank-accumulator we define the premier heat carrier consumption from the formula:

$$G_1 = \frac{Q_2 + Q_3}{C_1(t_1^H - t_1^I)} \eta_{ПOT}. \quad (4)$$

If the premier heat carrier is the vapor, then the formula (4) becomes:

$$G_{II} = \frac{Q_2 + Q_3}{(i_{II}^H - t_K^I)} \eta_{ПOT}, \quad (5)$$

where Δc_1 is the premier heat carrier thermal capacity at the average temperature; η_{loss} – the heat losses through the HE external surface coefficient. At that:

$$t_1^{cp} = 0.5(t_1^H - t_1^I), \quad (6)$$

t_1^H – the saturated vapor enthalpy at the P_{sat} pressure; t_1^I – the water enthalpy on the saturation line at the P_{sat} saturation pressure;

Further, we write the thermal balance equations:

– heat exchange between the premier heat carrier and the heating contour heat carrier:

$$Q_{1-2} = K_1 \cdot F_2(t_1^{cp} - t_2^{cd}), \quad (7)$$

– heat exchange between the premier heat carrier and the hot water system contour heat carrier:

$$Q_{1-3} = K_2 \cdot F_3(t_1^{cp} - t_3^{cd}) \quad (8)$$

– heat exchange between the premier heat carrier and the water in the HE through the heat exchanger frame:

$$Q_{1-4} = K_3 \cdot F_1(t_1^{cp} - t_4^{cd}) \quad (9)$$

At that, the average temperatures of the premier warming heat carrier and the heat carriers incandescent in the coils of the heating contour and the hot water supply and the water in the TA are respectively equal:

$$t_1^{cp} = 0.5(t_1^I + t_1^H), \quad (10)$$

$$t_2^{cp} = 0.5(t_2^I + t_2^H), \quad (11)$$

$$t_3^{cp} = 0.5(t_3^I + t_3^H), \quad (12)$$

$$t_4^{cp} = 0.5(t_4^I + t_4^H), \quad (13)$$

The heat quantity which is perceived by the heat carrier of the heat supply system contour:

$$Q_2 = G_2 \cdot c_2(t_2^I + t_2^H). \quad (14)$$

The heat quantity received by the heat carrier of the hot water supply system contour:

$$Q_3 = G_3 \cdot c_3(t_3^H + t_3^I). \quad (15)$$

The heat quantity used for the TA water heating, at the dewatering decrease for the water supply through the heat exchanger frame:

$$Q_4 = G_4 \cdot c_4(t_1^{cp} + t_4^{cp}). \quad (16)$$

In that way, the unknown parameters calculation is based on the thermal balance equation and the heat transfer equation combined solution:

$$\begin{cases} Q_{1-2} = k_1 \cdot F_2(t_1^{cp} - t_2^{cp}) \\ Q_{1-3} = k_2 \cdot F_3(t_1^{cp} - t_3^{cp}) \\ Q_{1-4} = k_2 \cdot F_1(t_1^{cp} - t_4^{cp}) \\ Q_2 = G_2 \cdot c_2(t_2^I + t_2^H) \\ Q_3 = G_3 \cdot c_3(t_3^I + t_3^H) \\ Q_4 = G_4 \cdot c_4(t_1^{cp} + t_4^{cp}) \end{cases} \quad (17)$$

where: $t_1^{cp} = 0.5(t_1^H - t_1^I)$, $t_2^{cp} = 0.5(t_2^H - t_2^I)$, $t_3^{cp} = 0.5(t_3^H - t_3^I)$, $t_4^{cp} = 0.5(t_4^H - t_4^I)$ the average temperature of the heat carrier in the respective contour.

The equations system (17) is the system of equations with twelve unknown values: Q_{1-2} , Q_{1-3} , Q_{1-4} , F_2 , F_3 , F_1 , G_2 , t_2^I , t_2^H , G_4 , Q_2 , Q_4 .

In the given equations the t_2 value can be accepted equal to the t_2 based on the MHUT construction distinguishing features. Hence, the value $(t_2^H - t_2^I)$ must be close to zero. Its deviation from zero may serve as the acceptable simplifications validity measure. If $(t_2^H - t_2^I) < 0$, it is necessary to increase the heat exchanging surface of the MHUT heating contour coil and if $(t_2^H - t_2^I) > 0$, the heat exchanging surface may be left unchanging while the G_1 premier heat carrier consumption may be decreased. Setting a number of the known constructive parameters it is possible to define the others using the given fixed temperature regimes. The received basic values of the constructive parameters have to answer the total thermal balance equation:

$$\begin{cases} G_1 \cdot c_1(t_1^I - t_1^{II}) = G_2 \cdot c_2(t_2^{II} - t_2^I) + G_3 \cdot c_3(t_3^{II} - t_3^I) + G_4 \cdot c_4(t_4^{II} - t_4^I) + G_4 \cdot c_4(t_4^{II} - t_{OKK}); \\ k_{3az} \cdot \sum F \cdot \Delta t_{cp}^{3az} = k_1 \cdot F_2(t_1^{cp} - t_2^{cp}) + k_2 \cdot F_3(t_1^{cp} - t_3^{cp}) + k_3 \cdot F_1^{TO}(t_1^{cp} - t_4^{cp}) + k_4 \cdot F_4^{TA}(t_4^{cp} - t_{OKP}) \end{cases} \quad (18)$$

We shall consider the power inputs optimization at the given AHSS exploitation. The autonomous heat supply system of the private building based on the MHUT is shown in the fig. 2.

In fig. 2 the MHUT with the consecutive joining of the pointed contours coils is shown for the heating and HW contours presentation clearness. However, in the given work the parallel joining of the coils (fig. 3) is considered further as the more effective from the MHUT composition and the heat exchange processes point of view.

Here, T_1^I , T_2 , T_3 , T_1^{II} , T_2^{II} , T_3^{II} – are the temperatures of the warming heat carrier and the heating and HW heat carriers contours at the entry and the exit respectively, A_1 , A_2 , A_3 – are their cross-section squares respectively.

In the given AHSS two main work regimes – the transitional and the fixed – can be distinguished.

The transitional regime. In the given article the MHUT AHSS heating contour outlet to the nominal (fixed) work regime at the presence of the temperature regime in the tank-accumulator and thus in the HW contour is considered. As far as the temperature is

associated with the heating contour, the task is to settle the set water temperature value both in it and in the heating contour. It may occur through the coil of the premier heat carrier in the form of the hot liquid from the boiler or the geothermal source; through the coil of the premier heat carrier in the form the heated gas; through the special coil with the built-in electrical spiral.

In any case (except geothermal sources), the AHSS outlet to the set temperature regime requires the energy sources consumption. That is why the optimization from the energy sources consumption in the transitional regime minimization point of view is the important objective.

It is known that the heat transfer process is followed by water mixing process, i.e. recirculation process. Hence, this process can be described by the differential equations system with the delayed argument, which are the simplified model of the Navier-Stokes equations [3,5,9]. At that, the delay value τ in our case can be defined on the basis of the constructive parameters of the heating contour and the nominal water circulation. As the result, the heating contour structural scheme can be presented in the following way (fig. 4).

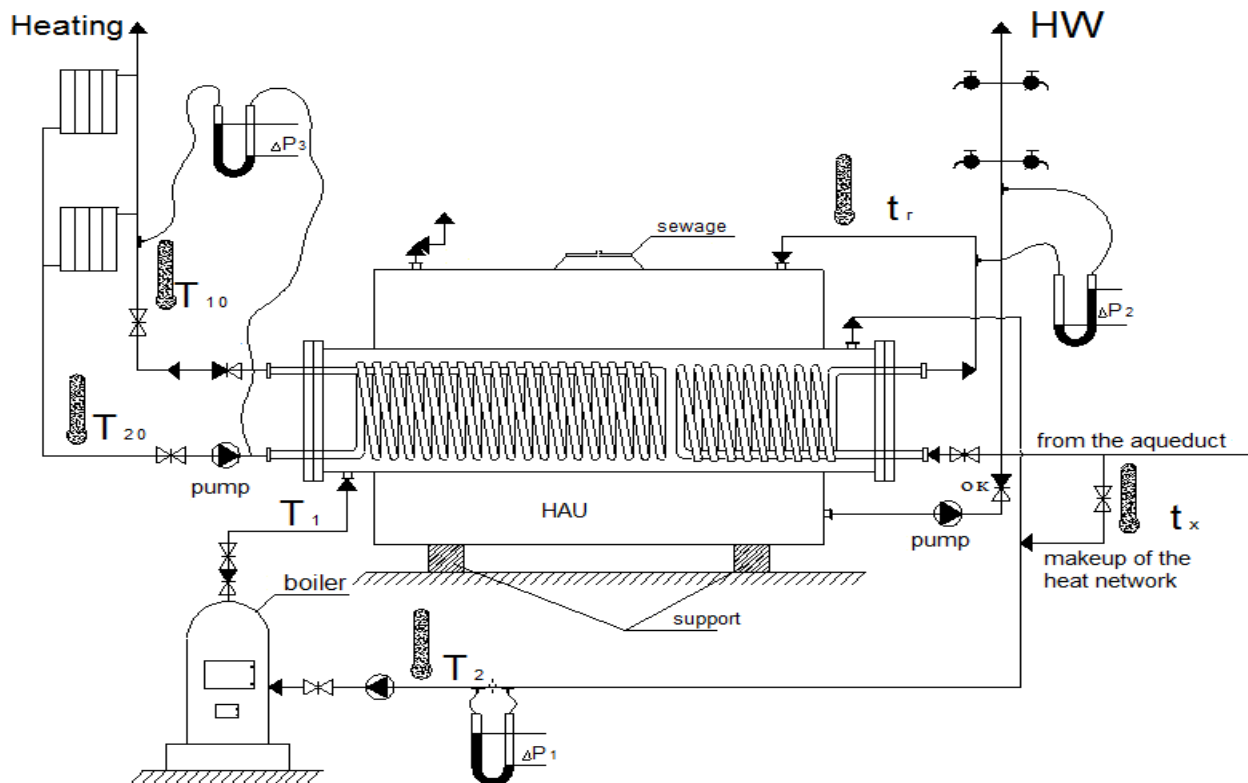


Figure 2 – The autonomous heat supply system of the building based on MHUT

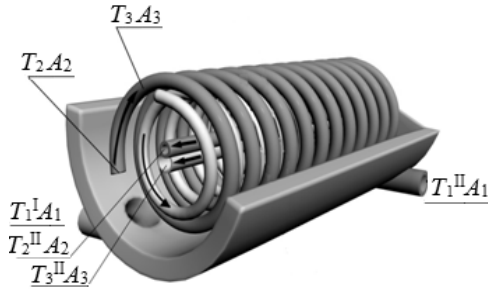


Figure 3 – The parallel joining of the heating and HW contours coils

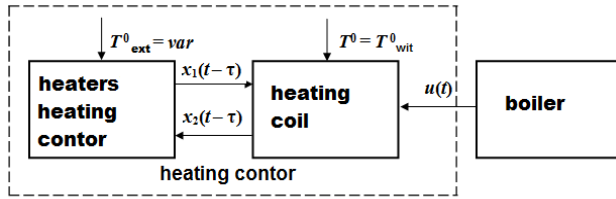


Figure 4 – The heating contour structural scheme

For it, we can write the following differential-residual equations with the afteraction system:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= k_1 [x_1(t) - T^0] + k_2 [x_2(t - \tau) - x_1(t)], \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= k_u u_i - k_3 [x_2(t) - x_1(t - \tau)] \end{aligned} \quad (19)$$

under the set boundary conditions: $x_1(t), x_2(t)$ is the temperature in the batteries and the coil of the heating contour; $x_1(0) = x_2(0) = T_{okp}$; $x_1(T) = x_2(T) = T^0$

The optimal control objective is to ensure the heating contour temperature outlet to the set value T^0 at the final moment. For the objective setting the cost functional is defined with the expression:

$$I = [x_1(T) - T^0] + \int_0^T c u_i^2(t) dt. \quad (20)$$

Also, we will consider, that the temperature in the tank-accumulator at the time period $[-\tau, 0]$ is equal to the environmental temperature T_{env} , which corresponds to the real state of the heating system before the starting. The optimal objective solution for the system (22) is very difficult and impossible in the analytical form because of the afteraction effect. The slack variable method, which allows bringing the initial system with the afteraction to the ordinary differential and transfer equations (to which the known optimization methods are applicable) system is suggested by the authors. Taking into consideration the aforementioned, we pass from the recording (19) to the recording of the form:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1(t)}{dt} &= -k_1 [x_1(t) - T^0] + k_2 [z_2(t) - x_1(t)], \\ \frac{dx_2(t)}{dt} &= k_u u_i - k_3 [x_2(t) - z_1(t)], \\ \frac{dy_1(t, \theta)}{dt} + k_4 \frac{dy_1(t, \theta)}{dt} &= -k_5 [y_1(t, \theta) - T^0] \\ \frac{dy_2(t, \theta)}{dt} + k_4 \frac{dy_2(t, \theta)}{dt} &= -k_5 [y_2(t, \theta) - T^0] \end{aligned} \quad (21)$$

under the boundary conditions:

$$\begin{aligned} y_1(0, \theta) &= 0, y_2(0, \theta) = 0, \\ y_1(t, 0) &= x_1(t), y_2(t, 0) = x_2(t), \end{aligned} \quad (22)$$

where $z_1(t) = y_1(t, \theta), z_2(t) = y_2(t, \theta), x_1(t), x_2(t)$ – is the temperature in the heating radiator and the heating contour coil respectively; $y_1(t, \theta), y_2(t, \theta)$ – is the temperature in the pipelines; $u_i = u$ is the equation connected to the energy consumption for the heat carriers temperature change ($0 \leq u_i \leq u_{max}$); T^0 is the set temperature; k_i is the constant. The maximum method is used as the optimization method [10].

Hamiltonians are composed for the equations of the system (29) and (30):

$$\begin{aligned} H_\psi &= \psi_0 c u^2(t) + \psi_1 [-T^0 + k_2 (y_2(t, \tau) - x_1(t))] + \\ &+ \psi_2 [k_u u_i - k_3 (x_2(t) - y_2(t, \tau))] \\ K_\psi &= -\varphi_1 k_5 [y_1(t, \theta) - T^0] - \\ &- \varphi_2 k_5 [y_2(t, \theta) - T^0], \end{aligned} \quad (23)$$

where ψ_i, φ_i – are auxiliary variables.

In this case, the conjugate equations system and the boundary conditions have the form:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi_0(t)}{\partial t} &= 0, \frac{\partial \psi_1(t)}{\partial t} = (k_1 + k_2) \psi_1(t) - k_5 \varphi_1(t, 0), \\ \frac{\partial \psi_2(t)}{\partial t} &= k_3 \psi_2(t) - k_5 \varphi_2(t, 0), \\ \psi_0(T) &= -c; \psi_1(T) = -2(x_1(T) - T^0), \psi_2(T) = -0. \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} + k_4 \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} &= k_5 \varphi_1; \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} + k_4 \frac{\partial \varphi_2}{\partial \theta} = k_5 \varphi_2, \\ \varphi_1(t, \tau) &= \frac{k_3}{k_4} \psi_2(t); \varphi_2(t, \tau) = \frac{k_2}{k_u} \psi_1(t), \\ \varphi_1(T, \theta) &= 0; \varphi_2(T, \theta) = 0; t \in [0, T]; \theta \in [0, \tau] \end{aligned} \quad (25)$$

As far as the optimal equation has to ensure the hamiltonian maximum, therefore:

$$u^{heat}(t) = \begin{cases} 0, \text{ when } \frac{k_u}{2c} \psi_2 < 0, \\ \frac{k_u}{2c}, \text{ when } 0 < \frac{k_u}{2c} \leq u_{\max}, \\ u_{\max}, \text{ when } \frac{k_u}{2c} > u_{\max}. \end{cases} \quad (26)$$

To define the trajectory change rule ψ_2 it is necessary to solve conjointly the auxiliary equations (24), (25) and equations (21), (22) using the optimal equation formula. The combined solution of the stated equations is the boundary-value problem solution. In the common case, such problems solution requires calculus mathematics methods application [8].

In this case, the next iterative procedure can be suggested.

Step 1. To set some initial value $x_1(T)$ and calculate $\psi_1(T) = 2 - 2(x_1(T) - T^0)$.

Step 2. To integrate the conjugate equations system (24) in the reverse time from $t = T$ to $t = 0$ and define $\psi_2(t)$ and $\psi_1(t)$.

Step 3. To define $u(t)$ from (26).

Step 4. Having put the defined value $u(t)$ in (19) and integrated the given system from $t = 0$ to $t = T$, to define the new value $x_1(T)$.

Step 5. If the defined value $x_1(T)$ differs from the one set initially, we pass to step 1. If they are close (according to the set accuracy degree), the defined decision is optimal.

The fixed regime. It is concluded in the set temperature regime stabilization (maintenance) at the small changes of the environmental temperature and the current volume of the hot water consumption. It is considered that the premier heater temperature is stable and corresponds to the set temperature regimes. The main possibility condition for the heating contour is that the heating time period in the heating contour coil has to be much less than the water circulation time period in this contour. In this case, the temperature regime stabilization is ensured by the circulation pump with the corresponding water circulation speed change. HW supply contour temperature regime is totally defined by the tank-accumulator temperature stability, which in its turn can be ensured both by the constructive feedback, suggested by the authors, and the water consumption automatic compensation. At that, the main condition is that the water heating time period in the HW contour coil, defined from the MHUT dynamic model, has to be much less than the water mixing time period in the tank-accumulator.

4 EXPERIMENTS

To carry out the experiments and approve the correctness of the received theoretical results the authors have created the MHUT experimental stand (fig. 5a, b).

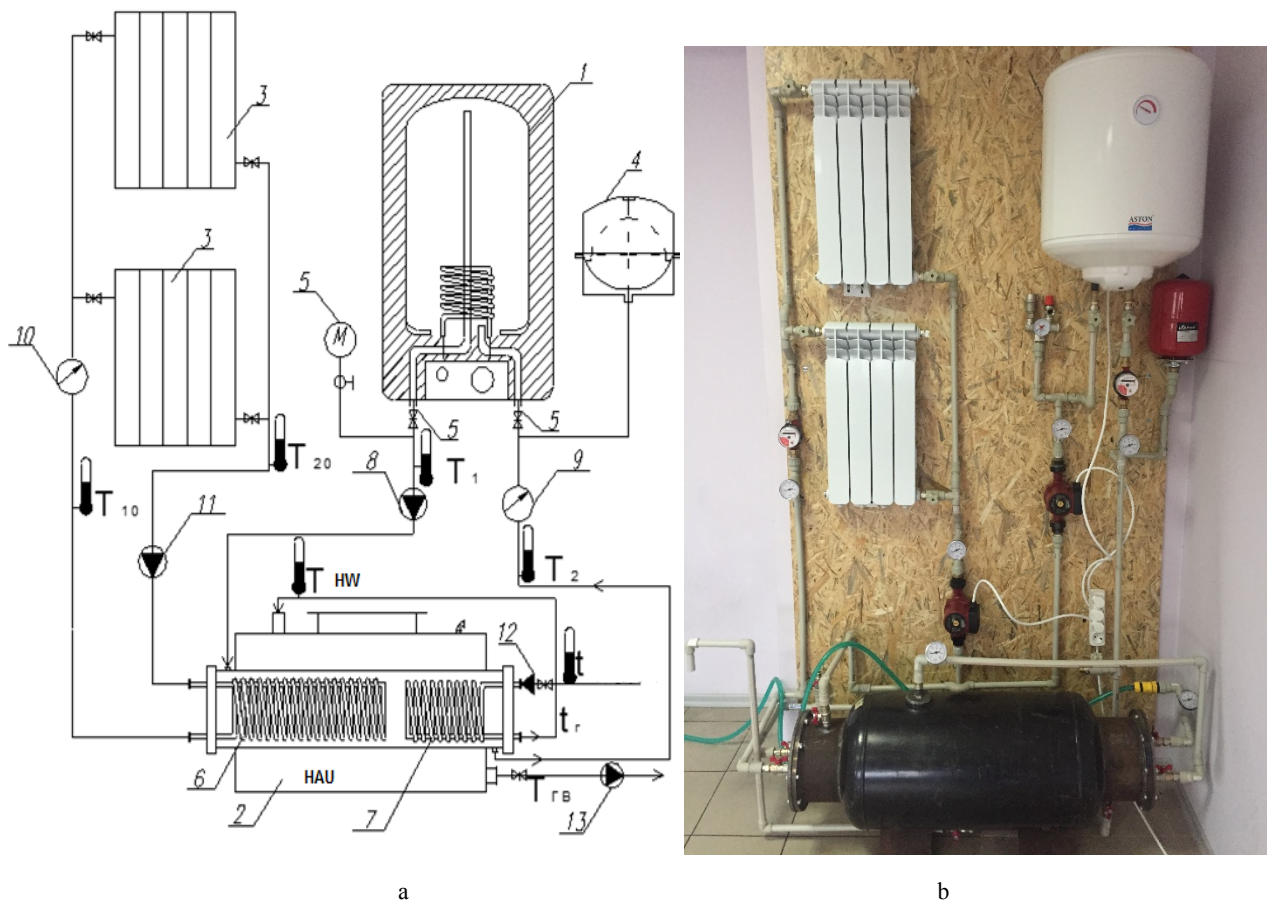


Figure 5 – The MHUT: a – experimental stand scheme; b – full-sized model

Here: 1 – boiler (Novater.50); 2 tank-accumulator (43l.); 3 – radiators; 4 – expansion pneumatic tank (4l.); 5 – safety group (manometer, air valve, waste valve 300...); 6 – heating contour coil; 7 – hot water contour coil; 8 – warming heat carrier circulation pump (Wilo-StarRS25/4); 9 – warming heat carrier flowmeter ...–1.5..., 90°C, $H=1...$, $G=1,5\text{ m}^3/\text{h}$); 10 – heating carrier flowmeter for the heating (...–1,5..., 90°C, $H=1...$, $G=1,5\text{ m}^3/\text{h}$); heating contour circulation pump (Wilo-StarRS25/4); 12 – cold water flowmeter (...1.5..., 90°C, $H=1...$, $G=1,5\text{ m}^3/\text{h}$); 13 – step-up station; 14 – bimetallic radial thermometer (... 0 – 150°C, 2.5 % accuracy class) – 7 pieces; 15 – globe valve $\varnothing 20\text{ mm}$.

Both coils are placed separately in the MHUT frame, as it is shown in the fig. 5a. The coils heating is arranged from the boiler 1 with the warming heat carrier which is circulating in its contour with the help of the pump 8, and the consumption is fixed according to the flowmeter 9 indications, the temperature of which may vary within the bounds from 40° to 90°C. The water volume increasing at the temperature rising is compensated with the help of the expansion vessel 4. The secondary heating contour water is heated in the coil 6 and circulates in the heating contour with the

help of the pump 11, and the heated water quantity is fixed with the flowmeter 10. The cold tap water in the hot water contour is heated in the coil 7 with the warming heat carrier from the boiler 1 and flows into the HAU tank-accumulator 2, from which with the help 12 is forwarded into the hot water supply system of the building with the temperature 50°–60°C. The first, second and third contours heat carriers consumption is regulated with the help of the respective taps 15, and the total water consumption is fixed with the help of the flowmeters 9, 10, 12 in each separate contour.

5 RESULTS

On the basis of the experimental stand, the MHUT research has been carried out for the independent heating system as well as for the hot water supply system. The obtained results are listed in the table 1, where τ is the set temperature regimes at the entry and the exit, F , F_{heat} , F_{hw} is the coils surface for the heating...hot water supply systems contours and the HE frame, m is the quantity of the consumers. On the basis of the table 1, a whole range of the temperature dependences for the MHUT energetic balance check has been obtained. In particular, the diagrams (presented in the fig. 6) have been built for the MHUT energetic balance check.

Table 1 – Obtained results

№	Consumption, kg/s			Temperature Drop,			Heat Quantity,			Heat Coef.	Velocity, m/s		
	$\sum G_1^j, \text{kg/s}$	$G_2^j, \text{kg/s}$	$G_3^j, \text{kg/s}$	$\Delta\tau_1, ^\circ\text{C}$	$\Delta\tau_2, ^\circ\text{C}$	$\Delta\tau_3, ^\circ\text{C}$	$Q_1^j, \text{kJ/s}$	$Q_2^j, \text{kJ/s}$	$Q_3^j, \text{kJ/s}$	$K, \frac{W_t}{m^{\circ}\text{C}}$	$w_1^j, \text{m/s}$	$w_2^j, \text{m/s}$	$w_3^j, \text{m/s}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$m=100$	4.08	2.34	1.74	80	25	50	1370	786	584		2.08	0.374	0.278
$m=10$	0.408	0.234	0.174	80	25	50	137	78.6	58.4		0.408	0.491	0.354
			$F = 3,636\text{ m}^2$; $F_{OT} = 11,63\text{ m}^2$; $F_{TB} = 4,32\text{ m}^2$										
$\tau \approx 150/70$	4.08	2.34	1.74	80	25	50	1370	786	584	4702	2.080	1.194	0.888
	2.04	1.17	0.87	80	25	50	685	393	292	2355	1.041	0.596	0.444
	1.02	0.586	0.434	80	25	50	343	179	146	1179	0.520	0.298	0.222
	0.51	0.293	0.217	80	25	50	172	98.5	73	591	0.260	0.149	0.111
	0.255	0.146	0.109	80	25	50	86	49.25	37	296	0.130	0.075	0.056
$\tau \approx 130/70$	5.44	3.12	2.32	60	25	50	1370	786	584	6280	2.775	1.592	1.184
	2.72	1.56	1.16	60	25	50	685	393	292	3140	1.388	0.796	0.592
	1.36	0.78	0.58	60	25	50	343	197	146	1572	0.694	0.398	0.296
	0.68	0.39	0.29	60	25	50	172	98.5	73	788	0.347	0.199	0.148
	0.34	0.195	0.145	60	25	50	86	49.25	37	394	0.174	0.099	0.074
$\tau \approx 110/70$	8.16	4.68	3.48	40	25	50	1370	786	584	9420	4.163	2.387	1.775
	4.08	2.34	1.74	40	25	50	685	393	292	4710	2.082	1.194	0.888
	2.04	1.17	0.87	40	25	50	343	197	146	2355	1.041	0.596	0.444
	1.02	0.586	0.435	40	25	50	172	98.5	73	1177	0.520	0.296	0.22
	0.51	0.293	0.218	40	25	50	86	49.25	37	589	0.26	0.149	0.111
$\tau \approx 100/70$	10.87	6.24	4.63	30	25	50	1370	786	584	12560	5.546	3.183	2.362
	5.44	3.12	2.32	30	25	50	685	393	292	6280	2.775	1.592	1.181
	2.72	1.56	1.16	30	25	50	343	197	146	3140	1.388	0.796	0.591
	1.36	0.78	0.58	30	25	50	172	98.5	73	1570	0.694	0.398	0.296
	0.68	0.39	0.29	30	25	50	86	49.25	37	785	0.347	0.199	0.148

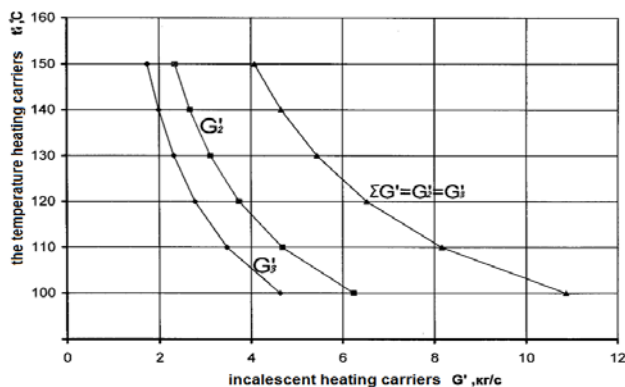


Figure 6 – The heating and hot water supply consumption of the premier heat carrier

6 DISCUSSION

We will show the calculating method of the MHUT constructive parameters, which has been built in the form of the experimental model, by the example of the energetic balance check.

The energetic balance can be written in the form of the equation:

$$Q_1' = Q_2' + Q_3' + Q_{III}, \quad (27)$$

where Q_2' – is the heat quantity, transferred by the premier heat carrier into the heating system

$$Q_2' = G_2' \cdot C_{p2} (\tau_1' + \tau_2'), \quad (28)$$

Q_3' – is the heat quantity, transferred by the premier heat carrier into the hot water supply system

$$Q_3' = G_3' \cdot C_{p3} (\tau_1' + \tau_3'), \quad (29)$$

Q_{III} – is the heat losses into the environment

$$Q_{III} = 0.01 Q_1'. \quad (30)$$

It is easy to make sure, that the heating and hot water supply consumption of the premier heat carrier, obtained at the experiments carrying out (table 1) and the ones presented in the fig. 6, coincide with the computation data, calculated from the formulae (27)–(30).

Moreover, on the carried out experiments results basis, the MHUT heating calculation nomogram presented in the fig. 7 has been built. The heating calculation nomogram allows choosing the MHUT construction optimal parameters, i.e. heat-exchanging surface value correlation to the tank-accumulator capacity.

The heat exchanger construction, at which the input and output sockets of the premier heat carrier are placed tangentially to the heat exchanger frame (Fig. 3), assists in turbulization of the flow around the heat exchanging surfaces of the heating and hot water supply system, which improves the heat exchange. The secondary heat carrier in the coil moves in the reverse flow to the premier heat carrier, settled in the intertube space, which contributes to the heat exchanger warming surfaces cleaning and prevents solid suspended particles concretion on their surfaces.

Using nomogram greatly reduces time spent on the MHUT calculation and projection stage and its optimal size choice – the tank-accumulator construction and the coils heating surface.

7 CONCLUSION

The MHUT basic constructive parameters calculation method described in the article and the nomogram allow choosing the optimal MHUT construction depending on the exploitation conditions. For the effective practical exploitation of the regarded AHSS, the algorithms of the energy resources optimization in the fixed and non-fixed MHUT work regimes are processed. The experiments carried out on the MHUT full-sized model created by the authors totally confirm the correctness of the obtained theoretical results.

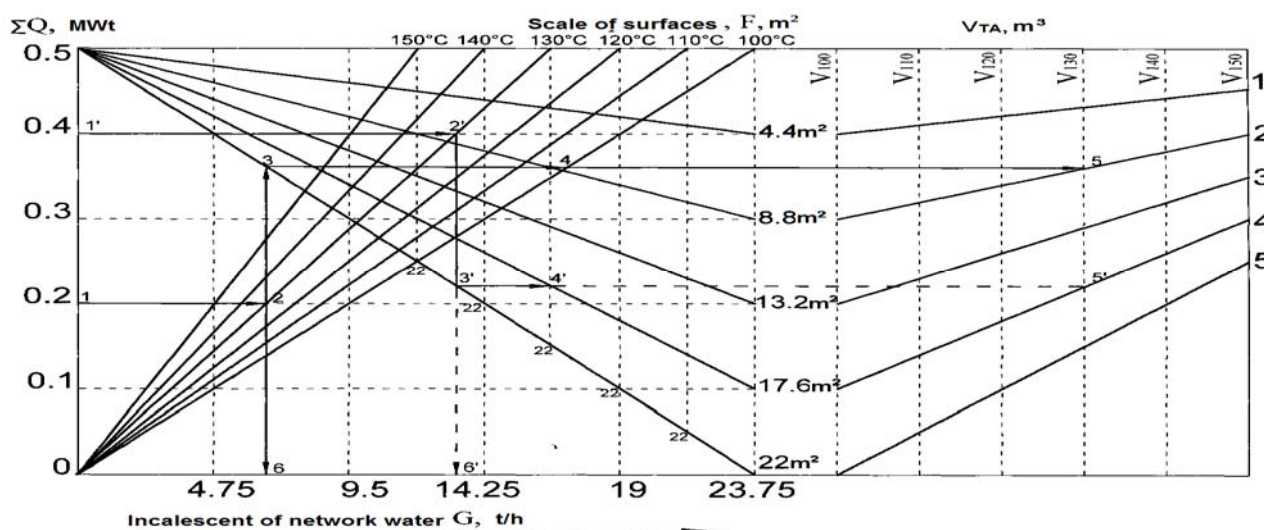


Figure 7 – MHUT heating calculation nomogram

REFERENCES

1. Pat. 81831, Україна, МПК F24D 11/00/ Bagatokonturnij teploobminnij aparat zmievikovogo tipu dlja nezaleznyh sistem opalennja ta garjachogo vodopostachannja / A. O. Oleksjuk, I. G. Shitikova. (Україна); заявник Donbas'ka nac.akad.bud. ta arh. – 04.02.2013; opubl. 10.07.2013, Bjul.№13.
2. Aljamovskij A. A., Sobachkin A. A., Odincov E. V., Haritonovich A. I., N. B. Ponomarev Komp'juternoe modelirovanie v inženernoj praktike. Sankt-Peterburg, BHV-Peterburg, 2008, 1040 p.
3. Miheev M. A., Miheeva I. M. Osnovi teploperedachi / M.A.Miheev, Moscow, Vishha shkola, 1977, 336 p.
4. Levchenko B. O., Akmen R. G., Bratuta Je. G. ta in. Teplo- i masoobminni aparati i ustanovki promislovih pidpriemstv. Harkiv, HGPU, 1999, 420 p.
5. Vasilenko S. M., Shutjuk V. V. Teploobminni aparati. Osnovi rozrahunku ta vioru. Kyiv, UDUHT, 2000, 36 p.
6. Oleksjuk A. A., Trofimchuk A. M., Shitikova I. G. Dinamicheskie harakteristiki podogrevatel'no-akkumuljatornyh, *Obchisljuval'na i prikladna matematika.* – 2016, No. 1(121), pp. 78–88.
7. Solonin V. I., Satin A. A. Modelirovanie teploobmena v zmeevikovom teploobmennike primenitel'no k reaktornoj ustanovke “UNITERM”, *Nauka i Obrazovanie. MGTU im. N. Je. Bauman.*, Rossija, Moscow: Setevoe nauchnoe izdanie, 2014, No. 10, pp. 398–412. ISSN 1994-0448. DOI:10.7463/1014.0727220.
8. Stenin O. A., Pas'ko V. P., Homenko P. S. Metod fiktivnoї koordinati v zadachah optimal'nogo upravlinnja sistemami z pisljadieju, *Adaptivni sistemi avtomatichnoho upravlinnja*, 2012, No. 20(40), pp. 116–122.
9. Temam R. Uravnenija Nav'e-Stoksa. Teorija i chislennyj analiz. Moscow, Izdatel'stvo “Mir”, 1981, 408 p.
10. Michael Athans, Peter L. Falb Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications. New York, McGraw-hill book company, 2006, 879 p.

Received 18.04.2018.

Accepted 22.05.2018.

УДК 536.24.08

ПРОЕКТУВАННЯ АУТОНОМНИХ СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ ПРИ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Стенін А. А. – д-р техн. наук, професор кафедри технічної кібернетики, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна.

Пасько В. П. – канд. техн. наук, доцент кафедри технічної кібернетики, Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна.

Дроздович І. Г. – канд. техн. наук, науковий співробітник, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Для вирішення більшості завдань, які стоять перед житлово-комунальним господарством країни, необхідно створити і впровадити нові ефективні енергоресурсозберігаючі технології і установки, розробка яких дозволить вирішити проблему зменшення витрат теплоти і металоємності при застосуванні в системах централізованого теплопостачання індивідуальних теплових пунктів.

Мета. Підвищення ефективності роботи автономних систем теплопостачання для об'єктів житлово-комунального господарства. Забезпечення результативних засобів аналізу складних систем і процесів в багатоконтурних теплообмінних апаратах для систем опалення та гарячого водопостачання.

Метод. Для досягнення поставленої задачі був застосований системний підхід до аналізу теплових та гідравлічних процесів, що протікають в автономних системах теплопостачання, і моделювання теплообмінних процесів в багатоконтурних теплообмінних апаратах. Для вирішення крайової задачі запропонована ітераційна процедура. На дослідно-експериментальному стенді провидить дослідження моделі, отримані експериментальні дані.

Результати. Теоретично і експериментально встановлені залежності витрати теплоносія в контурах від кількості теплоти. Розроблена ітераційна процедура. На основі дослідно-експериментального стенду були проведені дослідження. За результатами проведених експериментів була побудована номограма теплового розрахунку багатоконтурного теплообмінного апарату.

Висновки. Проведені на створеному авторами дослідно-експериментальному стенді багатоконтурного теплообмінного апарату експерименти повністю підтверджують коректність отриманих теоретичних результатів і дають ефективний інструмент для побудови промислових зразків.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: автономна система теплопостачання, теплообмінники змієвикового типу, бак-акумулятор, базові конструктивні параметри, оптимізація енергоресурсів, дослідно-експериментальний стенд.

УДК 536.24.08

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АУТОНОМНЫХ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Стенін А. А. – д-р техн. наук, профессор кафедры технической кибернетики, Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев, Украина.

Пасько В. П. – канд. техн. наук, доцент кафедры технической кибернетики, Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского, Киев, Украина.

Дроздович И. Г. – канд. техн. наук, научный сотрудник, Институт телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Для решения большинства задач, которые стоят перед жилищно-коммунальным хозяйством страны, необходимо создать и внедрить новые эффективные энергоресурсосберегающих технологии и установки, разработка которых позволит решить проблему уменьшения расхода теплоты и металлоемкости при применении в системах централизованного теплоснабжения индивидуальных тепловых пунктов.

Цель. Повышение эффективности работы автономных систем теплоснабжения (АСТС) для объектов жилищно-коммунального хозяйства. Обеспечение результативных средств анализа сложных систем и процессов в многоконтурных теплообменных аппаратах для систем отопления и горячего водоснабжения.

Метод. Для достижения поставленной задачи был применен системный подход к анализу тепловых и гидравлических процессов, протекающих в автономных системах теплоснабжения, и моделированию теплообменных процессов в многоконтурных теплообменных аппаратах. Для решения краевой задачи предложена итерационная процедура. На опытно-экспериментальном стенде проведены исследования модели, получены экспериментальные данные.

Результаты. Теоретически и экспериментально установлены зависимости расхода теплоносителя в контурах от количества теплоты. Разработана итерационная процедура. На основе опытно-экспериментального стенда были проведены исследования. По результатам проведенных экспериментов была построена номограмма теплового расчета многоконтурного теплообменного аппарата.

Выводы. Проведенные на созданном авторами опытно-экспериментальном стенде многоконтурного теплообменного аппарата эксперименты полностью подтверждают корректность полученных теоретических результатов и дают эффективный инструмент для построения промышленных образцов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автономная система теплоснабжения, теплообменники змеевикового типа, бак-аккумулятор, базовые конструктивные параметры, оптимизация энергоресурсов, опытно-экспериментальный стенд.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Пат. 81831, Україна, МПК F24D 11/00/ Багатоконтурний теплообмінний апарат змєєвикового типу для незалежних систем опалення та гарячого водопостачання / А. О. Олексюк, І. Г. Шитикова. (Україна); заявник Донбаська нац.акад.буд. та арх. – 04.02.2013; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13.
2. Компьютерное моделирование в инженерной практике / [А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев.]. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2008. – 1040 с.
3. Міхєєв М. А. Основи теплопередачі / М. А. Міхєєв, І. М. Міхєєва. – М. : Вища школа, 1977. – 336 с.
4. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств [Левченко Б. О., Акмен Р. Г., Братута Э. Г. та ін.]. – Харків : ХГПУ, 1999. – 420 с.
5. Василенко С. М. Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору / С. М. Василенко, В. В. Шутюк. – К. : УДУХТ, 2000. – 36 с.
6. Шитикова И. Г. Динамические характеристики подогревательно-аккумуляторных установок / А. А. Олексюк, А. М. Трофимчук, И. Г. Шитикова // Обчислювальна і прикладна математика. – 2016. – №1(121). – С. 78–88.
7. Солонин В. И. Моделирование теплообмена в змеевиковом теплообменнике применительно к реакторной установке «УНИТЕРМ» / В. И. Солонин, А. А. Сатин // Наука и Образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, Москва: Сетевое научное издание. – 2014. – № 10. – С. 398–412. ISSN 1994-0448. DOI:10.7463/1014.0727220.
8. Стенін О. А. Метод фіктивної координати в задачах оптимального управління системами з післядією / О. А. Стенін, В. П. Пасько, П. С. Хоменко // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2012. – № 20(40). – С. 116–122.
9. Темам Р. Уравнения Навье-Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – М. : Издательство «Мир», 1981. – 408 с.
10. Michael Athans. Optimal Control: An Introduction to the Theory and Its Applications / Michael Athans Peter L. Falb. – New York : McGraw-hill book company, 2006 – 879 p.

НЕЙРОИНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОИНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 004.825:004.932.72'1

FEATURE VECTOR GENERATION FOR THE FACIAL EXPRESSION RECOGNITION USING NEO-FUZZY SYSTEM

Bodyanskiy Ye. V. – Dr. Sc., Professor, Head of Control Systems Research Laboratory, Professor of Artificial Intelligence Department at Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

Kulishova N. Ye. – PhD, Professor of Media Systems and Technologies Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

Tkachenko V. Ph. – PhD, Professor, the Head of Media Systems and Technologies Department, Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The article is devoted to the problem of a training data set forming for the automatic human emotions recognition system on the basis of a multidimensional extended neo-fuzzy neuron. The aspects of choice the attributes vector's dimension and composition, their influence on the system learning rate are considered. The object of research is the method of multidimensional data clustering. The subject of research is two-dimensional images geometric features systematization.

Objective. The main goal of the work is to develop an approach to person's face expression description using geometric features fixed set that can be obtained by video sequence frames processing.

Method. To study the facial expressions recognition system it is proposed to form a feature vector consisting of characteristic points coordinates. There were selected points that relate to the location and shape of the eyelids, eyebrows, eye pupils, lips contours, nose wings, nasolabial folds. Such points can be easily found during the automatic image processing using known contour detectors. Also, the possibility of using for the human facial expression description not the coordinates of characteristic points, but the distances between them, was investigated. From these distances a different feature vector was created, the properties of which were compared with the points coordinates vector.

Results. The developed recognition system on the basis of a multidimensional extended neo-fuzzy neuron have been implemented in software and investigated for solving the problem of facial expression classification. A comparison between the attribute vectors that are different in composition and dimension is made. The structure for the feature vector, which provides high system learning rate, and does not require the additional structural elements was chosen.

Conclusions. The experimental study fully confirms the effectiveness of the developed approach for the human facial expressions recognition using a multidimensional extended neo-fuzzy neuron.

KEYWORDS: facial expressions recognition, characteristic features, neo-fuzzy neuron, membership function, fuzzy clustering, computational intelligence.

ABBREVIATIONS

2D – two-dimensional;
3D – three-dimensional;
FACS – facial action coding system;
AU – action units;
N – feature points number;
MENFN – multidimensional extended neo-fuzzy neuron;
PICS – Psychological Image Collection at Stirling image database;
CK – Extended Cohn-Kanade image database;

SURF – speeded up robust features detector and descriptor.

NOMENCLATURE

x_i – input data vector;
 w_{li} – l -th synaptic weight;
 i – number of nonlinear synapse in neo-fuzzy neuron;
 l – number of membership function in nonlinear synapse;
 $\mu_{li}(x_i)$ – the membership function on i -th input;

$\tilde{w}^T$ – synaptic weights vector;
 $f_i(x_i)$ – output signal of nonlinear neo-fuzzy synapse;
 $v_j(k)$ – output signal of system intermediate layer;
 $\hat{y}_j(k)$ – output signal of system first layer;
 m – number of emotion to recognize;
 $\tilde{y}(k)$ – system output signal.

X1, Y1, X2, Y2, ..., X35, Y35 – the coordinates of the proposed 35 feature points;

D1, ..., D24 – the distance indicators of the proposed 35 feature points position;

K1, ..., K14 – the ratio indicators of the proposed 35 feature points position.

INTRODUCTION

The human face is a communicative system with many inputs and many outputs, which is very flexible. To transfer information in this system, several signal groups are used [1, 2]:

1) static signals are relatively permanent signs, such as bone structure, soft tissues and general proportions. These signals are usually used to identify a person;

2) slow facial signals are changes in the person appearance that occur gradually over time, such as developing permanent wrinkles and changing the texture of the skin. These signals can reduce the distinctness of the facial features and prevent fast facial signals recognition;

3) artificial signals are exogenous facial features, such as eyeglasses and cosmetics. They can hide facial features or, conversely, strengthen;

4) fast facial signals are temporary changes in neuromuscular activity that can lead to visually detectable changes in the face appearance. These person atomic signals are the basis of facial expressions.

Given the significant role of the individual in social life, it is not surprising that the potential benefits of efforts to automate the facial signals analysis, in particular fast facial signals, are diverse and numerous. Especially it concerns human-computer interfaces. Automatic analysis of fast facial signals is used in various vision subsystems, including gaze tracking, lip reading, bimodal speech processing, morphemes visual synthesis, and the formation of commands based on facial expressions. Among the areas where they are applied [3]:

- control the movement of one or more vehicles, aircraft and car control;
- control of high-risk facilities;
- monitoring elderly patients in hospitals;
- video conferences, internet lectures and distance learning.

In numerous facial expressions automatic recognition systems, two approaches to encoding information are used primarily: the detection of facial features changes and the facial muscles action. These approaches are based on the work of psychologists and physiologists. To use them in automatic analysis, it is necessary to find corresponding

changes in the image characteristics (static in the photo or dynamic in the video sequence) for each psycho-physiological feature. Such characteristics include contour, structural and textural image descriptions. For example, these are contour corners, contour extreme points, individual regions color data, the texture properties, etc.

The human-computer interface involves interaction in real time. This means that the number of characteristics that are calculated from the person's face image during the dialogue should not be too large. On the other hand, for a precise identification of a person's state, a set of characteristics cannot be small, since the possible emotional states number is large enough. Therefore, the problem of a data set forming for the automatic person's expression recognition on the image remains unresolved.

The object of study is the method of multidimensional data clustering.

The subject of study is two-dimensional images geometric features systematization.

The purpose of the work is increasing the accuracy of a person's face expression automatic recognition in real-time, when the sizes of the training data are small.

1 PROBLEM STATEMENT

Automatic facial expressions recognition is reduced to solving the data clustering problem. If the data comes from the video, it is obvious that it can contain information about static, slow and exogenous signals that do not change from frame to frame. However, the most important are the fast signals that need to be registered, processed and recognized in each frame. The changing fast signals dynamics also indicate a psycho-emotional state. Therefore, it is necessary to register and process the information about fast signals formation rate in real time. Such rigid limitations to the rate of facial expressions automatic recognition method lead to the necessity of using a compact but informative features vector that will ensure the information preservation and high clustering rate.

The main goal of this work is to choose a way of face features detecting for an online human facial expression recognition using a system based on multidimensional neo-fuzzy neurons.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The task of automatic facial expression recognition is complex and multistage. It includes the image pre-processing and face area searching. After the face area is detected, it is possible to recognize the emotion according to the facial characteristic features set. Depending on the chosen approach, the next stage of the problem solving - the calculation of the characteristic vector. If the recognition is performed in real time, then the 3D model use could be inefficient due to the high time costs. For online applications, the 2D image features vector (received as a result of frame-based analysis) will be justified.

The recognition of faces and their expressions uses several descriptor types. The most common are local binary masks (Local Binary Patterns), attributes selection using Gabor Facial Features, active and adaptive models of the shape and appearance (Active Shape Model, Active Appearance Model) [4]. Examples of these descriptors are shown in Fig. 1. In addition, curvilinear contours can be represented in the form of splines, as proposed, for example, in [5]. Local binary masks can be attributed more likely to textural features, since they represent generalized histograms of the face image fixed segments. Such a description will be less informative in emotions recognition.

The Gabor filtering results are definitely interesting for the facial expression recognition. Usually features detected in the image are either geometric shape features of the facial components (eyes, lips, wings of the nose, etc.) or the singular points location (corners of the eyes, mouth, etc.) or appearance elements, representing the skin face texture, including wrinkles, bulges and furrows. Typical examples of geometric characteristics are described in [6], where a 19-point grid is used; in [7], where a model of shape, defined by 58 landmarks for the face is used, and in [8]. Some examples of a hybrid description of the geometric features and appearance model are the methods in [9], where the eye, eyebrows and mouth shapes and wrinkles (crows and nasolabial furrows) were used, and in [10], where 26 facial points around the eyes, eyebrows and mouth were used and the same descriptors as in [9]. Methods based on appearance are the use of Gabor wavelets in [11, 12], and the application of a holistic, monochrome, spatial and temporal patterns of facial coefficients [13]. Adaptive model in this sense is more useful, since it includes not only nodal points, but also contours (eyelids, eyebrows, lips, chin). Such signs, undoubtedly, convey exhaustive information about the emotional state of a person, even if it has a weak degree of expression.

Now, for the labeling of facial actions, the facial action coding system is widely used [1, 2]. FACS links the changes in the face to the muscles actions that produce them. It defines 44 different action units, which are considered to be the minimum visually perceptible face movements. The face expression descriptors are most often used for the six basic emotions (fear, sadness, happiness, anger, disgust, surprise) suggested by Ekman and theorists of discrete emotions. They assume that these emotions are everywhere displayed and recognized from facial expressions. FACS also provides rules for recognizing AU time segments (start, culmination, completion) in the front-end video. However, the main disadvantage of this system for automatic video recognition is the fact that the movements of the facial muscles on 2D frame images can not always be detected by filters, detectors, or other algorithms to numerically evaluate the properties of images. The researchers noted that methods based on geometric features, often exceeded those that are based on the use, for example, of wavelets or Gabor eigenvectors [11].

A separate problem is the definition of dimension of such a model. It is directly related to the clustering method, which is used for recognition. For example, the model in Fig. 1c contains 83 points, taking into account the number of their coordinates, the dimension of the feature vector can be equal to $N = 166$ (in the 2D case) or $N = 249$ (in the 3D case). If a neural network or neuro-fuzzy system is selected for clustering, the number of adjusting parameters can be 2^N .

For some types of neural networks, neuro-fuzzy systems, it is possible to reduce the number of configurable parameters to $N \times M$, where M is the dimension of the output vector (it is determined by the number of recognizable emotions and their combinations). Nevertheless, for real-time processing, the represented dimension of the attributes input vector will also be unacceptable.

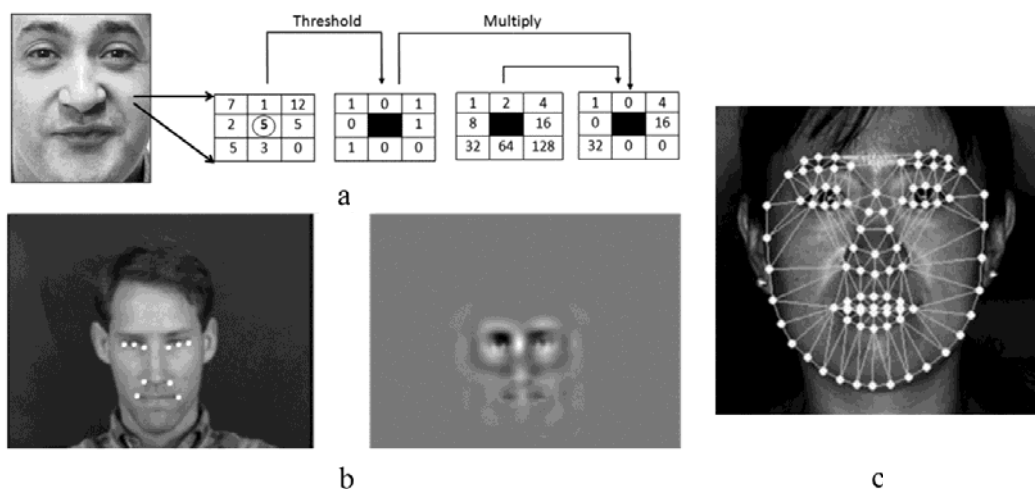


Figure 1 – Examples of approaches to the face characteristic features determining: a – using local binary masks; b – using the Gabor filter; c – using the adaptive model of appearance

3 MATERIALS AND METHODS

In this paper, the system of human face expressions automatic recognition in real time, based on the multidimensional extended neo-fuzzy neuron [14], is considered.

This system implements a fuzzy Takagi-Sugeno inference of an arbitrary order ($p-1$) in the form:

$$\text{IF } x_i \text{ IS } x_{li} \text{ THEN THE } f(x_i) \text{ IS} \\ w_{li}^0 + w_{li}^1 x_i + \dots + w_{li}^p x_i^p, l = 1, 2, \dots, h. \quad (1)$$

Its architecture is shown in Fig. 2. The input layer of the system consists of extended neo-fuzzy neurons, the intermediate layer consists of elements performing nonlinear transform, and the output layer combines the output values into the resulting vector.

In the input layer, the extended neo-fuzzy neurons convert the input signals $x(k) = (x_1(k), \dots, x_i(k), \dots, x_n(k))^T$ as follows:

$$f_i(x_i) = w_{li}^T \tilde{\mu}_i(x_i), \quad (2)$$

$$\hat{y} = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) = \sum_{i=1}^n w_{li}^T \tilde{\mu}_i(x_i) = \tilde{w}^T \tilde{\mu}(x), \quad (3)$$

where $\tilde{w}^T = (w_1^T, \dots, w_i^T, \dots, w_n^T)^T$, $\tilde{\mu}(x) = (\tilde{\mu}_1^T(x_1), \dots, \tilde{\mu}_i^T(x_i), \dots, \tilde{\mu}_n^T(x_n))^T$, w_{li} – l -th synaptic weight of the i -

th nonlinear synapse in neo-fuzzy neuron; $l = 1, 2, \dots, h$, $i = 1, 2, \dots, n$; $\mu_{li}(x_i)$ – the l -th membership function in the i -th nonlinear synapse, realizing the fuzzification of a crisp component x_i .

Elements of the intermediate layer compute the signal:

$$v_j(k) = \psi(\tilde{y}_j(k)) = \tanh(\tilde{y}_j(k)). \quad (4)$$

Output layer detects the maximums in the calculated learning algorithm values $v_j(k)$, $j = 1, 2, \dots, m$; m – number of emotion to recognize:

$$\tilde{y}(k) = \sup_{j=1}^m \{v_j(k)\}, \quad (5)$$

which is necessary if the learning vector set in the range $[0, 1]$.

As a basis for the feature vector, it is proposed to use a set of 35 characteristic points. Their location scheme is shown in Fig. 3.

Taking into account the number of their coordinates $X1, Y1, X2, Y2, \dots, X35, Y35$, the dimension of the feature vector can be equal to $N = 70$ (for the recognition by 2D images). These points can be localized in the face area using contour detectors, for example, using SURF [15] or Shi-Tomasi detectors [16].

The placement of such points can indicate the basic facial actions of the FACS system in the facial dynamics. The action unit codes and the numbers of the corresponding characteristic points are presented in Table 1.

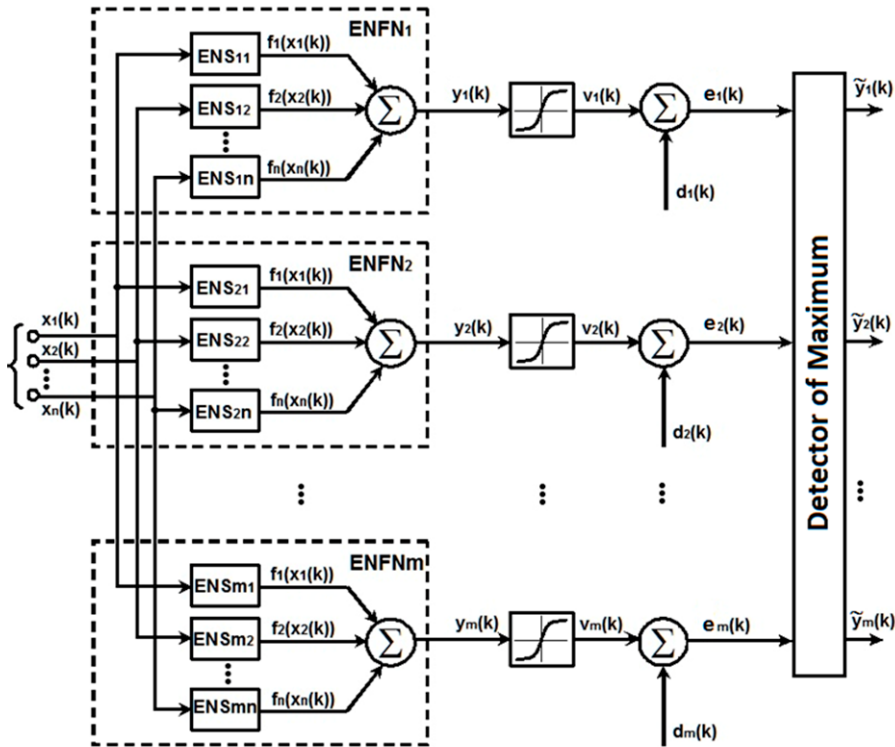


Figure 2 – Multidimensional extended neo-fuzzy neuron

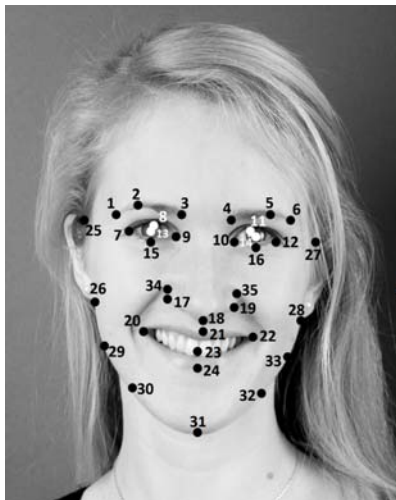


Figure 3 – 35 feature points location

As noted in [1, 2], the basic human emotions (anger, fear, disgust, happiness) correspond to the repetitive sequences of certain AUs:

Anger	A4+A5+A7+A23
Disgust	A9+A15+A16
Fear	A1+A2+A4+A5+A7+A20+ A 26
Happiness	A6+A12
Sorrow	A1+A4+A15
Surprise	A1+A2+A5+A26.

Then the emotion of anger, for example, can be detected by changes in the position of proposed points as:

$A4+A5+A7+A23 = (1, 2, 3, 7, 8) + (7, 8) + (3, 7, 8, 15) + (20, 21, 24, 29, 30, 31)$.

for the right side of the face and

$A4+A5+A7+A23 = (4, 5, 6, 11, 12) + (11, 12) + (4, 11, 12, 16) + (21, 24, 22, 31, 32, 33)$.

for the left side of the face. Other basic emotions are indicated using the proposed set of points in a similar way.

Adaptive models of shape appearance use not only positions of individual points, but also the location of especial lines. These include nasolabial folds, facial wrinkles and so on. In addition, the relative position of the eyes, corners of the mouth, and the wings of the nose also indicate a change in the state of a person. These indicators can be calculated on the basis of the values of the coordinates of the proposed 35 characteristic points.

Absolute and relative distances from the corners of the lips to the outer corners of the eyes (Fig. 4) are calculated in accordance with the formula (6):

$$\begin{aligned}
 D1 &= \sqrt{(X17 - X20)^2 + (Y17 - Y20)^2}, \\
 D2 &= \sqrt{(X19 - X22)^2 + (Y19 - Y22)^2}, \\
 m &= \sqrt{(X18 - X21)^2 + (Y18 - Y21)^2}, \\
 K12 &= \frac{D1}{m}, \\
 K13 &= \frac{D2}{m}.
 \end{aligned} \quad (6)$$

The distance from lips corners to the outer eyes corners (Fig. 4):

$$\begin{aligned}
 D3 &= \sqrt{(X7 - X20)^2 + (Y7 - Y20)^2}, \\
 D4 &= \sqrt{(X12 - X22)^2 + (Y12 - Y22)^2}.
 \end{aligned} \quad (7)$$

The distance from the lips corners to the eyebrows outer corners (Fig. 4):

$$\begin{aligned}
 D5 &= \sqrt{(X1 - X20)^2 + (Y1 - Y20)^2}, \\
 D6 &= \sqrt{(X6 - X22)^2 + (Y6 - Y22)^2}.
 \end{aligned} \quad (8)$$

Table 1 – The action unit codes and the numbers of the corresponding characteristic points

Facial action units (AU) of the FACS system	Numbers of the corresponding characteristic points of the right side of the face	Numbers of the corresponding characteristic points of the left side of the face
A1	2, 3	4, 5
A2	1,2	5,6
A4	1,2,3, 7,8	4,5,6,11,12
A5	7, 8	11, 12
A6	7,15,34	12, 14, 35
A7	3,7,8,15	4,11,12,16
A9+A10	1,2,3,7,8,9,34,17,20,21	4,5,6,10,11,12,35,19,20,22
A11	17,34	19,35
A12	20,21,24,34,29,30,31	21,24,22,35,31,32,33
A13	20,21,24,34,29,30,31	21,24,22,35,31,32,33
A14	20,21,24,34,29,30,31	21,24,22,35,31,32,33
A15	20,21,24,29,30,31	21,24,22,31,32,33
A16	20,21,24,30,31	21,24,22,31,32
A17	20,21,24,30,31	21,24,22,31,32
A18	20,21,24,34,29,30	21,24,22,35,32,33
A20	20,21,24,29,30,31	21,24,22,31,32,33
A22	20,21,24,34,29,30,31	21,24,22,35,31,32,33
A23	20,21,24,29,30,31	21,24,22,31,32,33
A24	20,21,24	21,24,22
A25, A26,A27, A28	20,21,24,29,30,31	21,24,22,31,32,33
A41,A42,A43	1,2,3,7,8,9	4,5,6,10,11,12
A44,A45,A46	1,2,3,7,8,9,15	4,5,6,10,11,12,16

The distance from the lips corners to the eyebrows inner corners and their ratio (Fig. 4):

$$\begin{aligned} D7 &= \sqrt{(X3 - X20)^2 + (Y3 - Y20)^2}, \\ D8 &= \sqrt{(X4 - X22)^2 + (Y4 - Y22)^2}, \\ K11 &= \frac{D7}{D8}. \end{aligned} \quad (9)$$

The mutual eyebrows and eyes position (Fig. 5):

$$\begin{aligned} D10 &= Y2 - Y8, & D14 &= Y8 - Y15, \\ D11 &= Y5 - Y11, & & \\ D12 &= Y2 - Y13, & D15 &= Y11 - Y16, \\ D13 &= Y5 - Y14, & & \end{aligned} \quad (10)$$

The eyebrows position and curvature (Fig. 5):

$$\begin{aligned} D17 &= Y3 - Y1, \\ D18 &= Y3 - Y2, \\ D19 &= Y4 - Y6, \\ D20 &= Y4 - Y5. \end{aligned} \quad (11)$$

The mutual position of the eyes, wings of the nose and cheeks (Fig. 5):

$$\begin{aligned} D21 &= \sqrt{(X9 - X34)^2 + (Y9 - Y34)^2}, \\ D22 &= \sqrt{(X10 - X35)^2 + (Y10 - Y35)^2}, \\ D23 &= \sqrt{(X17 - X34)^2 + (Y17 - Y34)^2}, \\ D24 &= \sqrt{(X19 - X35)^2 + (Y19 - Y35)^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

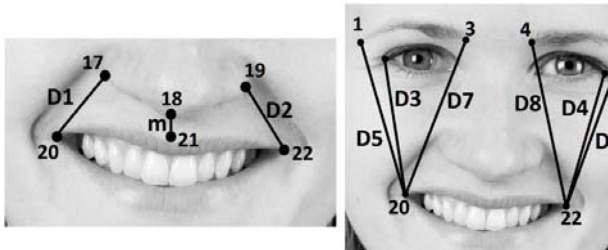


Figure 4 – Scheme for calculating the absolute and relative distances from the lips corners to the outer eyes corners, the distance from the lips corners to the eyebrows outer corners, the distance from the lips corners to the eyebrows inner corners and their ratio

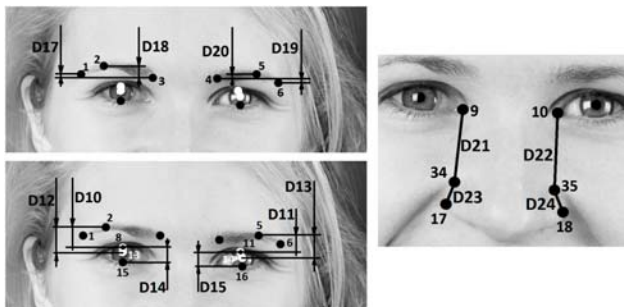


Figure 5 – Scheme for calculating the mutual eyebrows and eyes position, the eyebrows position and curvature, the mutual position of the eyes, wings of the nose and cheeks

© Bodyanskiy Ye. V., Kulishova N. Ye., Tkachenko V. Ph., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-10

The relative mouth opening and width (Fig. 6):

$$\begin{aligned} a &= Y24 - Y21, \\ b &= Y31 - Y18, \\ c &= X19 - X17, \\ d &= X22 - X20, \\ K1 &= \frac{a}{b}; K2 = \frac{d}{c}; K14 = \frac{d}{a}. \end{aligned} \quad (13)$$

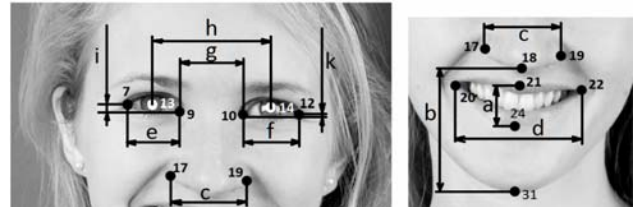


Figure 6 – Scheme for calculating the relative mouth opening and width, the relative eye size and inclination

The relative eye size (Fig. 6):

$$\begin{aligned} e &= X9 - X7, \\ f &= X12 - X10, \\ K3 &= \frac{e}{c}; K4 = \frac{f}{c}. \end{aligned} \quad (14)$$

The eye inclination (Fig.6):

$$\begin{aligned} g &= X10 - X9, \\ h &= X14 - X13, \\ i &= Y9 - Y7, \\ k &= Y12 - Y10, \\ K5 &= \frac{e}{h}; K6 = \frac{f}{h}; K7 = \frac{i}{g}; K8 = \frac{k}{g}. \end{aligned} \quad (15)$$

4 EXPERIMENTS

For a comparative evaluation of the different in composition and dimension characteristic points vectors, photographs from two open image databases that were designed to solve the problems of facial expressions recognition were used: Psychological Image Collection at Stirling [17], partly from the Extended Cohn-Kanade database [18]. Another important question was the verification of the recognition system on the basis of the neo-fuzzy neuron, if the training sample is small (up to 1000 samples). Photographs were selected from the image databases, where the person emotional state expression degree is different – from barely visible, to strongly noticeable.

The total number of photos in the training sample was 344, their distribution by basic emotions is shown in Table 2.

Table 2 – Dimensions of photos training sets for single emotions

Emotion	Anger	Disgust	Fear	Happiness	Sorrow	Surprise	Neutral
Data set size	49	66	35	45	19	50	80

For these photographs, the coordinates of the proposed 35 points were found: $X_1, Y_1, X_2, Y_2, \dots, X_{35}, Y_{35}$, and then calculated the indicators $D_1, \dots, D_{24}$ and $K_1, \dots, K_{14}$. To test the possibility of the feature vector dimension reducing, two sets of data were additionally formed. The first set includes the coordinates of four points from the original vector. These are points 13, 14, 18, 23 (Fig. 7a). In the second set – the coordinates of 22 points (Fig. 7b).

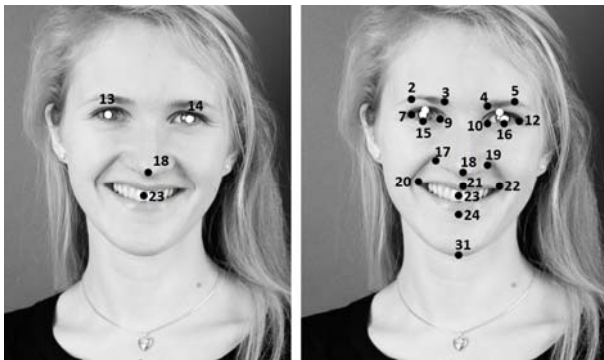


Figure 7 – Disposition of points in additional data sets

The resulting feature vectors were used to learn a facial expression automatic recognizing system based on a multidimensional extended neo-fuzzy neuron (Fig. 2). In the power polynomial of this neuron nonlinear synapse, the terms number equal to three is assumed. Thus, this system implements the Takagi-Sugeno second order fuzzy inference. The number of membership functions and learning epochs was variable. The recognition system learning results are given in Tables 3–6.

5 RESULTS

As a result of the experiment, it was found that the reduction of the feature vector dimension can be compensated by increasing the membership functions number in the multidimensional extended neo-fuzzy neuron structure. Characteristics in the form of distances between feature points reduce the system learning rate. This problem can also be solved by increasing the membership functions number.

Table 3 – Percentage of unrecognized emotions, when the feature vector includes the coordinates of 4 points

Number of learning epochs	Basic emotions							The average percentage of unrecognized emotions
	Anger	Disgust	Fear	Happiness	Sorrow	Surprise	Neutral	
Number of membership functions = 7								
10	55	80	100	86.7	100	92	53.8	93
30	67.4	72.7	100	82.2	89.5	82	50	77,3
50	63.3	65.2	100	77.8	89.5	76	50	75,3
70	65.3	63.6	100	77.8	89.5	72	48.8	86
150	61.2	59.1	100	77.8	84.2	68	47.5	84
2000	57.1	42.4	92.9	75.6	57.9	46	51.3	46
Number of membership functions = 9								
2000	59.2	37.9	80	73.3	36.8	36	43.8	58
Number of membership functions = 11								
2000	57.1	50	68.6	66.7	36.8	40	47.5	45

Table 4 – Percentage of unrecognized emotions, when the feature vector includes the coordinates of 22 points

Number of learning epochs	Basic emotions							The average percentage of unrecognized emotions
	Anger	Disgust	Fear	Happiness	Sorrow	Surprise	Neutral	
Number of membership functions = 7								
10	63.3	63.6	94.3	77.8	89.5	62	66.3	73.8
30	53	48.5	82.9	68.9	84.2	40	58.8	62.3
50	51	40.1	77.1	66.7	84.2	30	53.8	57.5
70	48.9	43.9	65.7	48.9	73.7	28	42.5	50.2
150	36.7	33.3	65.7	44.4	36.8	20	36.3	39.0
2000	18.4	4.6	25.7	15.6	15.8	6	17.5	14.8
Number of membership functions = 9								
2000	12.2	10.6	17.1	6.7	10.5	4	18.8	11.4
Number of membership functions = 11								
2000	6.1	4.6	14.3	2.2	5.3	2	11.3	6.5

Table 5 – Percentage of unrecognized emotions, when the feature vector includes the coordinates of 35 points

Number of learning epochs	Basic emotions							The average percentage of unrecognized emotions
	Anger	Disgust	Fear	Happiness	Sorrow	Surprise	Neutral	
Number of membership functions = 7								
10	63.3	75.5	65.2	91.4	84.4	94.7	64	77.5
30	53	65.3	39.4	85.7	62.2	78.9	36	68.8
50	51	53.1	30.3	62.9	51.1	63.2	30	62.5
70	48.9	44.9	27.3	65.7	48.9	52.6	26	51.3
150	36.7	30.6	18.2	51.4	33.3	42.1	24	40
2000	18.4	12.2	6.1	20	6.7	15.8	4	11.3
Number of membership functions = 9								
2000	2	4.6	8.6	4.4	5.3	0	6.3	4.4
Number of membership functions = 11								
2000	2	0	5.7	4.4	0	0	0	1.7

Table 6 – Percentage of unrecognized emotions, when the feature vector consists of the parameters D1, ..., D24 and K1, ..., K14

Number of learning epochs	Basic emotions							The average percentage of unrecognized emotions
	Anger	Disgust	Fear	Happiness	Sorrow	Surprise	Neutral	
Number of membership functions = 11								
2000	26.5	6.1	28.6	22.2	15.8	4	15	16.9
4000	24.5	3	25.7	24.4	15.8	4	11.3	15.5
8000	22.5	3	25.7	17.8	15.8	2	12.5	14.2
Number of membership functions = 13								
8000	18.4	6.1	17.1	11.1	15.8	2	7.5	11.1
Number of membership functions = 17								
8000	12.2	4.6	5.7	4.4	5.3	4	5	5.9
Number of membership functions =21								
8000	4.1	1.5	5.7	0	0	0	1.3	1.8

6 DISCUSSION

The experiment shows that for the system of emotions recognition based on a multidimensional expanded neo-fuzzy neuron, there is not enough a feature vector that includes only the coordinates of four characteristic points (position of the eyes, nose and mouth). The recognition accuracy cannot be increased by increasing the training duration or the nonlinear synapses number. Obviously, it would be easier to find four characteristic features in the video sequence using automatic detectors, but for the clustering system will not be enough of these data.

On the other hand, the use of the distances between facial features to describe the facial expression dynamics leads to the need to increase the duration of the system training. Since these distances are parameters that are to be calculated from the coordinates (that is, in fact, they are indirect data), their application for automatic analysis of facial expressions is less preferable.

As a result of the experiment, a high efficiency of vector consisting of 35 characteristic points coordinates was established for automatic recognition of facial expressions using a system based on a multidimensional expanded neo-fuzzy neuron. High clustering accuracy is achieved already for 2000 learning epochs with 11 nonlinear synapses in the neuron structure. The reduction of the feature vector dimension (up to 22 points) leads to an increase of training duration and can be compensated by increasing the synapses number to 21. Let's note here, that the number of training samples does not exceed 1000. This is quite important for many practical problems, when

training data of tens and hundreds of thousands of samples are inaccessible.

CONCLUSIONS

The problem of basic human emotions automatic recognition in real time is considered. For this task, a multidimensional extended neo-fuzzy neuron is used.

The scientific novelty of the work lies in the fact that the feature vector dimensionality is determined for the proposed computational architecture. It can include both the coordinates of individual characteristic points, and the distances between them. These data vector correlate well with the well-known facial action coding system. The system learning rate can be increased by increasing the number of neo-fuzzy neuron membership functions. Detection of characteristic points in the automatic recognition system can be realized in real time using standard detectors. Despite the small volumes of the learning sample set, the system provides high recognition accuracy. This factor is especially important in such practical applications, where it is not always possible to obtain thousands and tens of thousands of training samples.

The practical significance of obtained results is that the size of the feature vector has been found that provides high accuracy of automatic recognition of basic emotions from 2D images. The experimental results allow using this vector to study the dynamics of facial expression by video.

Prospects for further research are to study the recognition of subtle facial expressions (fatigue, pain, uncertainty) using a system based on a multidimensional neo-fuzzy neuron.

REFERENCES

1. Ekman P., Friesen W. V. Facial Action Coding System. Palo Alto, USA, Consulting Psychologist Press, 1978.
2. Ekman P., Friesen W. V., Hager J. C. Facial Action Coding System, A Human Face. Salt Lake City, USA, 2002.
3. Pantic M., Bartlett M. S. eds: K. Delac and M. Grgic Machine Analysis of Facial Expressions, Face Recognition, InTech Education and Publishing, 2007, Available from: http://www.intechopen.com/books/face_recognition/machine_analysis_of_facial_expressions.
4. eds: S. Z. Li, A. K. Jain. Second edition Handbook of Face Recognition. London, Springer-Verlag, 2011, 695 p.
5. Kryvonos Ju. G., Krak Ju. V., Jefimov G. M. ta in. Modeljuvannja ta analiz mimichnyh projaviv emocij, Dopovid NAN Ukraïny, 2008, No. 12, pp. 51–55.
6. Gokturk S. B., Bouguet J. Y., Tomasi C., Girod B. Model-based face tracking for view independent facial expression recognition, *Proc. IEEE Int'l Conf. Face and Gesture Recognition*, 2002, pp. 272–278.
7. Chang Y., Hu C., Feris R., Turk M. Manifold based analysis of facial expression, *J. Image & Vision Computing*, 2006, Vol. 24, No. 6, pp. 605–614.
8. Pantic M., Rothkrantz L.J.M. Facial action recognition for facial expression analysis from static face images, *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, 2004, Part B, Vol. 34, No. 3, pp. 1449–1461.
9. Tian Y. L., Kanade T., Cohn J. F.; eds Li S. Z., Jain A. K. Facial Expression Analysis. Handbook of Face Recognition. New York, Springer, 2005, pp. 247–276.
10. Zhang Y., Ji Q. Active and dynamic information fusion for facial expression understanding from image sequence, *IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence*, 2005, Vol. 27, No. 5, pp. 699–714.
11. Bartlett M. S., Littlewort G., Frank M. G., Lainscsek C., Fasel I., Movellan J. Fully automatic facial action recognition in spontaneous behavior, *Proc. IEEE Conf. Automatic Face & Gesture Recognition*, 2006, pp. 223–230.
12. Guo G., Dyer C. R. Learning from Examples in the Small Sample Case – Face Expression Recognition, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 2005, Part B, Vol. 35, No. 3, pp. 477–488.
13. Anderson K., McOwan P. W. A Real-Time Automated System for Recognition of Human Facial Expressions, *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 2006, Part B, Vol. 36, No. 1, pp. 96–105.
14. Hu Z., Bodyanskiy Ye. V., Kulishova N. Ye., Tyshchenko O. K. A Multidimensional Extended Neo-Fuzzy Neuron for Facial Expression Recognition, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2017, Vol. 9, No. 9, pp. 29–36.
15. Bay H., Ess A., Tuytelaars T., Van L. Gool SURF: Speeded up robust features, *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, Vol. 110, pp. 346–359.
16. Shi J., Tomasi C. Good Features to Track, *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1994, pp. 593–600.
17. http://pics.psych.stir.ac.uk/2D_face_sets.htm
18. Lucey P., Cohn J. F., Kanade T., Saragih J., Ambadar Z., Matthews I. The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression, *Proceedings of IEEE workshop on CVPR for Human Communicative Behavior Analysis*, San Francisco, USA, 2010.

Received 08.05.2018.

Accepted 27.05.2018.

УДК 004.825:004.932.72'1

ФОРМУВАННЯ ВЕКТОРУ ХАРАКТЕРНИХ ОЗНАК ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ ВИРАЗІВ ОБЛИЧЧЯ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕО-ФАЗЗИ СИСТЕМИ

Бодяньський Є. В. – д-р техн. наук, професор, керівник Проблемної науково-дослідної лабораторії автоматизованих систем управління, професор кафедри штучного інтелекту Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

Кулішова Н. Є. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри медіасистем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

Ткаченко В. П. – канд. техн. наук, професор, завідувач кафедри медіасистем та технологій Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Стаття присвячена вивченню проблеми формування набору навчальних даних для системи автоматичного розпізнавання емоцій людини на основі багатовимірного розширеного нео-фаззи нейрона. Розглядаються аспекти вибору розмірності і складу вектору ознак, їх впливу на швидкість навчання системи.

Об'єктом дослідження є метод кластеризації багатовимірних даних. Предмет дослідження – систематизація геометричних ознак двовимірних зображень.

Основна мета роботи – розробка підходу до опису виразу обличчя людини за допомогою фіксованого набору геометричних ознак, які можуть бути отримані в ході обробки кадрів відеоряду.

Метод. Для навчання системи розпізнавання виразів обличчя пропонується утворити вектор ознак, що складається з координат характерних точок. Вибрані такі точки, які пов'язані з розташуванням і формою зіниць очей, контурами губ, повік, брів, крил носа, носогубних складок. Подібні точки досить легко можна виділяти в автоматичному режимі обробки зображень за допомогою відомих контурних детекторів. Також розглянуто можливість використання для опису вираження обличчя не координат характерних точок, а відстаней між ними. З цих відстаней створено інший вектор ознак, властивості якого було порівняно з властивостями вектору з координат точок.

Результати. Розроблена система розпізнавання на базі багатовимірного розширеного нео-фаззи нейрона була реалізована у програмному забезпеченні та досліджена для вирішення проблеми класифікації виразів обличчя. Зроблено порівняння векторів атрибутів, що відрізняються за складом та розмірами. Обрано таку структуру вектору ознак, що забезпечує високу швидкість навчання системи, та не вимагає введення додаткових структурних елементів.

Висновки. Експериментальне дослідження повністю підтверджує ефективність розробленого підходу для розпізнавання виразів обличчя людини з використанням багатовимірного нео-фаззи нейрона.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розпізнавання виразів обличчя, характерні ознаки, нео-фаззи нейрон, функція приналежності, нечітка кластеризація, обчислювальний інтелект.

УДК 004.825:004.932.72'1

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРА ХАРАКТЕРНЫХ ПРИЗНАКОВ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫРАЖЕНИЙ ЛИЦА С ПОМОЩЬЮ НЕО-ФАЗЗИ СИСТЕМЫ

Бодянский Е. В. – д-р техн. наук, профессор, руководитель Проблемной научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем управления, профессор кафедры искусственного интеллекта Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Кулишова Н. Е. – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры медиасистем и технологий Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Ткаченко В. Ф. – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой медиасистем и технологий Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Статья посвящена изучению проблемы формирования набора обучающих данных для системы автоматического распознавания эмоций человека на основе многомерного расширенного нео-фаззи нейрона. Рассматриваются аспекты выбора размерности и состава вектора признаков, их влияния на скорость обучения системы.

Объектом исследования является метод кластеризации многомерных данных. Предмет исследования – систематизация геометрических признаков двумерных изображений.

Основная цель работы – разработка подхода к описанию выражения лица человека с помощью фиксированного набора геометрических признаков, которые могут быть получены в ходе обработки кадров видеоряда.

Метод. Для обучения системы распознавания выражений лица предлагается создать вектор признаков, состоящий из координат характерных точек. Выбраны такие точки, которые связаны с расположением и формой зрачков глаз, контур губ, век, бровей, крыльев носа, носогубных складок. Подобные точки достаточно легко можно выделять в автоматическом режиме обработки изображений с помощью известных контурных детекторов. Также рассмотрена возможность использования для описания выражения лица не координат характерных точек, а расстояний между ними. Из этих расстояний создан другой вектор признаков, свойства которого были сравнены со свойствами вектора из координат точек.

Результаты. Разработанная система распознавания на основе многомерного расширенного нео-фаззи нейрона реализована в программном обеспечении и исследована для решения проблемы классификации выражений лица. Выполнено сравнение между векторами атрибутов, которые отличаются по составу и размерности. Выбрана такая структура вектора признаков, которая обеспечивает высокую скорость обучения системы, и не требует введения дополнительных структурных элементов.

Выводы. Экспериментальное исследование полностью подтверждает эффективность разработанного подхода для распознавания выражений лица человека с использованием многомерного нео-фаззи нейрона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: распознавание выражений лица, характерные признаки, нео-фаззи нейрон, функция принадлежности, нечеткая кластеризация, вычислительный интеллект.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

- Ekman P. Facial Action Coding System / P. Ekman, W. V. Friesen. – Palo Alto, USA : Consulting Psychologist Press, 1978.
- Ekman P. Facial Action Coding System, A Human Face / P. Ekman, W. V. Friesen, J. C. Hager. – Salt Lake City, USA, 2002.
- Pantic M., Bartlett M. S. Machine Analysis of Facial Expressions, Face Recognition/ eds: K. Delac and M. Grgic. – InTech Education and Publishing, 2007. –Available from: http://www.intechopen.com/books/face_recognition/machine_analysis_of_facial_expressions.
- Handbook of Face Recognition / eds: S.Z. Li, A. K. Jain. Second edition. – London: Springer-Verlag, 2011. – 695 p.
- Кривонос Ю. Г. Моделювання та аналіз мимічних проявів емоцій / Ю. Г. Кривонос, Ю. В. Крак, Г. М. Єфімов та ін. // Доповіді НАН України. – 2008. – № 12. – С. 51–55.
- Gokturk S. B. Model-based face tracking for view independent facial expression recognition / S.B. Gokturk, J. Y. Bouguet, C. Tomasi, B. Girod // Proc. IEEE Int'l Conf. Face and Gesture Recognition. – 2002. – P. 272–278.
- Chang, Y. Manifold based analysis of facial expression / Y. Chang, C. Hu, R. Feris, M. Turk // J. Image & Vision Computing. – 2006. – Vol. 24, No. 6. – P. 605–614.
- Pantic M. Facial action recognition for facial expression analysis from static face images / M. Pantic, L. J. M. Rothkrantz // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 2004. – Part B, Vol. 34, No. 3. – P. 1449–1461.
- Facial Expression Analysis. Handbook of Face Recognition / [Y. L. Tian, T. Kanade, J. F. Cohn]; eds Li S. Z., Jain A. K. – New York : Springer, 2005. – P. 247–276.
- Zhang Y. Active and dynamic information fusion for facial expression understanding from image sequence/ Y. Zhang, Q. Ji // IEEE Trans. Pattern Analysis & Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, No. 5. – P. 699–714.
- Bartlett M. S. Fully automatic facial action recognition in spontaneous behavior / M. S. Bartlett, G. Littlewort, M. G. Frank, C. Lainscsek, I. Fasel, J. Movellan // Proc. IEEE Conf. Automatic Face & Gesture Recognition. – 2006. – P. 223–230.
- Guo G. Learning from Examples in the Small Sample Case – Face Expression Recognition / G. Guo, C.R. Dyer // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. – 2005. – Part B, Vol. 35, No. 3. – P. 477–488.
- Anderson K. A Real-Time Automated System for Recognition of Human Facial Expressions / K. Anderson, P.W. McOwan // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. – 2006. – Part B, Vol. 36, No. 1. – P. 96–105.
- Hu Z. A Multidimensional Extended Neo-Fuzzy Neuron for Facial Expression Recognition / Z. Hu, Ye. V. Bodyanskiy, N. Ye. Kulishova, O. K. Tyshchenko // International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA). – 2017. – Vol. 9, No. 9. – P. 29–36.
- Bay H. SURF: Speeded up robust features / H. Bay, A. Ess, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Computer Vision and Image Understanding. – 2008. – Vol. 110. – P. 346–359.
- Shi J. Good Features to Track / J. Shi, C. Tomasi // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1994. – P. 593–600.
- http://pics.psych.stir.ac.uk/2D_face_sets.htm
- Lucey P. The Extended Cohn-Kanade Dataset (CK+): A complete dataset for action unit and emotion-specified expression / P. Lucey, J. F. Cohn, T. Kanade, J. Saragih, Z. Ambadar, I. Matthews // Proceedings of IEEE workshop on CVPR for Human Communicative Behavior Analysis, San Francisco, USA. – 2010.

ВИКОРИСТАННЯ ДОВЖИННОЇ МІРИ ПОДІБНОСТІ В ЗАДАЧАХ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ

Кондрук Н. Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Дослідження присвячено розробці гнучкого математичного апарату, який мав би досить широкий спектр засобів для групування об'єктів за різними видами мір подібності. Це дає можливість в межах розробленого підходу ефективно розв'язувати достатньо широкі класи прикладних задач із різних предметних областей та проводити розбиття об'єктів кластерами різних геометричних форм.

Метою дослідження є підвищення ефективності розв'язання прикладних задач кластеризації шляхом використання довжинної міри подібності векторних ознак об'єктів.

Методи. Описано нечітке бінарне відношення та його функцію належності, що характеризує схожість об'єктів за довжинною мірою подібності їх векторних ознак. Модифіковано метод однорівневої кластеризації, заснований на нечітких бінарних відношеннях для використання довжинної міри подібності. При цьому задаються певні величини – пороги кластеризації, що характеризують ступінь подібності об'єктів в середині кластеру. Змінюючи пороги кластеризації можна проаналізувати динаміку формування кластерів, дослідити їх структуру та взаємозв'язки між об'єктами, визначити граничні об'єкти, зробити ґрунтовніший аналіз отриманих результатів. Запропонований підхід не потребує попереднього визначення кількості кластерів та дозволяє проводити кластеризацію даних концентричними сферами в умовах відсутності додаткової апріорної інформації, тому може використовуватись і на етапі попереднього аналізу даних.

Результати. Розроблений підхід реалізовано у вигляді програмної системи, на основі якої розв'язано актуальну прикладну задачу дослідження інтенсивності міграційного руху населення за регіонами України.

Висновки. Проведені експериментальні дослідження показали зручність та ефективність використання довжинної міри подібності при розв'язанні прикладних задач, що потребують групування кластерами у вигляді концентричних сфер. Представлений підхід забезпечив можливість проводити нові змістовні дослідження вхідних даних. Перспективи подальших досліджень полягають у розробці системи підтримки прийняття рішень, для розв'язання задач групування об'єктів на кластери концентричними сферами, конусами, еліпсами та їх перетинами; реалізації паралельної багаторівневої кластеризації проведеної одночасно за декількома критеріями подібності об'єктів та її застосуванні; дослідженні розбиттів об'єктів різними геометричними формами кластерів для однієї вибірки вхідних даних та проведенні змістовної інтерпретації отриманих результатів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: нечітка кластеризація, кластер, міра подібності, автоматичне групування об'єктів, кластеризація.

АБРЕВІАТУРИ

FCM – Fuzzy C-means clustering Algorithm;
BSA – Backtracking Search optimization Algorithm;
DTW – Dynamic Time Warping distance;
SVNS – Single-valued neutrosophic sets.

НОМЕНКЛАТУРА

C – множина векторів ознак об'єктів кластеризації;
 $|\overline{c_i}|$ – довжина вектора $\overline{c_i}$;
 $\overline{c_i}(c_1^i, c_2^i, \dots, c_n^i)$ – вектор ознак об'єктів кластеризації;
 $\overline{c_l}^*$ – вектор-представник l -го кластера;
 K^i – результуючий i -й чіткий кластер;
 z – кількість утворених чітких кластерів;
 $\tilde{K}^j$ – фазифікований кластер K^j ;
 m – кількість об'єктів кластеризації;
 n – кількість ознак об'єктів кластеризації;
 O_i – i -й об'єкт кластеризації;
 R – нечітке бінарне відношення;
 R^D – нечітке бінарне відношення, що характеризує різницю довжин векторів ознак;
 R^K – нечітке бінарне відношення, що характеризує кут між векторами ознак;

R^V – нечітке бінарне відношення, що характеризує відстань між векторами ознак;

U^l – проміжковий кластер l -го кроку;

$\| \|$ – потужність множини;

β – коефіцієнт розтягу;

$\tilde{\mu}_j$ – функція належності до нечіткого кластеру

$\tilde{K}^j$;

$\mu_R(\)$ – функція належності нечіткого бінарного відношення R ;

$\mu_{R^D}^*$ – поріг кластеризації при використанні довжинної міри подібності.

ВСТУП

Кластерний аналіз є потужним інструментом інтелектуального аналізу даних, коли відсутня апріорна інформація про групування об'єктів. У зв'язку із швидкою динамікою змін в соціально-економічному, соціально-міграційному та науково-виробничому середовищі кластерний аналіз є актуальним в різних прикладних сферах і предметних областях, зокрема: при дослідженні міграційних показників; формуванні споживчого кошика; прийнятті рішення про надання

споживчого кредиту; виявленні потенційних хвороб пацієнтів; побудові показово-репрезентативних вибірок, тощо.

Отже, потреба в кластеризації виникає в тих областях діяльності, де є необхідність розділити об'єкти на підмножини, так щоб кожний кластер складався із схожих об'єктів за певними ознаками. Чіткий поділ на кластери можливий тільки в ідеальних умовах і при значно відмінних ознаках об'єктів кластеризації. Тому для вирішення реальних завдань все частіше застосовуються нечіткі методи, в яких розбиття об'єктів проводиться із визначенням ступеня належності об'єктів кластерам. Це дає додаткову можливість для проведення ґрунтовнішого аналізу отриманих результатів.

Крім того, більшість розроблених методів кластеризації забезпечують групування об'єктів лише за одним критерієм подібності визначеним деякою метрикою відстані. При цьому утворюються кластери тільки еліпсоїдної форми. Але існує велика кількість прикладних задач, де такий вид групування об'єктів є неадекватним поставленій меті і неефективним.

Таким чином, доцільною є розробка гнучкого математичного апарату, який мав би досить широкий спектр засобів для групування об'єктів за різними геометричними формами кластерів. Дану властивість може забезпечувати зміна міри подібності в однорівневому методі кластеризації, заснованому на нечітких бінарних відношеннях [1]. Це дає можливість в межах розробленого підходу ефективно розв'язувати достатньо широкі класи прикладних задач із різних предметних областей. Так еліпсоїдній кластеризації та використанню відстаневої міри подібності присвячена праця [1]. Кутову міру подібності, конусну кластеризацію та відповідні прикладні задачі представлено в [2–4]. Дана робота є продовженням цих досліджень і присвячена використанню довжинної міри подібності при нечіткій кластеризації, яка забезпечує групування об'єктів концентричними сферами та її застосуванню.

Отже, метою дослідження є підвищення ефективності розв'язання прикладних задач кластеризації шляхом використання довжинної міри подібності векторних ознак об'єктів.

Для досягнення мети в роботі необхідно розв'язати наступні задачі:

- описати нечітке бінарне відношення та його функцію належності, що характеризує схожість об'єктів за довжинною мірою подібності їх векторних ознак;
- модифікувати метод однорівневої кластеризації, заснований на нечітких бінарних відношеннях [1] для довжинної міри подібності та проведення кластеризації концентричними сферами;
- проілюструвати використання довжинної міри подібності для розв'язання реальної прикладної задачі.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Відсутність єдиного загальноприйнятого формулювання нечіткої модифікації задачі кластерного ана-

лізу потребує чіткий змістовний опис досліджуваної проблеми.

Розглянемо загальну задачу нечіткого кластерного аналізу в наступній постановці.

Нехай дано деякі об'єкти $O_1, \dots, O_m$, які характеризуються n кількісними ознаками. Кожному об'єкту $O_i, i = \overline{1, m}$ однозначно ставиться у відповідність вектор ознак $\overline{c}_i(c_1^i, c_2^i, \dots, c_n^i), i = \overline{1, m}$.

Потрібно розбити задані об'єкти $O_i, i = \overline{1, m}$ на однорідні групи «схожості» (кластери) по всіх n ознаках за довжинною мірою подібності, причому визначити і міру їх належності до отриманих кластерів. Для цього, з математичної точки зору, потрібно розв'язати задачу нечіткої кластеризації векторів ознак $\overline{c}_i(c_1^i, c_2^i, \dots, c_n^i), i = \overline{1, m}$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

В наш час математичний апарат нечіткої кластеризації бурхливо розвивається і забезпечує сучасні засоби ефективного розв'язання багатьох прикладних задач. Так в [5–8] описано огляд та порівняння чітких (жорстких) та нечітких (м'яких) базових методів кластеризації. Але різна прикладна природа вхідних даних, цілей, видів кластеризації приводить до принципової неможливості побудови одного єдиного ефективного універсального методу групування. Це приводить до необхідності створення нових методів або модифікації вже існуючих при розв'язанні прикладних задач. Так в роботі [9] модифіковано класичний нечіткий *c-means* (FCM) алгоритм для кластеризації сенсорних вузлів бездротових сенсорних мереж та використано правило нечіткого виводу Сугено для визначення їх представників. У [10] представлено новий метод кластеризації зображень на основі комбінації FCM та BSA алгоритму.

Як зазначалось, використання відстаневих метрик (Евкліда, Махаланобіса, манхеттенської та ін.) для визначення подібності об'єктів закладено в основі більшості базових методів кластеризації. Але існує цілий ряд практичних задач де їх використання приводить до невідповідності отриманих результатів поставленим цілям та завданням кластеризації. Так в роботі [11] обґрунтовано необхідність та доцільність використання динамічної відстані часу (DTW) при кластеризації часових рядів для отримання адекватних результатів групування та запропоновано три альтернативні методи нечіткої кластеризації на її основі. В дослідженні [12] представлено модифікацію нечіткого *c-means* (FCM) методу із використанням ядро-індукованої відстаневої міри в задачах сегментації зображень. В [13] для вирішення проблеми вибору постачальника пропонується ієрархічний метод кластеризації, оснований на новій формулі неевклідової відстані. В [14] розроблено алгоритм кластеризації за відстанню, оснований на

мірі подібності між однозначними нейрософськими множинами (SVNS).

Отже, існування великої кількості таких досліджень ще раз підтверджує той факт, що специфіка прикладних задач робить неможливим автоматичне перенесення методів в іншу прикладну область без ризику свідомо отримати неякісний розв'язок. Таким чином, доцільним є розробка та розвиток математичного апарату, який передбачає можливість проведення кластеризації за якісно різними критеріями подібності об'єктів. Це, в свою чергу, дозволить проводити групування об'єктів різними геометричними формами кластерів. Зокрема, використання довжинної міри подібності забезпечить проведення кластеризації концентричними сферами та дозволить ефективно розв'язувати ширше коло прикладних задач.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В залежності від цілей кластеризації геометричні форми потрібних кластерів можуть бути різними. Крім того, одну і ту ж множину даних можна розбивати на різні види кластерів та отримувати при цьому різну змістовну інтерпретацію результатів. Дослідження [1–3] показали, що гнучким та ефективним апаратом для проведення еліптичної та конічної кластеризації є однорівневий метод п. 6 в [1]. При цьому, подібність об'єктів за деяким критерієм характеризується нечітким бінарним відношенням R на множині векторних ознак $C = \{\overline{c_i} | i = \overline{1, m}\}$ із функцією належності $\mu_R(\overline{c_i}, \overline{c_j})$, де $\mu_R : C^2 \rightarrow [0, 1]$. Чим більше значення величини $\mu_R(\overline{c_i}, \overline{c_j})$ близьке до 1, тим в більшому ступені об'єкти O_i та O_j будуть подібними за цим критерієм. Зокрема, якісна зміна виду міри подібності об'єктів призводить до зміни геометричної форми кластерів.

Так для утворення еліптично подібних кластерів зручно та ефективно користуватись мірою подібності «відстань», що описується нечітким бінарним відношенням R^V [1].

Нечітке бінарне відношення R^K [2, 3] характеризує кут відхилення між векторами ознак $\overline{c_i}$ і $\overline{c_j}$. Його використання дало можливість проводити кластеризацію конічними кластерами.

«Довжинну» міру подібності, що дозволяє розбивати вектори ознак об'єктів на кластери концентричними сферами, пропонується описати бінарним відношенням R^D із функцією належності

$\mu_{R^D} : C^2 \rightarrow \left[\frac{1}{e}, 1\right]$ типу:

$$\mu_{R^D}(\overline{c_i}, \overline{c_j}) = e^{-\frac{||\overline{c_i} - \overline{c_j}||}{\Delta}}, \quad (1)$$

де $\Delta = \max_i ||\overline{c_i}|| - \min_j ||\overline{c_j}||$, $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, m}$.

Використання експоненціальної функції належності такого виду не є випадковим. Аргументом експоненти є пронормована величина, що змінюється від 0 до 1. Тому її значеннями будуть відповідно величини від 1 до $\frac{1}{e}$. Причому, меншій різниці довжин векторів ознак об'єктів буде відповідати ближче до 1 значення μ_{R^D} . Ця властивість визначає той факт, що нечітке бінарне відношення R^D характеризує схожість векторів $\overline{c_i}$ і $\overline{c_j}$ за довжинами.

Проведемо модифікацію чіткого методу однорівневої кластеризації п. 6 в [1] для використання довжинної міри подібності об'єктів.

Нехай задана числова величина $\mu_{R^D}^* \in [0; 1]$ – поріг кластеризації. Він характеризує необхідну ступінь подібності об'єктів в межах одного кластеру. Якщо $\mu_{R^D}^* = 0$, то ступінь подібності об'єктів буде найслабшою, що приведе до формування одного кластеру сферичного виду, куди увійдуть всі об'єкти. Якщо ж $\mu_{R^D}^* = 1$, тоді, навпаки, об'єкти із різною довжиною векторів ознак сформують окремі кластери, бо ступінь подібності об'єктів буде найвищою. Отже, близькому значенню $\mu_{R^D}^*$ до одиниці буде відповідати більша кількість сформованих кластерів.

Проведення практичних експериментів показало, що «хороша» чутливість функції типу (1) в околі свого граничного значення ($\sup \mu_{R^D} = 1$) дозволяє проводити кластеризацію об'єктів для всіх можливих величин порогів проміжку $[0; 1]$ із певною точністю (наприклад, із точністю 0,01). Це забезпечує можливість проводити дослідження всієї динаміки зміни кластерів та їх структури.

Приймається евристика: на основі двох «найбільш схожих» за довжинною мірою подібності незгрупованих об'єктів має формуватись новий кластер.

Далі покроково описано внесені зміни в l -у ітерацію роботи чіткого методу однорівневої кластеризації об'єктів [1] для його адаптації до використання довжинної міри подібності.

Крок 1 залишається без змін. Слід зауважити, що довжина обраного домінантного вектора-центроїда $\overline{c_l}^*$ із множини $\{\overline{c_i} | i \in \Omega_l\}$ буде визначати радіус сфери, навколо якої буде формуватись l -й кластер.

При проведенні процедури центрування кластеру U^l кроків 2 та 3 довжина вектора-центроїда уточнюється, за формулою:

$$\overline{c_l}^* := \frac{\sum_{c_i \in U^l} ||\overline{c_i}||}{||U^l||} \cdot \overline{c_l}^*. \quad (2)$$

Якщо потрібна інформація не тільки про розподіл об'єктів по кластерам, а й про ступінь їх приналежно-

сті кожній із множин, то необхідно провести процедуру фазифікації.

За чітким однорівневим методом п. 6 в [1], та описаними модифікаціями проводиться кластеризація на чіткі кластери $K^1, K^2, \dots, K^z, z \leq m$ із відповідними представниками $\bar{c}_1^*, \bar{c}_2^*, \dots, \bar{c}_z^*$ знайденими за формулою (2). Функції належності $\tilde{\mu}_j : C \rightarrow [0, 1]$ фазифікованих кластерів $\tilde{K}^j, j = \bar{1}, z$ пропонується визначати за формулою:

$$\tilde{\mu}_j(\bar{c}_i) = \mu_{R^D}(\bar{c}_i, \bar{c}_j^*), \quad (3)$$

або за формулою:

$$\tilde{\mu}_j(\bar{c}_i) = \exp \left(- \frac{\left[1 - \mu_{R^D}(\bar{c}_i, \bar{c}_j^*) \right]^2}{\beta} \right). \quad (4)$$

Зокрема, розрахований коефіцієнт $\beta=0,0882$ за правилом трьох сігм.

Використання функцій належності типу (1) та застосування формули (3) не є загальноприйнятим для фазифікації даних, так як $\tilde{\mu}_j : C \rightarrow \left[\frac{1}{e}; 1 \right]$, тобто міра належності найвіддаленіших об'єктів до j -го кластеру буде не менша, як число $\frac{1}{e}$. Але, в цьому випадку, можна зробити якісний аналіз отриманих результатів кластеризації та числових значень $\tilde{\mu}_j$ згідно шкали бажаності Харрінгтона [1]. Використання функції належності гаусівського типу (4) приводить до її нормалізації, тобто $\tilde{\mu}_j : C \rightarrow (0; 1]$.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для проведення експериментів була розроблена комп'ютерна програма, що реалізує запропонований підхід при кластеризації об'єктів за довжиною мірою подібності. Вона є доповненням до вже існуючого програмного забезпечення для проведення еліпсоїдної [1] та конусної [2, 3] кластеризації і забезпечує розбиття об'єктів концентричними сферами.

Вхідною інформацією для проведення групування об'єктів є числові величини $n, m, \mu_{R^D}^*$ та координати векторів $\bar{c}_i$. Далі для чіткої кластеризації застосовується метод однорівневої кластеризації із п. 6 [1], адаптований до використання довжинної міри подібності, що описана формулою (1). Фазифікація кластерів проводиться за формулами (3) та (4).

Враховуючи те, що якість машинної кластеризації визначається її відповідністю класифікації, що проведена людиною, верифікацію розробленого підходу

буде проведено на прикладній задачі кластеризації у двовимірному просторі. Це дасть додаткову візуальну можливість оцінити отриманий результат.

Все більш глобальними стають проблеми зростаючих масштабів міграції населення України та її регулювання, модернізації міграційної політики держави. Вони потребують високий та сучасний рівень наукових засобів вивчення міграційних процесів населення в сучасних економічних, суспільних та політичних умовах. Зокрема, системний підхід до аналізу міграційних явищ передбачає дослідження інтенсивності міграційного руху населення.

Отже, пропонується, розглянути актуальну задачу дослідження інтенсивності міграційного руху населення регіонів України, наприклад, за січень-листопад 2017 року. Вхідні дані отримані із офіційного сайту Держкомстату України, представлені в наступній таблиці.

Таблиця 1 – Міграційний рух населення у січні-листопаді 2017 року

№	Регіони України	Кількість прибулих осіб	Кількість вибулих осіб
1	Вінницька	5454	9816
2	Волинська	7608	8405
3	Дніпропетровська	48663	24741
4	Донецька	6686	30039
5	Житомирська	12857	13649
6	Закарпатська	5271	5451
7	Запорізька	6411	9215
8	Івано-Франківська	13963	12588
9	Київська	50611	22098
10	Кіровоградська	9847	11395
11	Луганська	2203	20918
12	Львівська	26483	24031
13	Миколаївська	7215	8939
14	Одеська	20712	17430
15	Полтавська	18137	18962
16	Рівненська	13909	15591
17	Сумська	15207	15957
18	Тернопільська	5889	7384
19	Харківська	52007	40497
20	Херсонська	4091	6673
21	Хмельницька	6368	9060
22	Черкаська	14720	15093
23	Чернівецька	4828	4787
24	Чернігівська	7485	9499
25	м.Київ	32363	28881

Вхідною інформацією для експериментальних досліджень групування регіонів України були пронормовані дані табл. 1 та різні пороги кластеризації.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Згідно шкали бажаності Харрінгтона та проведених попередніх практичних досліджень [1] найбільш

значимими та змістовними при розв'язанні практичних задач виявились величини порогів кластеризації близькі до 0,8. Отримані фрагментарні результати чіткої кластеризації за довжинною мірою подібності із функцією належності (1) представлено в табл. 2 та рис. 1.

Таблиця 2 – Фрагментарні результати чіткої кластеризації розглядуваної сукупності

Числові значення порогу кластеризації	Результати кластеризації
$\mu_{R^D}^* \in [0,64; 0,84]$	Кластер 1: об'єкти з номерами 1, 2, 5, 6–8, 10, 11, 13, 16–18, 20–24;
	Кластер 2: об'єкти з номерами 4, 12, 14, 15;
	Кластер 3: об'єкти з номерами 3, 9, 19, 25.
$\mu_{R^D}^* \in [0,85; 0,86]$	Кластер 1: об'єкти з номерами 1, 2, 5, 6–8, 10, 11, 13, 16, 18, 20–24;
	Кластер 2: об'єкти з номерами 4, 12, 14, 15, 17;
	Кластер 3: об'єкт з номером 25;
	Кластер 4: об'єкти з номерами 3, 9;
	Кластер 5: об'єкт з номером 19.

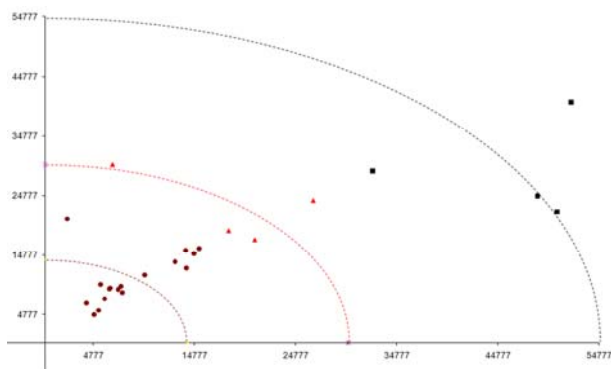


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація результатів чіткої кластеризації за довжинною мірою подібності при $\mu_{R^D}^* \in [0,64; 0,84]$

На рис. 1 пунктирними лініями позначено дуги концентричних кіл, що відповідають представникам відповідних кластерів.

Для інтерпретації нечітких результатів кластеризації було використано матриці нечіткого розподілу об'єктів по кластерах (табл. 3). Проаналізуємо, наприклад, матрицю відповідного нечіткого розбиття (табл. 3) при $\mu_{R^D}^* \in [0,64; 0,84]$ та його лінійні діаграми (рис. 1–2).

Для візуального представлення нечітких результатів побудована лінійна діаграма нечітких розбиттів. По осі ординат діаграми відкладаються значення ступенів належності, а по осі абсцис – номери об'єктів. Належність об'єктів кластеру визначається точкою перетину ліній, що відповідає номеру об'єкта та ступеня належності об'єкта кластеру. Номер кластера вказується поряд з точкою.

Таблиця 3 – Матриці нечіткого розбиття досліджуваної сукупності об'єктів при $\mu_{R^D}^* \in [0,64; 0,84]$

№ об'єкта	Міри належності виду (3)			Міри належності виду (4)		
	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3	Кластер 1	Кластер 2	Кластер 3
1	0,98	0,43	0,05	0,95	0,73	0,48
2	0,98	0,44	0,05	0,96	0,73	0,48
3	0,06	0,27	1,00	0,50	0,66	1,00
4	0,50	1,00	0,28	0,75	0,99	0,67
5	0,93	0,71	0,09	0,92	0,83	0,54
6	0,89	0,32	0,03	0,90	0,68	0,45
7	0,98	0,43	0,05	0,95	0,73	0,48
8	0,93	0,71	0,09	0,92	0,83	0,54
9	0,06	0,25	1,00	0,50	0,65	0,99
10	1,00	0,57	0,07	0,98	0,78	0,51
11	0,87	0,80	0,12	0,89	0,86	0,57
12	0,34	0,91	0,42	0,69	0,91	0,72
13	0,98	0,44	0,05	0,96	0,73	0,48
14	0,64	0,97	0,20	0,80	0,95	0,63
15	0,67	0,96	0,19	0,81	0,94	0,62
16	0,87	0,80	0,12	0,89	0,86	0,56
17	0,83	0,84	0,13	0,87	0,87	0,57
18	0,94	0,38	0,04	0,93	0,71	0,46
19	0,02	0,09	0,72	0,42	0,54	0,83
20	0,89	0,33	0,03	0,90	0,69	0,45
21	0,97	0,43	0,05	0,95	0,73	0,48
22	0,86	0,80	0,12	0,89	0,86	0,57
23	0,86	0,30	0,03	0,89	0,68	0,44
24	0,99	0,46	0,05	0,97	0,74	0,49
25	0,18	0,63	0,71	0,61	0,80	0,82

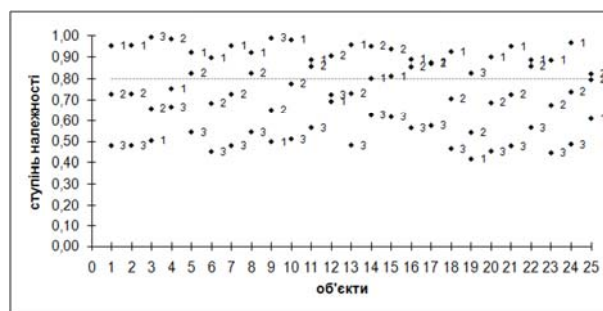


Рисунок 2 – Лінійна діаграма нечіткого розбиття розглядуваної сукупності із мірою належності, визначеною за формулою (3)

На рис. 2 пунктирною лінією представлено умовну межу ступеня значної (сильної) подібності об'єктів в межах одного кластеру. З діаграми рис. 2 видно, що об'єкт із номером 17 є граничним для кластерів 1 та 2. Тому при повторній кластеризації із збільшенням порогу

він може бути перехідним між цими кластерами (див. табл. 2). Об'єкти із номерами 5, 8, 11, 16, 22 хоча і віднесені до 1-го кластеру при чіткій кластеризації також мають високу ступінь подібності до об'єктів 2-го кластеру. Об'єкт із номером 25 3-го кластеру має сильну подібність до об'єктів 2-го кластеру, а 14 та 15 об'єкти із 2-го кластеру подібні до об'єктів 1-го кластеру.

Далі представлено отриману лінійну діаграму (рис. 3) при використанні формули нормування (4).

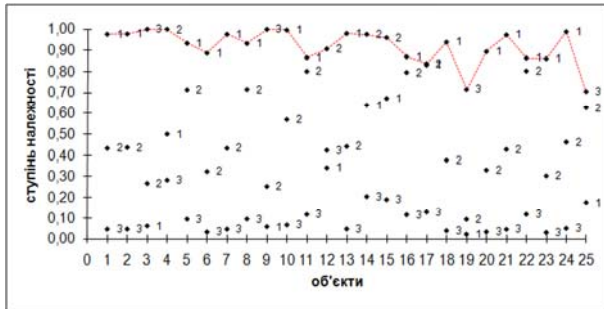


Рисунок 3 – Лінійна діаграма нечіткого розбиття розглядуваної сукупності із нормованою мірою належності, визначеною за формулою (4)

Як видно з діаграми формула (4) не змінює картину розбиття, а лише уточнює її. Пунктирною лінією виділено всі точки із максимальними значеннями функції належності. Об'єкти з номерами 25 та 19 мають найменші міри подібності до своїх чітких кластерів серед всіх виділених (подібність цих об'єктів є «найслабшою» в межах відповідного кластеру), тому при збільшенні порогу кластеризації об'єктів вони будуть ключовими при формуванні нових кластерів (див. табл. 2).

Отже, фазифікація чітких кластерів дає можливість провести додатковий аналіз взаємозв'язків між об'єктами, уточнює їх ступінь подібності та дає змогу визначити граничні (перехідні) об'єкти.

Згідно отриманих результатів можна зробити наступну змістовну інтерпретацію поставленої задачі:

- до регіонів України із пасивним міграційним рухом населення за січень-листопад 2017 року можна віднести: Вінницьку, Волинську, Житомирську, Закарпатську, Запорізьку, Івано-Франківську, Київську, Кіровоградську, Луганську, Миколаївську, Рівненську, Тернопільську, Херсонську, Хмельницьку, Черкаську, Чернівецьку, Чернігівську області;

- в Сумській області спостерігається граничний пасивно-посередній міграційний рух населення за січень-листопад 2017 року;

- до регіонів України із посереднім міграційним рухом населення за січень-листопад 2017 року можна віднести: Донецьку, Львівську, Одеську та Полтавську області;

- до регіонів України із посиленням міграційним рухом населення за січень-листопад 2017 року можна віднести: Дніпропетровську, Київську, Харківську області та м. Київ.

Перехідна динаміка міграційного руху спостерігається в:

- Сумській, Луганській, Рівненській, Черкаській, Житомирській та Івано-Франківській області від пасивного до посереднього темпу;

- Одеській та Полтавській області від посереднього до пасивного темпу;

- м. Київ від посиленого до посереднього темпу.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Порівняння методів кластерного аналізу не є зовсім коректним бо не існує єдиного критерію оптимальності оцінки результатів кластеризації. Кожен із них має свої недоліки та переваги і може бути ефективнішим при розв'язанні певного класу задач.

Зокрема, проведені експериментальні дослідження показали зручність та ефективність методу однорівневої кластеризації п. 6 в [1] адаптованого до використання довжинної міри подібності для розв'язання деяких класів прикладних задач, коли відстаневі метрики не є коректними. При цьому можна визначити основні переваги запропонованого підходу:

- дає можливість проводити кластеризацію концентричними сферами та отримувати якісно нові змістовні результати;

- фазифікація чітких кластерів дозволяє визначати ступінь подібності об'єктів, виявляти граничні об'єкти, робити ґрунтовніший аналіз отриманих результатів;

- вибір різних порогів кластеризації дає додаткову можливість спостерігати за динамікою формування кластерів, зміною їх структури та виявляти приховані взаємозв'язки між об'єктами;

- може бути використаний як для попереднього аналізу даних, так і для проведення самої процедури кластеризації.

Використання нечіткого бінарного відношення R^D в методі однорівневої послідовної кластеризації [1] забезпечило можливість проводити нові змістовні дослідження вхідних даних.

Дана праця є продовженням та розвитком досліджень [1–3]. В подальшому передбачається розроблений підхід використати для:

- реалізації паралельної багаторівневої кластеризації одночасно проведеної за декількома критеріями подібності та її застосування;

- розробки системи підтримки прийняття рішень, що забезпечить групування об'єктів на кластери концентричними сферами, конусами, еліпсами та їх перетинами;

- дослідження використання кластеризації об'єктів за різними геометричними формами кластерів для однієї вибірки вхідних даних та проведення змістовної інтерпретації отриманих результатів.

ВИСНОВКИ

Вирішується проблема розвитку методів кластеризації, основаних на нечітких бінарних відношеннях для проведення розбиття об'єктів концентричними сферами.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що описано нечітке бінарне відношення R^D та його функцію належності, які характеризують довжину міру подібності векторних ознак об'єктів. Модифіковано метод однорівневої кластеризації [1] для використання довжинної міри подібності об'єктів. При цьому задаються певні величини – пороги кластеризації, що характеризують ступінь схожості об'єктів в середині кластеру. Змінюючи пороги кластеризації можна проаналізувати динаміку формування кластерів, дослідити їх структуру та взаємозв'язки між об'єктами. Запропонований підхід дозволяє проводити кластеризацію об'єктів концентричними сферами в умовах відсутності додаткової апріорної інформації, тому може використовуватись і на етапі попереднього аналізу даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробленому програмному забезпеченні, що реалізує представлений підхід. Проведення експериментів показало його ефективність при розв'язанні певних класів прикладних задач кластерного аналізу. Проілюстровано роботу нечіткого однорівневого методу, оснований на довжинній мірі подібності на реальній задачі дослідження інтенсивності міграційного руху населення регіонів України. Проведено аналіз та змістовну інтерпретацію отриманих результатів.

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).

ЛІТЕРАТУРА/ ЛІТЕРАТУРА

1. Kondruk N. Clustering method based on fuzzy binary relation / N. Kondruk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – No. 2(4). – P. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.94961
2. Кондрук Н. Е. Алгоритм кластеризації критеріального простору для задач вибору / Н. Е. Кондрук, М. М. Малай // Вісник Київського університету. Серія: фіз.-мат. наук. – 2006. – Вип. 3. – С. 225–229.
3. Кондрук Н. Е. Деякі методи автоматичного групування об'єктів / Н. Е. Кондрук // Південно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 2, № 4 (68). – С. 20–24.
4. Кондрук Н. Е. Системи підтримки прийняття рішень для автоматизованого складання дієт / Н. Е. Кондрук // Управління розвитком складних систем. – 2015. – Вип. 23(1). – С. 110–114.
5. Peters G. Soft clustering-fuzzy and rough approaches and their extensions and derivatives / G. Peters // International Journal of Approximate Reasoning. – 2013. – Vol. 54, № 2. – P. 307–322. DOI: 10.1016/j.ijar.2012.10.003
6. Banu P. K. N. Performance analysis of hard and soft clustering approaches for gene expression data / P. K. N. Banu, S. Andrews // International Journal of Rough Sets and Data Analysis (IJRSDA). – 2015. – Vol. 2, № 1. – P. 58–69. DOI: 10.4018/ijrda.2015010104
7. Bora D. J. Comparative study between fuzzy clustering algorithm and hard clustering algorithm / D. J. Bora, D. Gupta, A. A. Kumar // International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT). – 2014. – Vol. 10(2). – С. 108–113. DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V10P119
8. Jipkate B. R. A comparative analysis of fuzzy c-means clustering and k means clustering algorithms / B. R. Jipkate, V. V. Gohokar // International Journal Of Computational Engineering Research. – 2012. – Vol. 2. – № 3. – P. 737–739.
9. Shokouhifar M. Optimized sugeno fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks / M. Shokouhifar, A. Jalali // Engineering applications of artificial intelligence. – 2017. – Vol. 60. – P. 16–25. DOI: 10.1016/j.engappai.2017.01.007
10. Toz G. A Fuzzy Image Clustering Method Based on an Improved Backtracking Search Optimization Algorithm with an Inertia Weight Parameter / G. Toz, İ. Yücedağ, P. Erdoğan // Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences. – 2018. In press. DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.02.011
11. Izakian H. Fuzzy clustering of time series data using dynamic time warping distance / H. Izakian, W. Pedrycz, I. Jamal // Engineering Applications of Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 39. – P. 235–244. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.12.015
12. Chen, S. Robust image segmentation using FCM with spatial constraints based on new kernel-induced distance measure / S. Chen, D. Zhang // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). – 2004. – Vol. 34, № 4. – P. 1907–1916. DOI: 10.1109/TSMCB.2004.831165
13. Heidarzade A. Supplier selection using a clustering method based on a new distance for interval type-2 fuzzy sets: A case study / A. Heidarzade, I. Mahdavi, N. Mahdavi-Amiri // Applied Soft Computing. – 2016. – Vol. 38. – P. 213–231. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.09.029
14. Ye J. Clustering methods using distance-based similarity measures of single-valued neutrosophic sets / J. Ye // Journal of Intelligent Systems. – 2014. – Vol. 23, № 4. – P. 379–389. DOI: 10.1515/jisys-2013-0091

Стаття надійшла до редакції 18.02.2018.
Після доробки 02.04.2018.

УДК 004.023, 519.237

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛИННОВОЙ МЕРЫ СХОДСТВА В ЗАДАЧАХ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

Кондрук Н. Э. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Исследование посвящено разработке гибкого математического аппарата, который имеет достаточно широкий спектр средств для группировки объектов по различным видам мер сходства. Это даст возможность в рамках разработанного подхода эффективно решать достаточно широкие классы прикладных задач из разных предметных областей и проводить кластеризацию кластерами различных геометрических форм.

Целью исследования является повышение эффективности решения прикладных задач кластеризации путем использования длинновой меры сходства векторных признаков объектов.

Методы. Описано нечеткое бинарное отношение и его функцию принадлежности, характеризующие подобие объектов по длинновой мере сходства их векторных признаков. Модифицировано метод одноуровневой кластеризации, основанный на нечетких бинарных отношениях для использования длинновой меры сходства. При этом задаются определенные величины – пороги кластеризации, характеризующие степень подобия объектов внутри кластера. Изменяя пороги кластеризации можно проанализировать динамику формирования кластеров, исследовать их структуру и взаимосвязи между объектами, определить предельные объекты, провести более глубокий анализ полученных результатов. Предложенный подход не требует предварительного определения коли-

чества кластеров и позволяет проводить кластеризацию данных концентрическими сферами в условиях отсутствия дополнительной априорной информации, поэтому может использоваться и на этапе предварительного анализа данных.

Результаты. Разработанный подход реализован в виде программной системы на основании которой решена актуальная прикладная задача исследования интенсивности миграционного движения населения по регионам Украины.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования показали удобство и эффективность использования длинновой меры сходства при решении прикладных задач, требующих группировки кластерами в виде концентрических сфер. Представленный подход обеспечил возможность проводить новые содержательные исследования входных данных. Перспективы дальнейших исследований заключаются в разработке системы поддержки принятия решений для решения задач группировки объектов на кластеры концентрическими сферами, конусами и эллипсами и их пересечениями; реализации параллельной многоуровневой кластеризации по различным критериям и ее применении; исследовании разбиения объектов разными геометрическими формами кластеров для одной выборки входных данных и проведении содержательной интерпретации полученных результатов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: нечеткая кластеризация, кластер, мера сходства, автоматическая группировка объектов, кластеризация.

UDC 004.023, 519.237

USE OF LENGTH-BASED SIMILARITY MEASURE IN CLUSTERING PROBLEMS

Kondruk N. E. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The study is devoted to the development of a flexible mathematical apparatus, which should have a sufficiently wide range of means for grouping objects into different types of similarity measures. This makes it possible, within the framework of the developed approach, to efficiently solve sufficiently broad classes of applied problems from different subject areas and to partition objects with clusters of different geometric forms.

Objective. The aim of the study is improvement of the efficiency of solving cluster problems by applying a similar measure of the vector characteristics of objects.

Method. A fuzzy binary relation and its membership function describing the similarity of objects according to the level of similarity of their vector attributes are described. The method of single-level clustering, based on fuzzy binary relations for the use of a similarity measure, is modified. In this case, certain values are set – the thresholds of clusterization that characterize the similarity degree of objects within the cluster. By changing the thresholds of clusterization, one can analyze the dynamics of cluster formation, investigate their structure and interrelationships between objects, determine the ultimate objects, and make a thorough analysis of the obtained results. The proposed approach does not require a preliminary determination of the number of clusters and allows clustering of data in concentric spheres in the absence of additional a priori information, so it can be used at the stage of preliminary data analysis.

Results. The developed approach is implemented in the form of a software system on the basis of which the actual applied problem of investigating the intensity of population migration by regions of Ukraine is solved.

Conclusions. The conducted experimental researches show the convenience and efficiency of using the similarity measure for solving applied problems requiring clustering in the form of concentric spheres. The presented approach provides an opportunity to conduct new meaningful studies of input data. Prospects for further research are development of a decision support system, to solve the problems of grouping objects into clusters by concentric spheres, cones, ellipses and their intersections; implementation of parallel multi-level clustering carried out simultaneously by several criteria of similarity of objects and their application; study of the partitioning of objects by different geometric forms of clusters for a single sample of input data and carrying out a meaningful interpretation of the obtained results.

KEYWORDS: fuzzy clustering, cluster, measure of similarity, automatic grouping of objects, clustering.

REFERENCES

1. Kondruk N. Clustering method based on fuzzy binary relation, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, No. 2(4), pp. 10–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.94961
2. Kondruk N. E., Malyar M. M. Algoritmy klasteryzacii kryterial'nogo prostoru dlja zadach vyboru, *Visnyk Kyi'vs'kogo universytetu*, 2006, Issue. 3, pp. 225–229.
3. Kondruk, N. E. Dejaki metody avtomatycznego grupuvannja ob'ektiv, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2014, Vol. 2, No. 4 (68), pp. 20–24.
4. Kondruk N. E. Systemy pidtrymky pryjnjattja rishen' dlja avtomatyzovanogo skladannja dijet, *Management of Development of Complex Systems*, 2015, Issue. 23(1), pp. 110–114.
5. Peters, G. Soft clustering-fuzzy and rough approaches and their extensions and derivatives, *International Journal of Approximate Reasoning*, 2013, Vol. 54, No. 2, pp. 307–322. DOI: 10.1016/j.ijar.2012.10.003
6. Banu P. K. N., Andrews S. Performance analysis of hard and soft clustering approaches for gene expression data, *International Journal of Rough Sets and Data Analysis (IJRSDA)*, 2015, Vol. 2, No. 1, pp. 58–69. DOI: 10.4018/ijrda.2015010104
7. Bora D. J., Gupta D., Kumar A. A. Comparative study between fuzzy clustering algorithm and hard clustering algorithm, *International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT)*, 2014, Vol. 10(2), pp. 108–113. DOI: 10.14445/22312803/IJCTT-V10P119
8. Jipkate B. R., Gohokar V. V. A comparative analysis of fuzzy c-means clustering and k means clustering algorithms, *International Journal of Computational Engineering Research*, 2012, Vol. 2, No. 3, pp. 737–739.
9. Shokouhifar M., Jalali A. Optimized sugeno fuzzy clustering algorithm for wireless sensor networks, *Engineering applications of artificial intelligence*, 2017, Vol. 60, pp. 16–25. DOI: 10.1016/j.engappai.2017.01.007
10. Toz G., Yücedağ İ., Erdoğan P. A Fuzzy Image Clustering Method Based on an Improved Backtracking Search Optimization Algorithm with an Inertia Weight Parameter, *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 2018. In press. DOI: 10.1016/j.jksuci.2018.02.011
11. Izakian H., Pedrycz W., Jamal I. Fuzzy clustering of time series data using dynamic time warping distance, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2015, Vol. 39, pp. 235–244. DOI: 10.1016/j.engappai.2014.12.015
12. Chen S., Zhang D. Robust image segmentation using FCM with spatial constraints based on new kernel-induced distance measure, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2004, Vol. 34, No. 4, pp. 1907–1916. DOI: 10.1109/TSMCB.2004.831165
13. Heidarzade A., Mahdavi I., Mahdavi-Amiri N. Supplier selection using a clustering method based on a new distance for interval type-2 fuzzy sets: A case study, *Applied Soft Computing*, 2016, Vol. 38, pp. 213–231. DOI: 10.1016/j.asoc.2015.09.029
14. Ye J. Clustering methods using distance-based similarity measures of single-valued neutrosophic sets, *Journal of Intelligent Systems*, 2014, Vol. 23, No. 4, pp. 379–389. DOI: 10.1515/jisys-2013-0091

UDC 004.272.26: 004.93

ADDITIONAL TRAINING OF NEURO-FUZZY DIAGNOSTIC MODELS

Oliinyk A. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Subbotin S. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Leoshchenko S. – student of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Ilyashenko M. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Computer Systems and Networks Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Myronova N. – PhD, Associate Professor of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Mastinovsky Y. – PhD, Professor, Head of the Department of Applied Mathematics, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The task of automation of diagnostic models synthesis in diagnostics and pattern recognition problems is solved. The object of the research are the methods of the neuro-fuzzy diagnostic models synthesis. The subject of the research are the methods of additional training of neuro-fuzzy networks.

Objective. The research objective is to create a method for additional training of neuro-fuzzy diagnostic models.

Method. The method of additional training of diagnostic neuro-fuzzy models is proposed. It allows to adapt existing models to the change in the functioning environment by modifying them taking into account the information obtained as a result of new observations. This method assumes the stages of extraction and grouping the correcting instances, diagnosing them with the help of the existing model leads to incorrect results, as well as the construction of a correcting block that summarizes the data of the correcting instances and its implementation into an already existing model. Using the proposed method of learning the diagnostic neural-fuzzy models allows not to perform the resource-intensive process of re-constructing the diagnostic model on the basis of a complete set of data, to use the already existing model as the computing unit of the new model. Models synthesized using the proposed method are highly interpretive, since each block generalizes information about its data set and uses neuro-fuzzy models as a basis.

Results. The software which implements the proposed method of additional training of neuro-fuzzy networks and allows to re-configure the existing diagnostic models based on new information about the researched objects or processes based on the new data has been developed.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed operability of the proposed method of additional training of neuro-fuzzy networks and allow to recommend it for processing of data sets for diagnosis and pattern recognition in practice. The prospects for further researches may include the development of the new methods for the additional training of deep learning neural networks for the big data processing.

KEYWORDS: data sample, diagnosis, additional training, neuro-fuzzy model, parameter, membership function.

ABBREVIATIONS

BPSad is a back propagation for additional training based on sample S_{ad} ;

BPS is a back propagation for re-training based on sample S ;

MATDNFM is a method for additional training of the diagnostic neuro-fuzzy models;

NFN is a neuro-fuzzy network.

NOMENCLATURE

b_{mj} is a parameter of the membership function;

$|CS'|$ is a number of instances cs'_q of the set CS' ;

cs'_{mq} is a m -th coordinate of the q -th instance $cs'_q \in CS'$;

C_{mj} is a m -th coordinate of the center of the j -th cluster C_j ;

d_{mj} is a parameter of the membership function;

$\varepsilon_{\min}$ is a minimum acceptable difference between the real and model values of the output parameter;

ε_J is a minimum acceptable change in the value of the criterion J ;

M is a number of features in the sample of observations S ;

$\mu_{\min}$ is a parameter that determines the minimum acceptable membership degree of the instance s_{new} to the set $S' = \langle P', T' \rangle$ of data on the basis of which the correcting block NB was synthesized;

N_R is a number of model NFN rules;

P is a set of features (attributes) of observations in the given sample;

p_{qm} is a value of the m -th feature (attribute) of the q -th observation;

$p_m(s_{new})$ is a m -th coordinate of the evaluated instance $s_{new} \notin S$;

Q is a number of observations in the given sample of observations S ;

$\text{Round}(a)$ is a function that returns the result of rounding the number a to the nearest larger integer;

S is a sample of observations (training sample);

t_q is a value of output parameter of the q -th observation;

t'_q is a measured value of the output parameter of the q -th instance s'_q of sample $S' = \langle P', T' \rangle$;

$t'_q(NFN)$ is a value of the output parameter of the q -th instance s'_q of sample $S' = \langle P', T' \rangle$, calculated by substituting the measured values of the input attributes p'_{qm} of the q -th instance in the model NFN ;

T is a set of output parameter values;

$t_{q\text{mod}}$ is a model value of the output parameter of the q -th instance cs'_q , calculated from the synthesized model y_{NBj} ;

u_{qj} is a value of membership function of the q -th instance cs'_q to the j -th cluster;

w_{mj} is a customizable parameter of the function y_{NBj} .

INTRODUCTION

During operation of intelligent diagnostic systems, new information about diagnosed objects arises. In doing so, the information newly obtained from the measurements of the diagnosed objects can significantly contradict to the existing diagnostic models built on the results of previous observations. In such cases, it becomes necessary to re-synthesize diagnostic models using the data from previous and new measurements.

The object of study are the methods of the neuro-fuzzy diagnostic models synthesis.

However, when working with big data, the time for re-synthesis of such models can be significant, which in some cases is unacceptable. Therefore, during the operation of diagnostic systems, the task of adapting trained models by modifying them, taking into account the information obtained as a result of new observations, is relevant.

The subject of study are the methods of additional training of neuro-fuzzy networks.

The purpose of the work is to create a method for additional training of neuro-fuzzy diagnostic models.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose we have:

1) a sample of data $S = \langle P, T \rangle$, containing Q instances, each of which is characterized by the values of the parameters $p_{q1}, p_{q2}, \dots, p_{qM}$ and the output parameter t_q ;

2) a neuro-fuzzy model $NFN = NFN(struct, param)$ synthesized from a set of observations $S = \langle P, T \rangle$ with a definite structure $struct$ (a set of computational ele-

ments connected in a certain way) and set of parameters $param = param(struct)$;

3) a data set $S' = \langle P', T' \rangle$ obtained as a result of new Q' measurements of the object being examined (diagnosed).

Then it is necessary to synthesize the new model $NFNN = NFN(structN, paramN)$ by modifying the existing model $NFN(struct, param)$ taking into account the new data $S' = \langle P', T' \rangle$ in such a way that an acceptable value of the specified quality criterion G of the neuromodel $NFNN: G(NFNN, S \cup S') \rightarrow \min$ is provided. For example, a minimum of recognition error (in problems with a digital output T) or a minimum mean-square error (in the case where the output parameter T can take real values from a certain range $T \in [t_{\min}, t_{\max}]$) can be used as the target criterion G for additional training neural-fuzzy models.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The additional training of diagnostic and recognition models built in the form of neural-fuzzy networks usually involves the modification of the existing network by including (adding) information about new observations to it. Such information is added to the constructed network in the form of new rules, represented by so-called singletons. This approach is simple enough to implement. However, in the case of a significant number of new observations, the application of this approach is little effective. The reason is that in this case the structural and parametric complexity of the network is significantly increased (each new observation, in fact, is added to the network in the form of a new rule), and its generalizing capabilities are also reduced.

Another approach involves a complete reorganization of the structure and parameters of the network with the appearance of new essential information about the objects under study. Consequently, the already synthesized model is re-trained on the basis of available $S = \langle P, T \rangle$ and new $S' = \langle P', T' \rangle$ information. When processing big data, re-training the model is also undesirable, since this process takes a lot of time and requires a large amount of computational resources.

Therefore, it is advisable to develop a new method for adapting trained neural-fuzzy models to changing the functioning environment by modifying them, taking into account the information obtained as a result of new observations.

3 MATERIALS AND METHODS

In the developed method of training the neuro-fuzzy models, it is proposed to correct the existing model $NFN(struct, param)$ by introducing additional structural computational elements that take into account the attributes of the new data set $S' = \langle P', T' \rangle$.

In the proposed method, the first step is to extract the correcting instances from the sample $S' = \langle P', T' \rangle$. Corrective instances cs'_q will be considered those observations of the sample $S' = \langle P', T' \rangle$, diagnosing them using the existing model $NFN(struct, param)$ leads to incorrect results. Consequently, the diagnosing model NFN used needs to be adjusted precisely with the help of instances cs'_q .

Therefore, to construct a set of corrective instances CS' , all sample $S' = \langle P', T' \rangle$ instances s'_q are passed through the model NFN , as a result of which the value of the output parameter $t'_q(NFN)$ of each q -th instance of sample $S' = \langle P', T' \rangle$ is calculated. Then, the real t'_q and model $t'_q(NFN)$ values of the output parameter are compared:

$$|t'_q - t'_q(NFN)| \geq \varepsilon_{\min}. \quad (1)$$

Condition (1) is used in solving estimation problems (for continuous values of the output parameter T). When solving recognition problems (with discrete values of the output parameter T) the following condition is used: $t'_q \neq t'_q(NFN)$.

When the above conditions are met, the q -th instance s'_q of sample $S' = \langle P', T' \rangle$ is counted as corrective and entered into the set CS' : $CS' = CS' \cup s'_q$. Thus, as a result of the step of extracting the correcting instances, those instances of sample $S' = \langle P', T' \rangle$ that are similar to the instances of the original sample $S = \langle P, T \rangle$ are excluded from further consideration and, therefore, do not affect the quality of recognition or estimation by model NFN .

Later, instances cs'_q of set CS' can be used as singletons in constructing a new block $NB(structNB, paramNB)$, introduced along with the already existing model $NFN(struct, param)$ in the new model $NFNN = NFNN(structN, paramN)$.

However, when processing big data, the number of set's CS' instances can be significant, which will lead to a significant increase in the structural and parametric complexity of the new model $NFNN$. In addition, many instances of the set CS' can be close to each other in the attribute space and, in fact, be similar. Therefore, including all instances $cs'_q \in CS'$ as rules for a new model block can also lead to a loss of its generalizing abilities.

Accordingly, before building a block NB , it is advisable to perform the step of grouping the correcting instances of the set CS' with the selection of the most significant of them $csInf'_q$, concentrating around themselves a certain number of similar closely located specimens.

To do this, it is suggested to perform cluster analysis of the CS' set's instances in the attribute space P . The number of clusters N_{CI} in the developed method is determined in proportion to the number of rules N_R in the existing model NFN , as well as the proportion of instances $|CS'|$ of the set CS' in relation to the number of instances Q in the set $S = \langle P, T \rangle$ (2):

$$N_{CI} = \text{Round} \left(\frac{|CS'|}{Q} N_R \right). \quad (2)$$

After determining the number of clusters N_{CI} , the initial partitioning of instances $cs'_q \in CS'$ over clusters is performed. For this, a set of cluster centers $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$ is defined, where $C_j = \{C_{1j}, C_{2j}, \dots, C_{Mj}\}$ is the center of the j -th cluster, $j = 1, 2, \dots, N_{CI}$. The centers C_j can be selected randomly among instances cs'_q of the set CS' . It is also possible to create a set $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$ taking into account the spatial arrangement of the instances $cs'_q \in CS'$. For this, an instance cs'_a is first randomly selected from CS' , which is considered the center of the first cluster $C_1 = \{cs'_{1a}, cs'_{2a}, \dots, cs'_{Ma}\}$. Then, as the center of the second cluster C_2 , the instance cs'_b most remote from the instance cs'_a is selected. The center of the third cluster C_3 is selected in such a way that it is as far away from the centers of the first and second clusters. This procedure continues until N_{CI} is formed. With a large value N_{CI} , this approach will be associated with the need for complex calculations due to the search for instances characterized by the greatest distance to the current set of already defined cluster centers. Therefore, this approach is advisable to apply for small values of the number of clusters N_{CI} or to combine it with an approach that involves the random formation of multiple cluster centers $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$.

Then, the generation of elements u_{qj} determining the membership of the q -th instance cs'_q to the j -th cluster C_j is performed. In contrast to the method of fuzzy c -means used as a basis, in the developed method, when creating the initial division of the instances, the generation of elements u_{qj} will be performed not randomly, but taking into account the location of the instances $cs'_q \in CS'$ in attribute space P . For this, the distances $D(cs'_q, C_j)$ from the instance cs'_q to the center C_j of each cluster $j = 1, 2, \dots, N_{CI}$ are determined. As a metric for determining the distance $D(cs'_q, C_j)$, we can use the Euclidean metric (3):

$$D(cs'_q, C_j) = \sqrt{\sum_{m=1}^M (cs'_{mq} - C_{mj})^2}. \quad (3)$$

The membership u_{qj} of the q -th instance cs'_q to the j -th cluster C_j is calculated by the formula (4):

$$u_{qj} = \left(\sum_{JA=1}^{N_{CI}} \left(\frac{D(cs'_q, C_j)}{D(cs'_q, C_{JA})} \right)^{\frac{2}{mp-1}} \right)^{-1}. \quad (4)$$

In the case where the instance cs'_q is the center of the j -th cluster C_j ($D(cs'_q, C_j) = 0$), then it is established: $u_{qj} = 1$, $u_{qJA} = 0, \forall JA \neq j$.

Further, according to the formula (5), the value of the function $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$ determining the quality of the fuzzy partitioning $R^{(i)}$ in the i -th iteration of the cluster analysis is calculated:

$$J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)}) = \sum_{q=1}^{|CS'|} \sum_{j=1}^{N_{CI}} (u_{qj})^{mp} D^2(cs'_q, C_j). \quad (5)$$

After that, the criteria (6) and (7) of the completion of the cluster analysis procedure are checked:

$$|J_{old}(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)}) - J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})| \leq \varepsilon_J, \quad (6)$$

$$i \geq \maxIterCIA. \quad (7)$$

In this case, inequality (6) reflects a condition, the fulfillment of which characterizes too small a change in the value of the target function $J(R^{(i)}, u^{(i)}, C^{(i)})$, and accordingly, the inexpediency of further searching for the optimal partition $R^{(i)}$. Condition (7) displays the situation when the current number of iterations reaches the maximum allowed value $\maxIterCIA$. If both conditions (6) and (7) are not fulfilled, the new values of the coordinates of the cluster centers are determined using formula (8):

$$C_{mj} = \frac{\sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj})^{mp} cs'_{mq}}{\sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj})^{mp}}. \quad (8)$$

Then, using the formulas (3)–(5), a new fuzzy partition $R^{(i+1)}$ is searched (allocation of accessories u_{qj}). This procedure is repeated until at least one of the conditions (6) or (7) is satisfied.

Consequently, as a result of the step of grouping the correcting instances, a plurality of cluster centers $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$ and a plurality of cs'_q instance attachments u_{qj} are formed to the respective clusters.

After grouping the correcting instances, the stage of construction of the correcting block NB is performed.

In case the modifiable model $NFN(struct, param)$ uses as a basis a neuro-fuzzy ANFIS network, then the structure of the correction block NB will also be based on the ANFIS network. The graphic representation of the correcting block NB is shown in Fig. 1.

In this case, the number N_{RNB} of nodes of the second layer corresponding to fuzzy rules in the correcting block NB is proposed to be taken equal to the number of clusters (rules) allocated in the previous step: $N_{RNB} = N_{CI}$. Given the nature of calculating parameter N_{CI} in the proposed method, the number of NB -block rules N_{RNB} will be proportional to the number of rules N_R in the existing model NFN , as well as the proportion of instances $|CS'|$ of the set CS' in relation to the number of instances Q in the set $S = \langle P, T \rangle$. Therefore, the structural complexity of the correcting block N_{RNB} will be proportional to the analogous value of the original model NFN and the proportion of new instances of the CS' set.

Neural elements of the first layer that determine the membership degree of the value of the input parameter p_m to the corresponding fuzzy term ft_{mj} ($j = 1, 2, \dots, N_{RNB}$) are connected with the corresponding nodes of the second layer. Thus, in aggregate, the nodes of the first and second layers form antecedents of fuzzy rules NR_j .

The information obtained at the previous stages of the developed method of additional training the neural-fuzzy models (a multiplicity of correcting instances CS' , a multiplicity of cluster centers $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$ and a multiplicity of instance cs'_q accessories u_{qj} to the corresponding clusters) will be used to determine the configurable parameters of membership functions $\mu_{NBmj}^{(1)}$ ($m = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N_{RNB}$). As functions $\mu_{NBmj}^{(1)}$ that determine the membership degree of the value of the m -th input parameter p_m to the j -th fuzzy term ft_{mj} in the correcting block NB , we use the membership functions (9):

$$\mu_{NBmj}^{(1)}(p_m) = \exp\left(-\frac{(p_m - b_{mj})^2}{2d_{mj}^2}\right). \quad (9)$$

As a parameter b_{mj} ($m = 1, 2, \dots, M$, $j = 1, 2, \dots, N_{RNB}$), that determines the shift of the center of the function relative to the center of coordinates of the characteristic axis p_m , we will use the m -th coordinate of the j -th cluster center C_j from the set $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{N_{CI}}\}$ formed in the previous step.

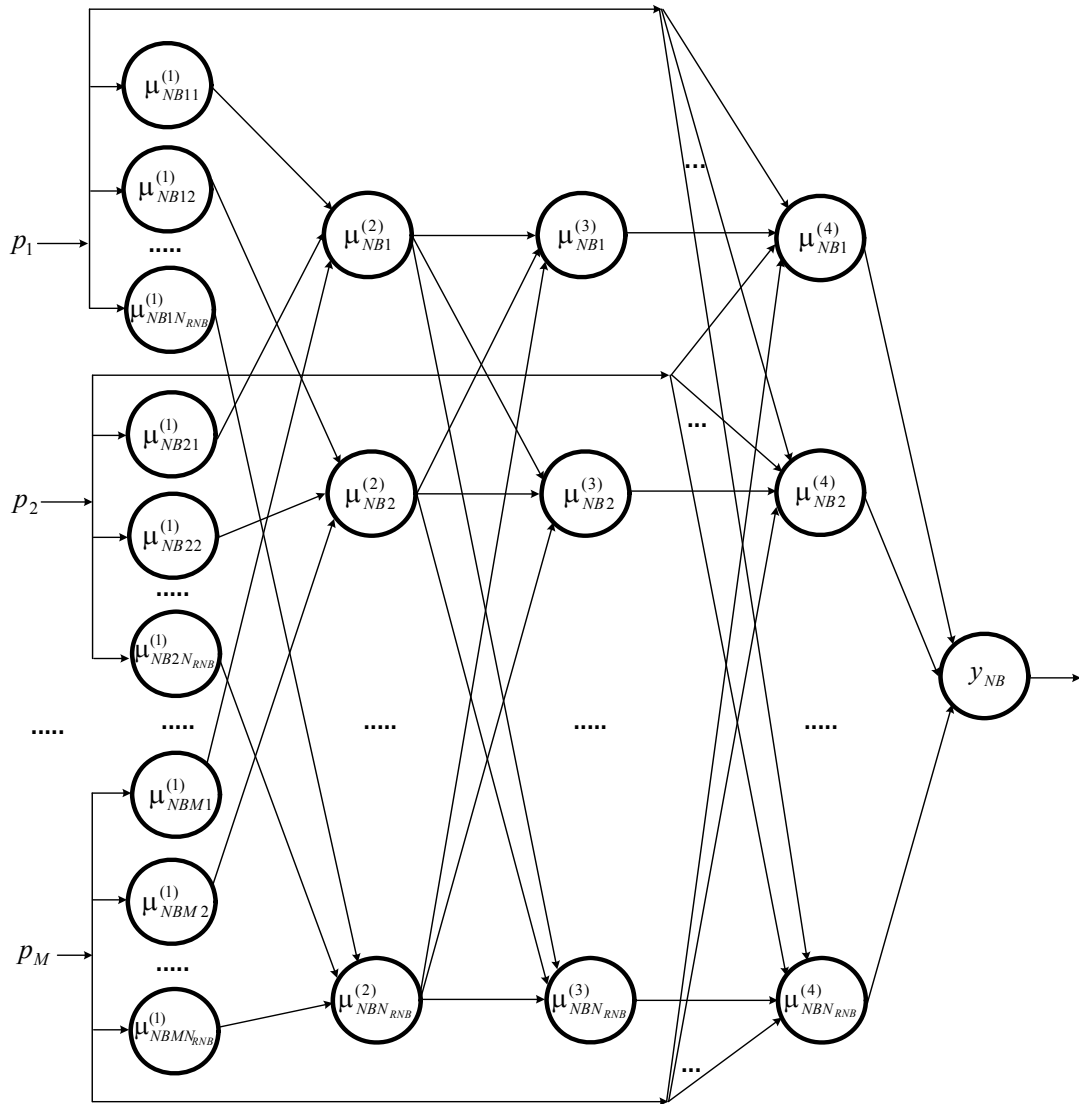


Figure 1 – Graphical interpretation of the correcting block *NB* when modifying models *NFN* using as a basis a neural-fuzzy ANFIS network

As a parameter d_{mj} , we will use the standard deviation of the correcting instances $cs'_q \in CS'$ relative to j -th center of the cluster C_j along the m -th characteristic axis. It also takes into account the membership u_{qj} of q -th correcting instance $cs'_q \in CS'$ to j -th cluster C_j :

$$d_{mj} = \sqrt{\frac{1}{|CS'|} \sum_{q=1}^{CS'} u_{qj} (cs'_{mq} - C_{mj})^2}. \quad (10)$$

Using formulas (10) and (11) to define custom parameters b_{mj} and d_{mj} membership functions $\mu_{NBmj}^{(1)}$, in the process of evaluating new instances $s_{new} \notin S$ using the correcting block *NB*, activate those fuzzy terms ft_{mj} that together ($m=1,2,...,M$) correspond to certain clusters C_j (NR_j fuzzy rules).

Having determined $\mu_{NBmj}^{(1)}$ with account of the calculated estimates b_{mj} , d_{mj} , it is possible to calculate the values of the outputs of the second layer of the network $\mu_{NBj}^{(2)}$ that determine the degree of fulfillment of the j -th rule NR_j , according to the formula:

$$\mu_{NBj}^{(2)}(s_{new}) = \bigcap_{m=1}^M \mu_{NBmj}^{(1)}(p_m(s_{new})). \quad (11)$$

The nodes of the third layer determine the relative degree of fulfillment of the j -th rule NR_j :

$$\mu_{NBj}^{(3)}(s_{new}) = \frac{\mu_{NBj}^{(2)}(s_{new})}{\sum_{JB=1}^{N_{RNB}} \mu_{NBjB}^{(2)}(s_{new})}. \quad (12)$$

Neural elements of the fourth layer $\mu_{NBj}^{(4)}$ ($j=1,2,...,N_{RNB}$) correspond to functions y_{NBj} that

determine the value of the network output in the case of the operation of the corresponding rule NR_j . Thus, each j -th node of the network determines the contribution of the fuzzy rule NR_j to the common output of the network y_{NBj} . Functions y_{NBj} , as a rule, are represented in the form of a linear regression, therefore, the values of the outputs of the nodes of the fourth layer $\mu_{NBj}^{(4)}$ can be calculated from the formula (13):

$$\begin{aligned}\mu_{NBj}^{(4)}(s_{new}) &= \mu_{NBj}^{(3)}(s_{new})y_{NBj}(s_{new}) = \\ &= \mu_{NBj}^{(3)}(s_{new}) \left(\sum_{m=0}^M w_{mj}(p_m(s_{new})) \right).\end{aligned}\quad (13)$$

It is assumed that $p_0(s_{new})=1$, and w_{0j} coefficient corresponds to the value of the free linear regression term (13). The function y_{NBj} can be simplified as follows:

$y_{NBj} = \sum_{m=0}^M w_{mj}p_m$. More complex nonlinear dependencies can also be used as a basis of functions y_{NBj} .

Therefore, in order to synthesize a correcting block NB , it is necessary to restore the functions y_{NBj} , having determined the values w_{mj} of the adjustable parameters for this.

To determine the values of parameters w_{mj} in the developed method, it is proposed to use information not only about the values of the coordinates of the correcting instances $cs'_q \in CS'$, but also information on their membership degree u_{qj} to each of the clusters Cl_j (in fact, the fuzzy rule NR_j) determined by the centers $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{NCl}\}$. This will take into account the importance of the instances $cs'_q \in CS'$ for restoring the functions y_{NBj} corresponding to clusters Cl_j , and in determining the w_{mj} parameters of the function y_{NBj} , increase the contribution of those specimens that are characterized by high estimates of the membership degree of u_{qj} to the cluster Cl_j .

There are two approaches to determine the parameter w_{mj} values.

The first approach involves building models y_{NBj} on the basis of corrective instances cs'_q with the maximum estimates u_{qj} of membership to the corresponding clusters Cl_j . For each cluster Cl_j (NR_j rule), the instances cs'_q with the largest values of u_{qj} are selected. So, it is considered that the instance cs'_q belongs to the cluster Cl_j ($cs'_q \in Cl_j$) when the condition $u_{qj} = \max_q(u_{qj})$ is

met. If this condition is met, then the instance cs'_q is added to the set Set_j of instances related to the cluster Cl_j : $Set_j = Set_j \cup cs'_q$. Further, using instances of the set Set_j , the function y_{NBj} is restored using the known parametric synthesis of models.

The second approach involves the use of all instances cs'_q of the set CS' to construct all models y_{NBj} . When restoring the function y_{NBj} that determines the output of j -th node of the fourth layer of the correcting block NB , all instances $cs'_q \in CS'$ are used, and also the membership u_{qj} of each of them to j -th cluster Cl_j (rule NR_j) is taken into account.

In the process of restoring the function y_{NBj} as the objective function E , we will use the function (14), which is a modified mean-square error function:

$$E_j = \frac{1}{|CS'|} \sum_{q=1}^{|CS'|} u_{qj} (t_q - t_{q\text{mod}})^2. \quad (14)$$

The model value $t_{q\text{mod}}$ of the output parameter of the q -th instance cs'_q is calculated from the synthesized model y_{NBj} :

$$t_{q\text{mod}} = y_{NBj}(cs'_q) = \sum_{m=0}^M w_{mj}(p_m(cs'_q)). \quad (15)$$

This function, in addition to the deviation between the actual t_q and model value $t_{q\text{mod}}$ of the output parameter of the instances cs'_q , also uses information about the membership u_{qj} of this instance to j -th cluster Cl_j as an estimate of the importance of the instance cs'_q for restoring the function y_{NBj} .

Substituting (15) into (14), reducing obtained expression by a multiplier $\frac{1}{|CS'|}$ and taking into account that $p_m(cs'_q) = p_{qm}$, we obtain the objective function of the form (16):

$$\begin{aligned}E_j &= \sum_{q=1}^{|CS'|} u_{qj} \left(t_q - \sum_{m=0}^M w_{mj}p_{qm} \right)^2 = \\ &= \sum_{q=1}^{|CS'|} \left(u_{qj} t_q^2 - 2u_{qj} t_q \sum_{m=0}^M w_{mj}p_{qm} + u_{qj} \left(\sum_{m=0}^M w_{mj}p_{qm} \right)^2 \right).\end{aligned}\quad (16)$$

To determine the values of adjustable parameters w_{mj} , find their values at which optimum target criterion $E_j \rightarrow \text{opt}$ is reached. To do this, define the partial derivatives by the parameters w_{mj} of the target criterion E_j as functions of several variables: $E_j = E_j(w_{0j}, w_{1j}, w_{Mj})$, then solve the system of equations (17):

$$\frac{\partial E_j}{\partial w_{mj}} = 0, \quad m = 0, 1, 2, \dots, M. \quad (17)$$

Expression (17) is a system consisting of $(M+1)$ linear equations of the form (18)

$$\frac{\partial E_j}{\partial w_{mj}} = \sum_{q=1}^{|CS'|} \left(-2u_{qj}t_q p_{qm} + 2u_{qj}p_{qm} \left(\sum_{m=0}^M w_{mj}p_{qm} \right) \right) = 0 \quad (18)$$

$$\sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qm}(w_{0j}p_{q0} + w_{1j}p_{q1} + \dots + w_{Mj}p_{qM})) =$$

or

$$= \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}t_q p_{qm}), \quad m = 0, 1, 2, \dots, M.$$

$$\begin{cases} w_{0j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q0}p_{q0}) + w_{1j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q0}p_{q1}) + \dots + w_{Mj} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q0}p_{qM}) = \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}t_q p_{q0}); \\ w_{0j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q1}p_{q0}) + w_{1j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q1}p_{q1}) + \dots + w_{Mj} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{q1}p_{qM}) = \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}t_q p_{q1}); \\ \dots \\ w_{0j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qM}p_{q0}) + w_{1j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qM}p_{q1}) + \dots + w_{Mj} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qM}p_{qM}) = \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}t_q p_{qM}). \end{cases} \quad (20)$$

Further, solving the system (20) by the known methods of linear algebra, the required values w_{mj} are found.

As noted above, not only linear functions of the form $(y_{NBj} = \sum_{m=0}^M w_{mj}p_m)$, but also more and more complex nonlinear dependencies can be used as functions y_{NBj} . In such cases, the search for configurable parameters w_{mj} of y_{NBj} function is performed by optimizing the target functional (14) using known gradient (in the case of functions y_{NBj} that are differentiable) or stochastic methods.

After determining the values of the adjustable parameters w_{mj} of the functions y_{NBj} , the values of the outputs

$\mu_{NBj}^{(4)}$ of the neural elements of the fourth layer of the

Performing further transformations, obtain that the m -th equation of system (17) can be written in the form (19):

$$w_{0j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qm}p_{q0}) + w_{1j} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qm}p_{q1}) + \dots + w_{Mj} \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}p_{qm}p_{qM}) = \sum_{q=1}^{|CS'|} (u_{qj}t_q p_{qm}) \quad (19)$$

Substituting the values $m = 0, 1, 2, \dots, M$ in (19), we obtain a system of linear algebraic equations (20):

correcting block NB can be calculated from formula (13). Then, the total output of the block NB (21) is calculated:

$$y_{NB}(s_{new}) = \sum_{j=1}^{N_{RNB}} \mu_{NBj}^{(4)}(s_{new}). \quad (21)$$

Then, the stage of combining the existing model NFN and the correcting block NB is performed. At this stage, the information about the data sets $S = \langle P, T \rangle$ and $S' = \langle P', T' \rangle$, approximated by the model NFN and the correcting block NB , is generalized, respectively. The modified model $NFNN$ by adding the correcting block NB to the existing model $NFN(struct, param)$ is shown in Fig. 2.

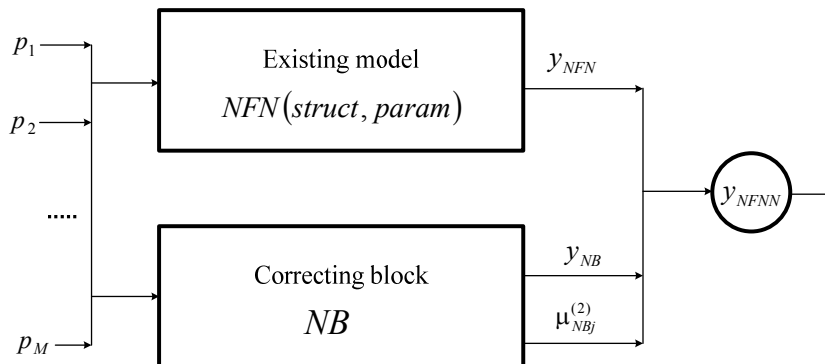


Figure 2 – Graphical interpretation of the modified model $NFNN$

To evaluate the value of the output parameter $t(s_{new})$ of a new instance $s_{new} \notin S$ using the model $NFNN$ modified (adapted to the new conditions) based on the new data $S' = \langle P', T' \rangle$, it is proposed to use the formula (22):

$$t(s_{new}) = y_{NFNN}(s_{new}) = \begin{cases} y_{NB}(s_{new}), & \bigcup_{j=1}^{N_{NB}} \mu_{NBj}^{(2)} > \mu_{\min}, \\ y_{NFN}(s_{new}), & \bigcup_{j=1}^{N_{NB}} \mu_{NBj}^{(2)} \leq \mu_{\min}. \end{cases} \quad (22)$$

As can be seen, if the new instance $s_{new} \notin S$ is characterized by a sufficiently large degree of belonging $(\bigcup_{j=1}^{N_{NB}} \mu_{NBj}^{(2)} > \mu_{\min})$ to the rules NR_j of the correcting block NB (accordingly, to clusters Cl_j synthesized on the basis of a new data set $S' = \langle P', T' \rangle$), the final value y_{NFNN} is calculated using the correcting block NB . Otherwise, it is considered that the instance s_{new} is more relevant to the source set $S = \langle P, T \rangle$, and the value y_{NFNN} is taken equal to the output value y_{NFN} by the model NFN base.

It is important to note that the proposed approach to the construction of correcting blocks NB allows to synthesize and introduce into existing models new blocks with the appearance of new information $S' = \langle P', T' \rangle$, the diagnosis of which leads to incorrect results of the model $NFNN$. Thus, the model shown in Fig. 2, can be consistently expanded by adding new blocks NB that generalize information about new observations of the investigated objects.

Consequently, the proposed method of additional training the neuro-fuzzy diagnostic models allows to adapt existing models to the change in the functioning environment by modifying them taking into account the information obtained as a result of new observations. The proposed method assumes the stages of extraction and grouping of correcting specimens, diagnosing with the help of the existing model leads to incorrect results, as well as the construction of a correcting block that summarizes the data of the correcting instances and its introduction into an already existing model. When determining the adjustable parameters of the correction block in the developed method, it is proposed to use information about the values of the coordinates of the correcting instances, as well as information on the degree of their membership to clusters in the feature space (and, accordingly, to the fuzzy rules presented in the correcting block). This allows one to take into account the importance of corrective instances for restoring the functions of the fourth layer of the correcting block and, when determining custom parameters, to increase the contribution of those specimens

that are characterized by high estimates of membership degree to a particular cluster.

Using the proposed method of additional training the neural-fuzzy diagnostic models allows not to perform the resource-intensive process of re-constructing the diagnostic model on the basis of a complete set of data, to use the already existing model as the computing unit of the new model. In addition, models synthesized using the proposed method are highly interpretive, since each block generalizes information about its data set and uses neuro-fuzzy models as a basis.

4 EXPERIMENTS

For testing the effectiveness of the developed method training of neuro-fuzzy models training, the problem of constructing diagnostic models for predicting the health status of patients with hypertension was solved [30].

Hypertension is a widespread disease that can threaten the life and health of the patient [30]. The nature of the course of hypertension is influenced by various factors (weather and climatic conditions, concomitant diseases, as well as the state of health in previous moments) [30]. In order to prevent significant pressure surges that can cause deterioration of the patient's condition, and possibly lead to death, it is necessary to predict the development of hypertension in the short term (for the next half of the day or day). This will allow timely implementation of preventive measures related to the intake of necessary medicines to prevent the expected negative consequences.

For prediction the health of a patient with hypertension, it is necessary to have a model that will be unique for each individual patient. Building such a model requires processing a large array of observations distributed over time.

Thus, since such a disease is of an individual nature [30] (the features of the disease are different for each patient as a result of which for each patient it is necessary to synthesize its own unique diagnostic model) and in connection with obtaining new information about the course of the disease over time, there is a need for periodic adjustment (additional training) of existing models for individual prediction of the patient's condition on the basis of constantly growing arrays of observations.

The initial sample of data on the state of health of a patient with hypertension was obtained in Zaporizhzhia (Ukraine). The sample $S = \langle P, T \rangle$ included observations from 2004 to 2014, where each sample was a set of data characterizing the patient's condition at a certain part of the day.

As objective clinical and laboratory features were used: p_1 is observed blood pressure (systolic and diastolic, mmHg); p_2 is a pulse (beats per minute (BPM)); data on medication (p_3 is an Amlol (0 is for patient that do not take medicines, 1 is for patient take medicines), p_4 is an Egilok (0 is for patient that do not take medicines, 1 is for patient take medicines); p_5 is a Berlipril (0 is for patient that do not take medicines, 1 is for patient

take medicines)). As subjective features used characteristics of health (p_6 is the presence of premature heart beat (0 is present, 1 is absent), p_7 is the presence of headache (0 is present, 1 is absent), p_8 is the presence of neck pain (0 is present, 1 is absent), p_9 is the presence of pulsation (0 is present, 1 is absent), p_{10} is the presence of pain in the left side (0 is present, 1 is absent), p_{11} is presence of pain in the heart (0 is present, 1 is absent), p_{12} is lack of air (0 is present, 1 is absent), p_{13} is presence of stomach-ache (0 is present, 1 is absent), p_{14} is general weakness (0 is present, 1 is absent)). As meteorological characteristics used [30] (p_{15} is an air temperature ($^{\circ}\text{C}$)), p_{16} is an atmospheric pressure (mmHg), p_{17} is type of cloud cover (0 is not cloudy, 1 is small cloudy, 2 is cloudy, 3 is overcast), p_{18} is the presence of thunderstorms (0 is present, 1 is absent), p_{19} is wind direction (0 is a windless, 1 is a northern wind, 2 is a northeasterly wind, 3 is a easterly wind, 4 is a southeasterly wind, 5 is a southern wind, 6 is a southwesterly wind, 7 is a westerly wind, 8 is a northwesterly wind), p_{20} is a wind speed (m/s), p_{21} is a solar phenomena data (Mg II index). As characteristics of time were used: date (year, month, day), identification of the day of week (p_{22}), time (hour) of observation (p_{23}), identification of the part of day (0 is a morning, 1 is an evening) (p_{24}).

The observations obtained by the method of “Short-time transform” were used to form a sample to solve the problem of qualitative forecasting of the patient’s condition for the next second half of the day according to the previous observations: as input features were used data for the previous (morning and evening) and the current day (morning), and as an output – the patient’s condition in the evening in the current day (0 – normal, 1 – aggravation of symptoms, accompanied by an increase in blood pressure).

To carry out experiments on the researching of the developed method additional training of neuro-fuzzy diagnostic models the training sample $S = \langle P, T \rangle$ was divided into two parts, the first S_{tr} of which was used for training (synthesis) of the model $NFN = NFNN(struct, param)$, and the second S_{ad} – for additional training of the already synthesized model NFN in order to obtain a new model

$NFNN = NFNN(structN, paramN)$. It is worth noting that the following conditions were met when splitting the sample $S = \langle P, T \rangle$: $S_{tr} \cup S_{ad} = S$ and $S_{tr} \cap S_{ad} = \emptyset$.

Let the variable ω represents a relationship (23) of the cardinality of the sets S_{ad} and S_{tr} :

$$\omega = \frac{|S_{ad}|}{|S_{tr}|}. \quad (23)$$

The higher the value of the variable ω , the more new observations appeared after the previous construction (reconstruction) of the model NFN .

In the process of experimental studies will be applying different methods and approaches to the training of the constructed models at different values of the variable ω :

- additional training of the synthesized neuro-fuzzy model NFN using sample S_{ad} by the Backpropagation method (BPSad) [1, 2]. In this case, the parameters of the existing model NFN , pre-synthesized by sampling S_{tr} , were used as the initial parameters of the new model $NFNN$;

- re-training of the neuro-fuzzy model using the data of the combined sets $S_{tr} \cup S_{ad} = S$ (BPS);

- using the developed method for additional training for finishing the diagnostic neuro-fuzzy models (MATDNFM). Herewith, the finish of the model was performed on a sample S_{ad} , base model NFN was synthesized based on a sample S_{tr} .

As criteria for comparison the methods additional training of the neuro-fuzzy models shall be using:

- training time t_{ad} is an amount of time that was spent on building the model $NFNN$ (without taking into account the time that was used to synthesize the base model NFN);

- error E_S of the model $NFNN$ on the sample data $S = \langle P, T \rangle$;

- error E_{Str} of the model on the sample data;

- error E_{Sad} of the model on the sample data;

- model error E_t on test data (observation data not reflected in the sample $S = \langle P, T \rangle$).

5 RESULTS

The results of the experiments are given in table 1.

Table 1 – The results of experiments on the study of methods of neural-fuzzy networks training

$\omega, \%$	t_{ad}			E_S			E_{Str}			E_{Sad}			E_t		
	BPSad	BPS	MATDN FM	BPSad	BPS	MATDN FM	BPSad	BPS	MATDN FM	BPSad	BPS	MATDN FM	BPSad	BPS	MATDN FM
1	0.8139	82.632	0.6918	0.0936	0.0296	0.0296	0.0945	0.0299	0.0299	0	0	0	0.1756	0.0572	0.0555
10	7.4727	82.632	6.7255	0.0591	0.0296	0.0296	0.0649	0.0270	0.0324	0	0.0556	0	0.1109	0.0572	0.0555
20	13.7	82.632	11.645	0.0542	0.0296	0.0296	0.0592	0.0237	0.0237	0.0294	0.0588	0.0588	0.0637	0.0572	0.0555
50	27.4	82.632	20.824	0.0443	0.0296	0.0345	0.0519	0.0296	0.0296	0.0294	0.0294	0.0441	0.0521	0.0572	0.0647
100	41.1	82.632	25.893	0.0345	0.0296	0.0345	0.0294	0.0294	0.0294	0.0396	0.0297	0.0396	0.0406	0.0572	0.0647

6 DISCUSSION

Table 1 shows that the additional training time t_{ad} , that was spent on the construction of the model $NFNN$ using the method of BPS is constant ($t_{ad} = 82.632$ sec.) and does not depend on the value of the variable ω , because before training the neuro-fuzzy network with this approach is performed by using the entire data sample $S = \langle P, T \rangle$ and does not depend on its division into the sample S_{tr} , which was used to train the basic model NFN , and the sample S_{ad} for the additional training of the already synthesized model NFN (building a new model $NFNN$). It should be noted that for small amounts of data (a low number of instances of the training sample $S = \langle P, T \rangle$), the synthesis time of the model is acceptable. However, the use of this approach in the processing of BPS large data sets for the restructuring of the already synthesized models is undesirable, and in some cases impossible, because the process of learning (re-training) will require significant time and hardware resources of the computer.

The additional training time t_{ad} in the case using the method BPSad depends on the value of the variable ω (changes from 0.8139 sec. with $\omega = 1\%$ to 41.1 sec. with $\omega = 100\%$) due to the fact that a reduced sample S_{ad} is used as the sample for which the neuro-fuzzy model is being trained. Similar results shows the proposed method MATDNFM. However, the additional training time a few below (changes from 0.6918 c. with $\omega = 1\%$ to 25.893 c. with $\omega = 100\%$) compared to additional training time with using BPSad. This is conditioned by the fact that the proposed method is pre-grouping of new instances, thereby significantly reducing the number of new rules that are introduced in the neuro-fuzzy diagnostic model, and this, in turn, reduces the number of configurable parameters and, accordingly, the time of model learning.

The error E_S on the sample $S = \langle P, T \rangle$ for the BPS method is constant ($E_S = 0.0296$) and such, which does not depend on the value of the variable ω , because the additional training (re-synthesis of the model) is performed throughout the data sample $S = S_{tr} \cup S_{ad}$. The error E_S for the BPSad method is slightly worse in comparison with the BPS (especially at low values of ω : $E_S = 0.0936$ with $\omega = 1\%$, $E_S = 0.0345$ with $\omega = 100\%$), because a reduced sample S_{ad} is used for additional training, which is only a certain part of the sample $S = \langle P, T \rangle$. As can be seen from the table, the error E_S for the BPSad method decreases with increasing value of ω . This is conditioned by the increase in the sample S_{ad} share relative to $S = \langle P, T \rangle$ the increase ω . It is worth noting that in solving practical problems the number of new data (value of ω) is usually significantly lower than the amount of initial information (sample $S = \langle P, T \rangle$). This confirms the expediency of using

the proposed method, in which the error E_S on the sample $S = \langle P, T \rangle$ is almost unchanged (does not significantly depend) when the value of the variable ω change and is commensurate with the magnitude of the error E_S using the BPS approach. This is due to the use of formulas (22) to calculate the values of the output parameter T , which takes into account both the preliminary compilation of data samples S_{tr} in the form of the underlying model NFN (output parameter value $t(s)$ is calculated according to the basic model NFN in the case that the instance s has

low degree of belonging $\bigcup_{j=1}^{N_{RNB}} \mu_{NBj}^{(2)} \leq \mu_{\min}$ to the rules of

the new structural element of the model in the form of the correction unit) and a new data sample S_{ad} , summarized in a correcting block NB (the value of the output parameter $t(s)$ is calculated by correcting block NB in the case, if the s instance is characterized by a high degree of belong-

ing $\bigcup_{j=1}^{N_{RNB}} \mu_{NBj}^{(2)} > \mu_{\min}$ to the rules of the new structural element).

The error E_{Str} value on the sample S_{tr} for the BPS method (ranges from 0.0237 to 0.0299) is similar to the error value E_S . The error E_{Str} calculated on the basis of the sample S_{tr} using the model built using BPSad method is high enough for small values of the variable ω ($E_{Str} = 0.0945$ with $\omega = 1\%$, $E_{Str} = 0.0649$ with $\omega = 10\%$, $E_{Str} = 0.0592$ with $\omega = 20\%$). This is an unacceptable result, which is justified by the using of sample S_{ad} instances when building a new model $NFNN$. Error E_{Str} when using the method MATDNFM is quite low, including at small values of the index ω ($E_{Str} = 0.0299$ with $\omega = 1\%$, $E_{Str} = 0.0324$ with $\omega = 10\%$, $E_{Str} = 0.0294$ with $\omega = 100\%$). Such values E_{Str} confirm that the proposed method is appropriate to use at low values of ω , that is, in cases where the volume of new information S_{ad} about the objects or processes is significantly lower than the amount of available information S_{tr} that was used to build the basic model of NFN .

The table shows that the value of the error E_{Sad} calculated on the basis of the sample S_{ad} at small values of the variable ω (1% and 10%) is zero for all methods (except for the value $E_{Sad} = 0.0556$ for the BPS method with $\omega = 10\%$), what indicates their ability to implement new data into the existing model. However, comparing the values of the values E_{Sad} , E_{Str} and E_S , we can conclude that the method BPSad, in contrast to the proposed method MATDNFM, loses its ability to approximate the model (the value E_S increases to an unacceptable value at low levels of value of ω). The BPS method

is similar to the proposed method and provides synthesis (training) of neuro-fuzzy models with acceptable approximating properties ($E_S = 0.0296$), but the time before additional training (re-synthesis) of the model using the BPS method is high enough ($t_{ad} = 82.632$ sec.) and commensurate with the training time of the basic model that, unlike the proposed method MATDNFM ($t_{ad} = 0.6918$ sec. with $\omega = 1\%$ and $t_{ad} = 25.893$ sec. with $\omega = 100\%$, what is significantly less than when using the method BPS), significantly limits its use in practice, especially when processing big data.

Low values of the error E_t of model *NFNN* on test data (with the exception of the method BPSad at low values of the variable ω), calculated for the test sample data (data about observations, which are not reflected in the sample $S = \langle P, T \rangle$) confirm the ability to the generalization data by neuro-fuzzy diagnosis models which passed the additional training process.

Thus, the proposed method of MATDNFM is advisable to use at low values of ω , that is, in cases where the volume of new information S_{ad} about the objects or processes is significantly lower than the amount of available information S_{tr} , that was used to build the basic model of NFN.

Given that the number of new data (variable ω) is usually significantly lower than the amount of initial information when solving practical problems, the use of the proposed method is appropriate, since the model *NFNN* error E_S on the sample $S = \langle P, T \rangle$ does not change almost when the values of the variable ω change, and the additional training time is much less than when using the BPS method.

CONCLUSIONS

The urgent problem of automation of the process of assessing the informativeness of features in solving problems of diagnosing and pattern recognition has been solved.

The scientific novelty of obtained results is that the method has been developed for additional training of diagnostic neuro-fuzzy models, which allows to adapt existing models to the change in the functioning environment by modifying them taking into account the information obtained as a result of new observations. The proposed method assumes the stages of extraction and grouping of correcting specimens, diagnosing with the help of the existing model leads to incorrect results, as well as the construction of a correcting block that summarizes the data of the correcting instances and its introduction into an already existing model. When determining the adjustable parameters of the correction block in the developed method, it is proposed to use information about the values of the coordinates of the correcting instances, as well as information on the degree of their belonging to clusters in the feature space (and, accordingly, to the fuzzy rules presented in the correcting block). This allows one to take

into account the importance of corrective copies for restoring the functions of the fourth layer of the correcting block and, when determining custom parameters, to increase the contribution of those specimens that are characterized by high estimates of the degree of belonging to a particular cluster. Using the proposed method of learning the diagnostic neural-fuzzy models allows not to perform the resource-intensive process of re-constructing the diagnostic model on the basis of a complete set of data, to use the already existing model as the computing unit of the new model. In addition, models synthesized using the proposed method are highly interpretive, since each block generalizes information about its data set and uses neuro-fuzzy models as a basis.

The practical significance of obtained results is that the practical tasks of diagnosing and recognizing images are solved. The results of the experiments showed that the proposed method makes it possible to carry out additional training of diagnostic neuro-fuzzy models on the basis of new information and can be used in practice for solving practical problems of diagnosing and pattern recognition.

Prospects for further research are to develop the new methods for the additional training of deep learning neural networks for the big data processing

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of software tools department of Zaporizhzhya National Technical University "Methods and means of decision-making for data processing in intellectual recognition systems" (state registration number 0117U003920).

REFERENCES

1. Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications. New York, InTech, 2013, 264 p. DOI: 10.5772/3409.
2. Hanrahan G. Artificial Neural Networks in Biological and Environmental Analysis. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2011, 214 p. DOI: 10.1201/b10515.
3. Price C. Computer based diagnostic systems. London, Springer, 1999, 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
4. Nauck D., Klawonn F., Kruse R. Foundations of neuro-fuzzy systems. Chichester, John Wiley & Sons, 1997, 305 p.
5. Oliinyk A., Skrupsky S., Subbotin S., Blagodariy O., Gofman Ye. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 4, pp. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
6. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing. New York, Marcel Dekker Inc., 2002, 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
7. eds. C. Sammut, Webb G. I. Encyclopedia of machine learning. New York, Springer, 2011, 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
8. ed. Ch. L. Mumford Computational intelligence: collaboration, fusion and emergence. New York, Springer, 2009, 752 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01799-5.
9. Ding S. X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools. Berlin, Springer, 2008, 473 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4799-2.

10. Shin Y. C., Xu C. Intelligent systems : modeling, optimization, and control. Boca Raton, CRC Press, 2009, 456 p. DOI: 10.1201/9781420051773.
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. Kolpakova T., Oliinyk A., Lovkin V. Integrated method of extraction, formalization and aggregation of competitive agents expert evaluations in group, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 100–108. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-11.
13. eds. Berthold M., Hand D. J. Intelligent data analysis: an introduction. New York, Springer Verlag, 2007, 525 p. DOI: 10.1007/978-3-540-48625-1.
14. Tenne Y., Goh C.-K. Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems. Berlin, Springer, 2010, 800 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10701-6.
15. Oliinyk A. A., Skrupsky S. Yu., Shkaruplyo V. V., Subbotin S. A. The model for estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 1, pp. 142–152. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-16.
16. Oliinyk A. A., Skrupsky S. Yu., Shkaruplyo V. V., Blagodariov O. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 82–92. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-9.
17. Bishop C. Neural Networks for pattern recognition. New York, Oxford University Press, 1995, 482 p.
18. Blanke M., Kinnaert M., Lunze J., Staroswiecki M. Diagnosis and fault-tolerant control. Berlin, Springer, 2006, 672 p. DOI: 10.1007/978-3-662-47943-8.
19. Oliinyk A. A., Subbotin S. A., Skrupsky S. Yu., Lovkin V. M., Zaiko T. A. Information Technology of Diagnosis Model Synthesis Based on Parallel Computing, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 3, pp. 139–151. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-16.
20. Vachtsevanos G., Lewis F., Roemer M. et al. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, 434 p. DOI: 10.1002/9780470117842.
21. Jang J. R., Sun C.-T., Mizutani E. Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence. Upple Saddle River: Prentice-Hall, 1997, 614 p. DOI: 10.1109/TAC.1997.633847.
22. Oliinyk A., Subbotin S., Lovkin V., Ilyashenko M., Blagodariov O. Parallel method of big data reduction based on stochastic programming approach, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2018, No. 2, pp. 60–72.
23. Shitikova O. V., Tabunshchik G. V. // Method of Managing Uncertainty in Resource-Limited Settings, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, No. 2, pp. 87–95. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-2-11.
24. Rutkowski L. Flexible neuro-fuzzy systems : structures, learning and performance evaluation. Boston, Kluwer, 2004. 276 p. DOI: 10.1109/TNN.2003.811698.
25. Jensen R., Shen Q. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008, 339 p. DOI: 10.1002/9780470377888.
26. Oliinyk A., Subbotin S., Lovkin V., Blagodariov O., Zaiko T. The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 4, pp. 85–96. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-4-10.
27. Mulaik S. A. Foundations of Factor Analysis. Boca Raton, Florida, CRC Press, 2009, 548 p.
28. Sobhani-Tehrani E., Khorasani K. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach. New York, Springer, 2009, 265 p. (Lecture notes in control and information sciences ; № 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.
29. 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.
30. Subbotin S., Oliinyk A., Skrupsky S. Individual prediction of the hypertensive patient condition based on computational intelligence / S. Subbotin, // *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, pp. 336–344. DOI: 10.1109/DT.2015.7222996.

Received 25.06.2018.
Accepted 02.08.2018.

УДК 004.272.26: 004.93

ДОНАВЧАННЯ ДІАГНОСТИЧНИХ НЕЙРО-НЕЧІТКИХ МОДЕЛЕЙ

Олійник А. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Субботін С. О. – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Леощенко С. Д. – студент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Ілляшенко М. Б. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Миронова Н. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Мастинівський – канд. фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри прикладної математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено задачу автоматизації синтезу діагностичних моделей при діагностуванні та розпізнаванні образів. Об'єкт дослідження – методи синтезу нейро-нечітких діагностичних моделей. Предмет дослідження – методи донавчання нейро-нечітких мереж. Мета роботи – створення методу донавчання нейро-нечітких діагностичних моделей.

Метод. Запропоновано метод донавчання діагностичних нейро-нечітких моделей, який дозволяє адаптувати до зміни середовища функціонування існуючі моделі шляхом їх модифікації з урахуванням інформації, отриманої в результаті нових спостережень. Даний метод передбачає виконання етапів видобування та угруповання коригувальних екземплярів, діагностування за якими за допомогою існуючої моделі призводить до некоректних результатів, а також побудову коригувального блоку, який узагальнює дані коригувальних екземплярів, і впровадження його у вже існуючу модель. Використання запропонованого методу донавчання діагностичних нейро-нечітких моделей дозволяє не виконувати ресурсомісткий процес повторної побудови діагностичної моделі на основі повного набору даних, використовувати вже наявну модель в якості обчислювального блоку нової моделі. Моделі, синтезовані за допомогою запропонованого методу, характеризуються високою інтерпретованістю, оскільки кожен блок узагальнює інформацію про свій набір даних і в якості базису використовує нейро-нечітку модель.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізує запропонований метод донавчання нейро-нечітких мереж і дозволяє виконувати перебудову існуючих діагностичних моделей на основі нової інформації про досліджувані об'єкти або процеси.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого методу донавчання нейро-нечітких мереж і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при обробці масивів даних для діагностування та розпізнавання образів. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в розробці нових методів донавчання глибоких нейромереж для оброблення великих даних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: вибірка даних, діагностування, донавчання, нейро-нечітка модель, параметр, функція належності.

УДК 004.272.26: 004.93

ДООБУЧЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ НЕЙРО-НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Олейник А. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Субботин С. А. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Леощенко С. Д. – студент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Ильяшенко М. Б. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем и сетей Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Миронова Н. А. – канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Мастиновский Ю. В. – канд. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решена задача автоматизации синтеза диагностических моделей при диагностировании и распознавании образов. Объект исследования – методы синтеза нейро-нечетких диагностических моделей. Предмет исследования – методы дообучения нейро-нечетких сетей. Цель работы – создание метода дообучения нейро-нечетких диагностических моделей.

Метод. Предложен метод дообучения диагностических нейро-нечетких моделей, который позволяет адаптировать к изменению среды функционирования существующие модели путем их модификации с учетом информации, полученной в результате новых наблюдений. Данный метод предусматривает выполнение этапов извлечения и группировки корректирующих экземпляров, диагностирование по блокам с помощью существующей модели приводит к некорректным результатам, а также построение корректирующего блока, который обобщает данные корректирующих экземпляров, и его внедрение в уже существующую модель. Использование предложенного метода дообучения диагностических нейро-нечетких моделей позволяет не выполнять ресурсоемкий процесс повторного построения диагностической модели на основе полного набора данных, использовать уже имеющуюся модель в качестве вычислительного блока новой модели. Модели, синтезированные с помощью предложенного метода, характеризуются высокой интерпретируемостью, поскольку каждый блок обобщает информацию о своем наборе данных и в качестве базиса использует нейро-нечеткие модели.

Результаты. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный метод дообучения нейро-нечетких сетей и позволяющее выполнять перенастройку существующих диагностических моделей на основе новой информации об исследуемых объектах или процессах.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного метода дообучения нейро-нечетких сетей и позволяют рекомендовать его для использования на практике при обработке массивов данных для диагностирования и распознавания образов. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в разработке новых методов дообучения глубоких нейросетей для обработки больших данных.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: выборка данных, диагностирование, дообучение, нейро-нечеткая модель, параметр, функция принадлежности.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Suzuki K. Artificial Neural Networks: Architectures and Applications / K. Suzuki. – New York : InTech, 2013. – 264 p. DOI: 10.5772/3409.
2. Hanrahan G. Artificial Neural Networks in Biological and Environmental Analysis / G. Hanrahan. – Boca Raton, Florida : CRC Press, 2011. – 214 p. DOI: 10.1201/b10515.
3. Price C. Computer based diagnostic systems / C. Price. – London: Springer, 1999. – 136 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-0535-0.
4. Nauck D. Foundations of neuro-fuzzy systems / D. Nauck, F. Klawonn, R. Kruse. – Chichester : John Wiley & Sons, 1997. – 305 p.
5. Oliinyk A. Parallel computing system resources planning for neuro-fuzzy models synthesis and big data processing / [A. Oliinyk, S. Skrupsky, S. Subbotin, O. Blagodariyov] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2016. – № 4. – P. 61–69. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-8.
6. Bow S. Pattern recognition and image preprocessing / S. Bow. – New York : Marcel Dekker Inc., 2002. – 698 p. DOI: 10.1201/9780203903896.
7. Encyclopedia of machine learning / [eds. C. Sammut, G. I. Webb]. – New York : Springer, 2011. – 1031 p. DOI: 10.1007/978-0-387-30164-8.
8. Computational intelligence: collaboration, fusion and emergence / [ed. Ch. L. Mumford]. – New York : Springer, 2009. – 752 p. DOI: 10.1007/978-3-642-01799-5.
9. Ding S. X. Model-based fault diagnosis techniques: design schemes, algorithms, and tools / S. X. Ding. – Berlin : Springer, 2008. – 473 p. DOI: 10.1007/978-1-4471-4799-2.
10. 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.
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. Kolpakova T. Integrated method of extraction, formalization and aggregation of competitive agents expert evaluations in group / T. Kolpakova A. Oliinyk, V. Lovkin // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 2. – P. 100–108. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-11.
13. Intelligent data analysis: an introduction / [eds. M. Berthold, D. J. Hand]. – New York: Springer Verlag, 2007. – 525 p. DOI: 10.1007/978-3-540-48625-1.
14. Tenne Y. Computational Intelligence in Expensive Optimization Problems / Y. Tenne, C.-K. Goh. – Berlin : Springer: 2010. – 800 p. DOI: 10.1007/978-3-642-10701-6.
15. The model for estimation of computer system used resources while extracting production rules based on parallel computations / [A. A. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, S. A. Subbotin] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 1. – C. 142–152. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-1-16.
16. Parallel multiagent method of big data reduction for pattern recognition / [A. A. Oliinyk, S. Yu. Skrupsky, V. V. Shkaruplyo, O. Blagodariyov] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 2. – C. 82–92. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-9.
17. Bishop C. Neural Networks for pattern recognition / C. Bishop. – New York : Oxford University Press, 1995. – 482 p.
18. Diagnosis and fault-tolerant control / [M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, M. Staroswiecki]. – Berlin: Springer, 2006. – 672 p. DOI: 10.1007/978-3-662-47943-8.
19. Information Technology of Diagnosis Model Synthesis Based on Parallel Computing / [A. A. Oliinyk, S. A. Subbotin, S. Yu. Skrupsky et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 3. – P. 139–151. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-3-16.
20. Intelligent fault diagnosis and prognosis for engineering systems / [G. Vachtsevanos, F. Lewis, M. Roemer et al.]. – New Jersey: John Wiley & Sons, 2006. – 434 p. DOI: 10.1002/9780470117842.
21. Jang J. R. Neuro-fuzzy and soft computing: a computational approach to learning and machine intelligence / J. R. Jang, C.-T. Sun, E. Mizutani. – Upple Saddle River: Prentice-Hall, 1997. – 614 p. DOI: 10.1109/TAC.1997.633847.
22. Parallel method of big data reduction based on stochastic programming approach / [A. Oliinyk, S. Subbotin, V. Lovkin et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2018. – № 2. – P. 60–72.
23. Shitikova O. V. Method of Managing Uncertainty in Resource-Limited Settings / O. V. Shitikova, G. V. Tabunshchik // Radio Electronics Computer Science Control. – 2015. – № 2. – P. 87–95. DOI: 10.15588/1607-3274-2015-2-11.
24. Rutkowski L. Flexible neuro-fuzzy systems : structures, learning and performance evaluation / L. Rutkowski. – Boston: Kluwer, 2004. – 276 p. DOI: 10.1109/TNN.2003.811698.
25. 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.
26. Oliinyk A. A The System of Criteria for Feature Informativeness Estimation in Pattern Recognition / [A. Oliinyk, S. Subbotin, V. Lovkin et al.] // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 4. – P. 85–96. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-4-10.
27. Mulaik S. A. Foundations of Factor Analysis / S. A. Mulaik. – Boca Raton, Florida: CRC Press. – 2009. – 548 p.
28. Sobhani-Tehrani E. Fault diagnosis of nonlinear systems using a hybrid approach / E. Sobhani-Tehrani, K. Khorasani. – New York: Springer, 2009. – 265 p. – (Lecture notes in control and information sciences ; № 383). DOI: 10.1007/978-0-387-92907-1.
29. 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.
30. 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. DOI: 10.1109/DT.2015.7222996.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

UDC 004.33(035)

MODEL OF CYBER SECURITY FINANCING WITHIN THE FRAMEWORK OF THE BILINEAR DIFFERENTIAL QUALITY GAME SCHEME

Akhmetov B. B. – PhD, Associate Professor, Rector of the Caspian State University of Technologies and Engineering named after Sh. Yessenov, Aktau, Kazakhstan.

Lakhno V. A. – Dr. Sc., Professor, Head of Department of cybersecurity, European University, Kyiv, Ukraine.

Malyukov V. P. – Dr. Sc., Associate Professor, Professor, Department of Informatics Systems, Mathematics Disciplines, European University, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Actuality. There is considered the actual problem of an optimal decision making on financing of information and cyber security means in the conditions of active counteraction to the side of the attackers of information and communication systems of the logistics and situational transport center.

The aim of the work is to develop a model for the decisions support system of the financing process of the information and cyber security means of the logistics and situational transport center in conditions of active counteraction to the attacking party, which differs from existing approaches by solving a bilinear differential quality game with several terminal surfaces.

Method. Solving a bilinear differential quality game, that allows to reflect adequately the essence of the problem, there was used a discrete approximation method. The method allowed not only to find a solution of the bilinear differential quality game with dependent motions, but also became an effective at the software implementation of the decisions support system in the field of financing information and cyber security means for information and communication systems of the protected logistics-situational transport center.

Results. The developed model allows to obtain optimal financing strategies by the cyber security means protection side for information and communication logistics and situational transport centers at any ratio of parameters describing the financing process, no matter how financially the party tries to attack the security perimeters.

Conclusions. In this article there was firstly considered the model within the framework of the bilinear differential quality game scheme for the decisions support system of the process of cyber security means financing for information and communication systems of protected logistics and situational transport centers. For such differential games there were previously developed no effective solution methods. In the proposed solution there were firstly used the differential equations that define the interaction dynamics, describe the dependent motions by means of bilinear functions.

KEYWORDS: cyber security, differential game, optimal strategies, hacking and protection, decision support system.

ABBREVIATIONS

IS – information security;
ICTS – information and communication transport systems;
CS – cyber security;
LSC – logistics and situational centers;
ISS – information security systems;
DSS – decision support system;
GT – game theory.

NOMENCLATURE

g^* – coefficient determining the balance beam;
 M_0 – terminal surface for the 1st player;
 N_0 – terminal surface for the 2nd player;
 r_1 – efficiency of financial resources investments in the means of IS and CS ICTS;
 r_2 – efficiency of financial resources investments in the means of overcoming the boundaries of ICST protection;

R_+^2 – positive orant;
 t – time parameter;
 u^* – optimal strategy of the 1st player;
 U – strategies of the 1st player;
 V – strategies of the 2nd player;
 x – the value of the financial resource of the 1st player (ICST protector);
 y – the value of the financial resource of the 2nd player (hacker);
 Z_1 – a set of preferences for the 1st player;
 Z_2 – a set of preferences for the 2nd player;
 α – the growth rate of the financial resource of the 1st player for the ICTS protection;
 β – the growth rate of the financial resource of the 2nd player for the ICTS hacking.

INTRODUCTION

The rapid development of digital technologies in various fields, particularly, in ICTS, stimulate the active development of IS and CS systems. Analyzing the problems of ICTS protection it is advisable to consider the transformation of the situation in the context of actions of two parties (players): party 1 – IS and CS services; party 2 – intruder (hacker). In accordance with [1] the party 2 is regarded as a set of potential threats. As the threats there can be seen both the incompetent actions of individual performers inside the ICTS and the planned targeted cyber attacks. It is noted in works [2, 3] that in such situations the most adequate models describing the behavior of a system with two or more opposing sides are the models based on TI. In fact, if the strategies of both parties 1 and 2, the win/loss for the players (for the cases under consideration) are known then we can talk about solving the problem of rational financing in the IS and CS systems. At the same time, the party 2 (hacker) does not have enough financial resources to overcome the perimeter of the ICTS protection. The reverse problem will be the situation in which the party 1 (the ICTS protector) did not have enough financial resources to protect it.

The object of the research is the process of financing in the means of information and cyber security of the LSC transport and its ICTS.

The aim of the work is the development of a model for the decision support system of the financing process in the means of information and cyber security of the LSC transport, in conditions of active counteraction to the attacking party, which differs from existing approaches by solving a bilinear differential quality game with several terminal surfaces.

1 PROBLEM STATEMENT

One of the most important tasks, facing the services ensuring the ICTS functioning, is the task of their IS and CS. This requires adequate financial investment. In turn,

the decision-making on ICTS means investing should be based on procedures that allow financing taking into account all the factors inherent to CS. This is possible if the DSS is developed and implemented, allowing to make optimal (rational) decisions on investing financial resources for the development of ICTS protection tools. There is considered a model for a DSS on a continuous procedure for financing of IS and CS of ICTS in LSC from the penetration of intruders (hackers) into them. The model is based on solving a bilinear differential quality game with two terminal surfaces. Mathematical statement: there are two players that control a dynamic system, given by a system of bilinear differential equations with dependent motions. The sets of strategies of the players U and V are determined accordingly. Two terminal surfaces M_0, N_0 are defined. The aim of the first player is to put the dynamic system using its control strategies to the terminal surface M_0 , despite the second player actions. The aim of the second player is to put the dynamic system using its control strategies to the terminal surface N_0 , despite the first player actions. The solution is to find a set of initial states of objects and their strategies that allow objects to put the system to that or another surface.

2 LITERATURE REVIEW

In recent years, there has been a tendency to replenish traditional mathematical approaches to the selection of compatible hardware and software systems for CS and IS [4, 5]. In the context of the problem there was carried out the analysis of the literature data for works using the games theory [6] choosing the means of CS. A general approach to the use of TI for the analysis of interactions between participants of the protection process and attackers was presented in [7, 8]. The authors did not cover all the interests of the decision-making parties. In work [9] there was proposed the TI apparatus for the problems of selecting the protection means against unauthorized access. The work was not implemented in the format of completed recommendations. In work [10] there was carried out a review and analysis of game-theoretic methods in the problems of IS and CS providing. The authors were limited by simulating the total cost of ISS without taking into account the behavioral strategies of the parties. In work [11] there were considered the models of step games in cases of incomplete information prior to the construction of protection mechanisms from DoS / DDoS attacks. A certain disadvantage of the work is the fact that in order to find a successful strategy for the player 1 (an information protector) it requires experimentally to collect statistics on the types of ISS. In work [12] there was considered a final non-cooperative game with at least one balance situation with mixed strategies of the parties. The authors do not give any data on how to find the balance situation by standard TI methods.

As the performed analysis of the latest researches in the field of TI application for determining the strategies of parties 1 and 2 has shown the problem of further development of models for the ISS in the tasks of financing process control in the means of the IS and CS of LSC transport and its protected information and communication systems remains relevant.

3 MATERIALS AND METHODS

Here is a mathematical model for the ICTS protection means financing. In task 1 the confederate player is treated for the protector, the enemy player is treated for the hacker. And vice versa – in task 2, the confederate player is treated for the hacker, and the enemy player is treated for the protector. The first player seeks to protect his ICTS for LSC [13]. The second - to hack the ICTS. For this purpose, both players need financial resources. We assume that for a given period of time $[0, T]$ (T is a real positive number) the first player has $x(0)$ financial resources, while the second player has $y(0)$. These parameters determine the predicted, at $t = 0$, amount of financial resources that players 1 and 2 have to achieve their goals. At the initial moment of time t the first player multiplies the value $x(0)$ by the coefficient (rate of change, growth) $\alpha(t)$. Then, the player 1 selects a value $u(t)$ ($u(t) \in [0, 1]$) that determines the share of the resource $\alpha(t) \cdot x(t)$ of the 1st player allocated by him at the CS at time t . Similarly, at time t the player 2 multiplies the value $y(t)$ by the coefficient (rate of change, growth) $\beta(t)$. Next, the player 2 selects a value $v(t)$ ($v(t) \in [0, 1]$) that determines the share of the resource $\beta(t) \cdot y(t)$ of the second player's allocated by him for ICTS hacking at time t .

Let denote by r_1 the effectiveness of financial resources investment in the means IS and CS of ICTS. In fact, r_1 -coefficient that shows how much financial resources a hacker will need to hack the IS (in our case, ICTS), for the protection of which there was expended the unit of financial resource of the first player. Let designate by r_2 the effectiveness of financial resources investment in IS hacking tools (ICTS). Or r_2 -coefficient that shows how much financial resources an ICTS protector will need if there was expended the resource unit on hacking. Then the dynamics of financial resources changes of the first and second players is given by the following system of differential equations:

$$\frac{dx}{dt} = -x(t) + \alpha(t) \cdot x(t) - u(t) \cdot \alpha(t) \cdot x(t) - r_2 \cdot v(t) \cdot \beta(t) \cdot y(t); \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = -y(t) + \beta(t) \cdot y(t) - v(t) \cdot \beta(t) \cdot y(t) - r_1 \cdot u(t) \cdot \alpha(t) \cdot x(t). \quad (2)$$

Then at the moment t it is possible to fulfill one of three conditions: 1) $x(t) > 0, y(t) = 0$; 2) $x(t) = 0, y(t) > 0$; 3) $x(t) > 0, y(t) > 0$. If the first condition is fulfilled, then we will say that the financing procedure for the CS systems is completed. And the ICTS hacker has not enough financial means to overcome the protection. If the second condition is fulfilled, then we will say that the procedure for financing the CS systems is completed and the protection side did not have enough financial resources for its efficient organization. If the third condition is fulfilled, the procedure for CS financing systems CRB continues further.

The values $x(T), y(T)$ show the CS systems financing result on the planned interval $[0, T]$.

The IS and CS financing systems process is considered within the framework of a positional differential game with complete information. [14] In this case, the process generates two tasks: from the point of view of the first confederate player and the second confederate player [2]. Because of the symmetry we confine the problem statement from the point of view of the first confederate player. The second problem is solved similarly. Let denote T^* by the set $[0, T]$.

Definition. The pure strategy of the first confederate player is the function $u: T^* \cdot [0, 1] \cdot [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, that puts the state of the position $(t, (x, y))$ the value $u(t, (x, y)): 0 \leq u(t, (x, y)) \leq 1$.

Therefore, the pure strategy of the first confederate player is the function (rule) that puts the state of information (position) at the moment t the value $u(t, (x, y))$. The value $u(t, (x, y))$ determines the share of the financial resource of the player – ICST protector, which he planned to spend for the protection at a time t . Regarding the awareness of the enemy player (within the framework of the positional differential game scheme), no assumptions are made. This is equivalent to the fact that the confederate player chooses his controlling influence based on any information. After defining the strategies in task 1, it is necessary to determine the set of preferences Z_1 for the first player. Therefore, Z_1 – this set of such initial states $(x(0), y(0))$ of financial resources of the defender and the hacker, which has the following property. The property of financial resources of the players: for the initial states there is a strategy of the first player, which for any realizations of the second player strategies put the state of the system in $(x(0), y(0))$ at which the condition 1) will be fulfilled. However, the second player does not have a strategy that can lead to the fulfillment of conditions 2) or 3). The strategy $u_*(\cdot, \cdot)$ of the protector-player that possesses to the states 2) or 3) is called optimal. The solution of Problem consists in finding the sets of “preferences” of the protector and his

optimal strategies. Similarly, the problem is posed from the point of view of the second confederate player.

The solution of the problem 1 is found using the tools of the differential quality games theory with complete information [14, 15], which allows to find it at any ratio of game parameters. We give the solution of the game, i.e. sets of preference Z_1 and optimal strategies for the first player.

The case 1. $r_1 \cdot r_2 = 1, \beta \geq \alpha$. Then we will receive:

$$Z_1 = \{(x(0), y(0) : (x(0), y(0))) \in \text{int } R_+^2, r_1 \cdot \alpha \cdot x(0) > \beta \cdot y(0)\} \quad (3)$$

$u_*(x, y) = \{1, r_1 \cdot \alpha \cdot x(0) > \beta \cdot y(0)\}, (x, y) \in \text{int } R_+^2$, and is not defined otherwise.

The case 2. $r_1 \cdot r_2 = 1, \beta < \alpha$. Then we will receive:

$$Z_1 = \{(x(0), y(0) : (x(0), y(0))) \in \text{int } R_+^2, r_1 \cdot \alpha \cdot x(0) > \beta \cdot y(0)\} \quad (4)$$

$$u_*(x, y) = \{0, \text{при } \beta \cdot y < r_1 \cdot \alpha \cdot x < \alpha \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\},$$

$\{1, \text{при } r_1 \cdot \alpha \cdot x > \alpha \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}$, and is not defined otherwise.

The case 3. $r_1 \cdot r_2 > 1, \beta > r_1 \cdot \alpha \cdot r_2$. Here $u_*(\cdot), Z_1$ are defined in the same way as in Case 1.

The case 4. $r_1 \cdot r_2 > 1, \alpha \leq \beta < r_1 \cdot \alpha \cdot r_2$. Then we will receive:

$$Z_1 = \{(x(0), y(0) : (x(0), y(0))) \in \text{int } R_+^2, r_1 \cdot \alpha \cdot x(0) > (r_1 \cdot \alpha \cdot r_2 \cdot \beta)^{\frac{1}{2}} \cdot y(0)\} \quad (5)$$

$u_*(x, y) = \{1, \text{при } r_1 \cdot \alpha \cdot x > (r_1 \cdot \alpha \cdot r_2 \cdot \beta)^{\frac{1}{2}} \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}, (x, y) \in \text{int } R_+^2$, and is not defined otherwise.

The case 5. $r_1 \cdot r_2 > 1, \frac{\alpha}{(r_1 \cdot r_2)} < \beta < \alpha$.

Here $u_*(\cdot), Z_1$ are defined in the same way as in Case 4.

The case 6. $r_1 \cdot r_2 > 1, \beta < \frac{\alpha}{(r_1 \cdot r_2)}$.

$$Z_1 = \{(x(0), y(0) : (x(0), y(0))) \in \text{int } R_+^2, \alpha \cdot x(0) > r_2 \cdot \beta \cdot y(0)\} \quad (6)$$

$u_*(x, y) = \{0, \text{при } r_1 \cdot \alpha \cdot r_2 \cdot y < r_1 \cdot \alpha \cdot x < \beta \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}$
 $\{1, \text{при } r_1 \cdot \alpha \cdot x > \beta \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}$, and is not defined otherwise.

The case 7. $r_1 \cdot r_2 < 1, \beta \geq \alpha$.

Here $u_*(\cdot), Z_1$ similarly to Case 1.

The case 8. $r_1 \cdot r_2 < 1, r_1 \cdot \alpha \cdot r_2 \leq \beta < \alpha$.

Then we will receive:

$$Z_1 = \{(x(0), y(0) : (x(0), y(0))) \in \text{int } R_+^2, \alpha \cdot x(0) > r_2 \cdot \beta \cdot y(0)\} \quad (7)$$

$$u_*(x, y) = \{0, \text{при } r_1 \cdot \beta \cdot r_2 \cdot y < r_1 \cdot \alpha \cdot x < \alpha \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}$$

$\{1, \text{при } r_1 \cdot \alpha \cdot x \geq \alpha \cdot y, (x, y) \in \text{int } R_+^2\}$, and is not defined otherwise.

The case 9. $r_1 \cdot r_2 < 1, \beta < r_1 \cdot \alpha \cdot r_2$. Здесь $u_*(\cdot), Z_1$ are defined in the same way as in Case 8.

The task from the point of view of the second confederate player is solved similarly.

The sets of preference (cones) from the point of view of the second confederate player “join” to the sets of “preference” of the first confederate player. These sets are divided among themselves by the balance beams. The balance beams have the property if the pair $(x(0), y(0))$ belongs to the beam, then the players have strategies that enable them to be on the balance beam for all subsequent moments of time. This can allow, at given $(x(0), y(0))$, to find the relations to the interaction parameters, under which the pair $(x(t), y(t))$ will be located on the balance beam.

4 EXPERIMENTS

The computational experiment was conducted in the PTC Mathcad 4 environment. The software module for the DSS «SSDMI» is also implemented in the RadStudio (Delphi) environment, see Fig. 1 [16]. As the initial data there was accepted the technical task data for the development of protected LSC transport of Ukraine and the Republic of Kazakhstan.

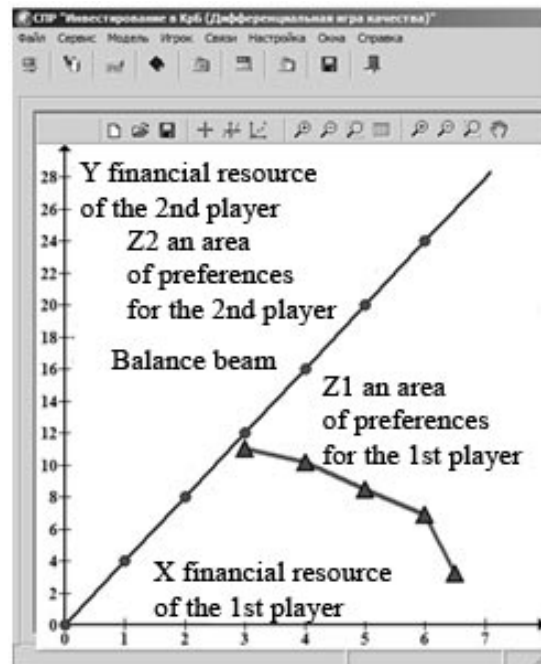


Figure 1—General view of the DSS module of the CS means financing process for the bilinear differential game quality scheme

5 RESULTS

Table 1 and Fig. 2–5 show the results for 4-x test calculations during the computational experiment. There

were considered situations when two players control a dynamic system. The purpose of the experiment is to determine the set of strategies of the players U and V . There are also considered the cases when the players' strategies deduce them on the corresponding terminal surfaces M_0, N_0 . In the course of the experiment, there are found sets of initial states of objects and their strategies that allow objects to bring the system to one or

another terminal surface. On the plane, the axis X is the financial resources of the 1st player. Axis Y – financial resources of the 2nd player. The area under the beam – Z_1 (the “preference” area of the first player). The area above the beam – Z_2 (the “preference” area of the second player).

Table 1 – Computational experiment results

Calculations	Modeling results					g^*
	$x(0), y(0)$	$x(1), y(1)$	$x(2), y(2)$	$x(3), y(3)$	$x(4), y(4)$	
1	3,11	4,10.2	5,8.5	6,7.3	6.5,3.2	4
2	5,10.5	4,2,11	3,7,11.2	2,8,12.3	1,6,13.1	2
3	5,15	4,2,12.6	3,4,10.2	2,8,8.4	1,3, 3.9	3
4 (in comparison to MathCad)	3,11.3	4,10.5	5,8.9	6,7.9	6.5,3.6	4

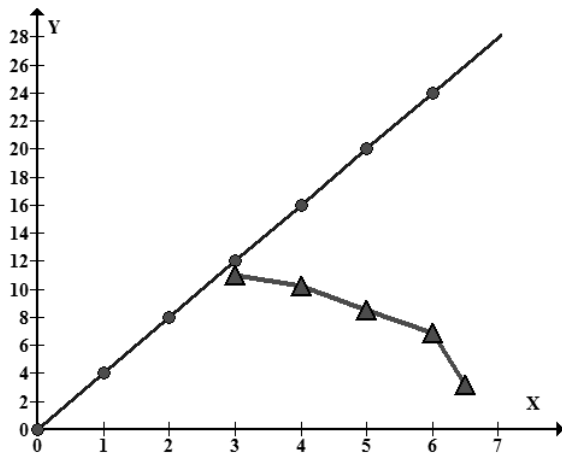


Figure 2 – Computational experiment results 1

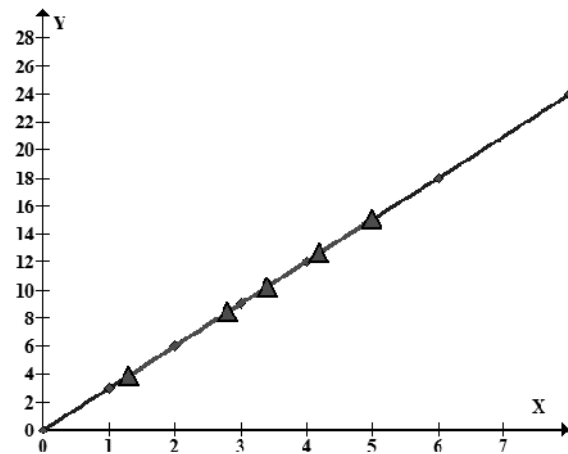


Figure 4 – Computational experiment results 3

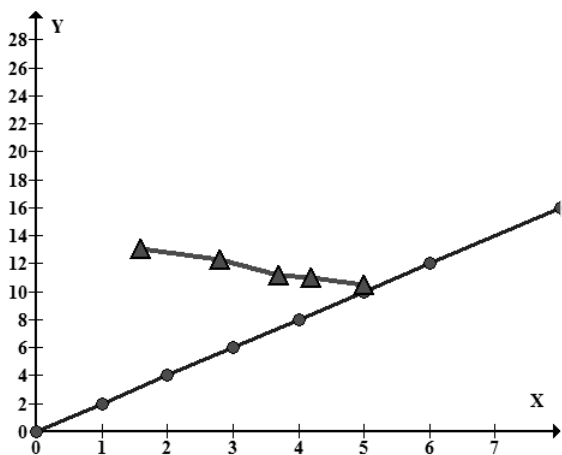


Figure 3 – Computational experiment results 2

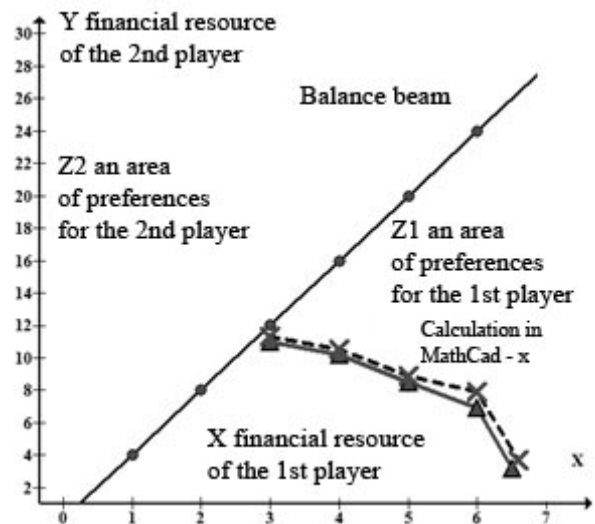


Figure 5 – Computational experiment results in DSS in comparison to MathCad

The obtained results demonstrate the effectiveness of the proposed approach. During the testing of the model in the PTC Mathcad 4 environment, as well as in the DSS “SSDMI” [16] there was established the correctness of the results.

Approbation of DSS “SSDMI” was carried out for real investment projects in the field of cyber security of Ukraine and Kazakhstan [15, 16].

6 DISCUSSION

Fig. 2 illustrates the situation where the first player has an advantage in the ratio of the initial financial resources, i.e. they are in the set of preferences of the 1st player. In this case, the 1st player, using his optimal strategy, will achieve his goal, particularly, put the state of the system to its “own” terminal surface. Fig. 3 shows a situation in which the 2nd player, using the non-optimal behavior of the first player at the initial moment of time, put the state of the system to the “own” terminal surface. Figure 4 corresponds to the case when the initial state of the system is on a balance beam. And the players, applying their optimal strategies, “move” along this beam. This “satisfies” both players simultaneously and illustrates the “stability” of the system. At small deviations choosing the implementation of the optimal strategy by the 1st player (see the section on which the round and triangular markers coincided) he will reach his goal, but somewhat later. Fig. 5 shows the acceptable accuracy of the software module DSS “SSDMI” in relation to the results of computational experiments in PTC Mathcad 4. The discrepancy does not exceed 2–6%. The proposed model is the process of predicting the results of CS ICTS LSC means investing. The disadvantage of the model is the fact that the data of the forecast estimate obtained through the DSS at the selection investing strategies in CS means do not always coincide with the actual data.

In the course of computational experiments and practical data approbation [15, 16] it was established that the proposed model allows adequately to describe the dependent motions by means of bilinear functions. This provides an effective tool for the participants of the investment process in the CS ICTS LSC means. In comparison with existing models, the proposed solution improves the efficiency and predictability for the investor by an average of 11–15% [8, 9, 11, 17, 18].

CONCLUSIONS

There is proposed a model for the decisions support system of the financing process in the information and cyber security means of the LSC transport, in conditions of active counteraction to the attacking side. The model differs from existing ones by solving a bilinear differential quality game with several terminal surfaces.

The scientific novelty of the results obtained in the article is that for the first time there was considered a new class of bilinear differential games that allowed adequately to describe the process and to find the optimal

financing strategies by the cyber security means protection side. The solution was carried out on the example of optimizing the financial components of the strategies for protecting the information and communication systems of the LSC transport at any parameters ratio describing the financing process, no matter how financially acts the party which tries to hack the security perimeters was. A special feature of this approach was the use of a solution based on a bilinear differential quality game with several terminal surfaces.

The practical significance of the results is that there was developed a module in the RadStudio programming environment for the decision support system – SSDMI. In “SSDMI” module there is implemented the proposed model, based on the application of methods of the theory of differential games. The developed module, allows to reduce the discrepancies between the forecast data and the real return from investing in CS means. The solution allows to obtain optimal financing strategies by the protection side of cyber security means for ICTS of LSC transport. The software implementation of the DSS module allows to choose the optimal financial component of the protection side strategy at any parameters ratio that describe the financing process, no matter how financially the second party acts, trying to hack the security perimeters.

Further perspectives for the development of this research are the transfer of accumulated experience to the real practice of optimizing investment policy in protected LSC in Ukraine and the Republic of Kazakhstan.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the grant research on scientific and technical projects for 2018-2020 of the Republic of Kazakhstan, registration number AP05132723 “Development of adaptive expert systems in the field of cyber security of critically important information objects”.

REFERENCES

1. Manshaei M. H., Zhu Q., Alpcan T. et al. Game theory meets network security and privacy, *ACM Computing Surveys*, 2013, Vol. 45, No. 3, pp. 1–39. DOI: 10.1145/2480741.2480742
2. Grossklags J., Christin N., Chuang J. *Secure or insure?: a game-theoretic analysis of information security games*, 17th international conference on World Wide Web, Beijing, China, 21 – 25 April 2008 : proceedings. New York, ACM, 2008. pp. 209–218. DOI:10.1145/1367497.1367526
3. Cavusoglu H., Mishra B., Raghunathan S. A model for evaluating IT security investments, *Communications of the ACM*, 2004, Vol. 47, No. 7, pp. 87–92.
4. Fielder A., Panaousis E., Malacaria P. et al. Decision support approaches for cyber security investment, *Decision Support Systems*, 2016, Vol. 86, pp. 13–23. DOI: org/10.1016/j.dss.2016.02.012
5. Meland P. H., Tondel I. A., Solhaug B. Mitigating risk with cyberinsurance, *IEEE Security & Privacy*, 2015, No. 13(6), pp. 38–43. DOI: 10.1109/MSP.2015.137
6. Malyukov V. P. A differential game of quality for two groups of objects, *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1991, Vol. 55, No. 5, pp. 596–606.

7. Lavrent'ev A.V., Zjazin V. P. O primeneniі metodov teorii igr dlja reshenija zadach komp'juternoj bezopasnosti, *Bezopasnost' informacionnyh tehnologij*, 2013, No. 3, pp. 19–24.
8. Bykov A. Ju., Altuhov N. O., Sosenko A. S. Zadacha vybora sredstv zashhity informacii v avtomatizirovannyh sistemah na osnove modeli antagonistscheskoj igry, *Inzhenernyj vestnik*, 2014, No. 4, pp. 525–542.
9. Basalova G. V., Sychugov A. A. Primenenie metodov teorii igr dlja optimizacii vybora sredstv zashhity informacii, *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Tehnicheskie nauki*, 2016, No. 11(1), pp. 122–128.
10. Fielder A., Panaousis E., Malacaria P. et al. Game theory meets information security management, *IFIP International Information Security Conference*, Marrakech, Morocco, 2–4 June 2014 : proceedings, Berlin, Springer, 2014, pp. 15–29. DOI: 10.1007/978-3-642-55415-5_2
11. Zarkumova R. N. Primenenie metodov teorii igr pri vybere sredstva jeffektivnoj zashhity, *Sbornik nauchnyh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta*, 2009, No. 4, pp. 41–46.
12. Gao X., Zhong W., Mei S. A game-theoretic analysis of information sharing and security investment for complementary firms, *Journal of the Operational Research Society*, 2014, Vol. 65, No. 11, pp. 1682–1691. DOI: 10.1057/jors.2013.13
13. Lakhno V. A. Model' intellektual'noj sistemy upravlenija gorodskimi avtobusnymi perevozkami, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 2, pp. 119–127. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-2-15
14. Malyukov V. P. Discrete-approximation method for solving a bilinear differential game, *Cybernetics and Systems Analysis*, 1993, Vol. 29, No. 6, pp. 879 – 888.
15. Lakhno V., Malyukov V., Gerasymchuk N. et al. Development of the decision making support system to control a procedure of financial investment, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 6, No. 3, pp. 24–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.119259
16. Lakhno V. A. Development of a support system for managing the cyber security, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 109–116. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-12
17. Smeraldi F., Malacaria P. How to spend it: optimal investment for cyber security, *1st International Workshop on Agents and CyberSecurity*, Paris, France, 06–08 May 2014 : proceedings, New York, ACM, 2014, pp. 8. DOI: 10.1145/2602945.2602952
18. Tosh D. K., Molloy M., Sengupta S. et al. Cyber-investment and cyber-information exchange decision modeling, *High Performance Computing and Communications IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security (CSS)*, New York, 24–26 August 2015 : proceedings, New York, IEEE, 2015, pp. 1219–1224. DOI: 10.1109/HPCC-CSS-ICSS.2015.264

Received 05.01.2018.

Accepted 24.03.2018.

УДК 004.33(035)

МОДЕЛЬ ФІНАНСУВАННЯ У КІБЕРБЕЗПЕКУ В РАМКАХ СХЕМИ БІЛІНІЙНОЇ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ГРИ ЯКОСТІ

Ахметов Б. Б. – канд. техн. наук, доцент, ректор Каспійського державного університету технологій та інжинірингу ім. Ш. Есенова, Актау, Казахстан.

Лакно В. А. – д-р техн. наук, професор, зав. кафедри кібербезпеки та управління захистом інформаційних систем, Європейський університет, Київ, Україна.

Малюков В. П. – д-р физ.-мат. наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем та математичних дисциплін, європейський університет, Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто актуальну проблему прийняття оптимального рішення щодо фінансування засобів інформаційної та кібербезпеки в умовах активної протидії стороні зламувачів інформаційно-комунікаційних систем логістично-ситуаційного центру транспорту.

Мета роботи – розробка моделі для системи підтримки рішень процесу фінансування в засоби інформаційної та кібербезпеки логістично-ситуаційного центру транспорту, в умовах активної протидії нападникам, що відрізняється від чинних підходів рішенням білінійної диференціальної гри якості з декількома термінальними поверхнями.

Метод. При вирішенні білінійної диференціальної гри якості, що дозволяє адекватно показати сутність розглянутої проблеми, використовувався дискретно-апроксимаційний метод. Метод дозволив не тільки знайти рішення білінійної диференціальної гри якості із залежними рухами, а й виявився ефективним під час програмної реалізації системи підтримки рішень в сфері фінансування засобів інформаційної та кібербезпеки інформаційно-комунікаційних систем захищених логістично-ситуаційних центрів транспорту.

Результати. Розроблена модель дозволяє отримати оптимальні стратегії фінансування стороною захисту засобів кібербезпеки для інформаційно-комунікаційних логістично-ситуаційних центрів транспорту при будь-яких співвідношеннях параметрів, що описують процес фінансування, як би фінансово не діяла сторона, яка намагається подолати периметри захисту.

Висновки. У статті вперше розглянута модель в рамках схеми білінійної диференціальної гри якості для системи підтримки рішень процесу фінансування засобів кібербезпеки для інформаційно-комунікаційних систем захищених логістично-ситуаційних центрів транспорту. Для таких диференціальних ігор раніше не було розроблено ефективних методів вирішення. У запропонованому рішенні вперше диференціальні рівняння, що задають динаміку взаємодії, описують залежні рухи за допомогою білінійних функцій.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кібербезпека, диференціальна гра, оптимальні стратегії, злом і захист, система підтримки рішень.

УДК 004.33(035)

Ахметов Б. Б. – канд. техн. наук, доцент, ректор Каспийского государственного университета технологий и инжиниринга им. Ш. Есенова, Актау, Казахстан.

Лакно В. А. – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедры кибербезопасности и управления защитой информационных систем, Европейский университет, Киев, Украина.

Малюков В. П. – д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры информационных систем и математических дисциплин, Европейский университет, Киев, Украина.

МОДЕЛЬ ФИНАНСИРОВАНИЯ В КИБЕРБЕЗОПАСНОСТЬ В РАМКАХ СХЕМЫ БИЛИНЕЙНОЙ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИГРЫ КАЧЕСТВА

Актуальность. Рассмотрена актуальная проблема принятия оптимального решения по финансированию средств информационной и кибербезопасности в условиях активного противодействия стороне взломщиков информационно-коммуникационных систем логистическо-ситуационного центра транспорта.

Цель работы – разработка модели для системы поддержки решений процесса финансирования в средства информационной и кибербезопасности логистическо-ситуационного центра транспорта, в условиях активного противодействия атакующей стороне, отличающаяся от существующих подходов решением билинейной дифференциальной игры качества с несколькими терминальными поверхностями.

Метод. При решении билинейной дифференциальной игры качества, позволяющей адекватно отразить существо рассматриваемой проблемы, был использован дискретно-аппроксимационный метод. Метод позволил не только найти решение билинейной дифференциальной игры качества с зависимыми движениями, но и оказался эффективным при программной реализации системы поддержки решений в сфере финансирования средств информационной и кибербезопасности информационно-коммуникационных систем защищенных логистическо-ситуационных центров транспорта.

Результаты. Разработанная модель позволяет получить оптимальные стратегии финансирования стороной защиты средств кибербезопасности для информационно-коммуникационных логистическо-ситуационных центров транспорта при любых соотношениях параметров, описывающих процесс финансирования, как бы финансово не действовала сторона, пытающаяся взломать периметры защиты.

Выводы. В статье впервые рассмотрена модель в рамках схемы билинейной дифференциальной игры качества для системы поддержки решений процесса финансирования средств кибербезопасности для информационно-коммуникационных систем защищенных логистическо-ситуационных центров транспорта. Для таких дифференциальных игр ранее не было разработано эффективных методов решения. В предложенном решении впервые дифференциальные уравнения, задающие динамику взаимодействия, описывают зависимые движения посредством билинейных функций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кибербезопасность, дифференциальная игра, оптимальные стратегии, взлом и защита, система поддержки решений.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Game theory meets network security and privacy / [M. H. Manshaei, Q. Zhu, T. Alpcan, T. Basar, & J. P. Hubaux] // ACM Computing Surveys (CSUR). – 2013. – Т. 45, № 3. – P. 1–39. DOI: 10.1145/2480741.2480742
2. Grossklags J. Secure or insecure?: a game-theoretic analysis of information security games / J. Grossklags, N. Christin, J. Chuang // 17th international conference on World Wide Web, Beijing, China, 21 – 25 April 2008 : Proceedings. – New York : ACM, 2008. – P. 209–218. DOI: 10.1145/1367497.1367526
3. Cavusoglu H. A model for evaluating IT security investments / H. Cavusoglu, B. Mishra, S. Raghunathan // Communications of the ACM. – 2004. – Т. 47, № 7. – P. 87–92.
4. Decision support approaches for cyber security investment / [A. Fielder, E. Panaousis, P. Malacaria et al.] // Decision Support Systems. – 2016. – Vol. 86. – P. 13–23. DOI: org/10.1016/j.dss.2016.02.012
5. Meland P. H. Mitigating risk with cyberinsurance / P. H. Meland, I. A. Tondel, B. Solhaug // IEEE Security & Privacy. – 2015. – Vol. 13, № 6. – P. 38–43. DOI: 10.1109/MSP.2015.137
6. Malyukov V. P. A differential game of quality for two groups of objects / V. P. Malyukov // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. – 1991. – Vol. 55, № 5. – P. 596–606.
7. Лаврентьев А. В. О применении методов теории игр для решения задач компьютерной безопасности / А. В. Лаврентьев, В. П. Зязин // Безопасность информационных технологий. – 2013. – № 3. – С. 19–24.
8. Быков А. Ю. Задача выбора средств защиты информации в автоматизированных системах на основе модели антагонистической игры / А. Ю. Быков, Н. О. Алтухов, А. С. Сосенко // Инженерный вестник. – 2014. – № 4. – С. 525–542.
9. Басалова Г. В. Применение методов теории игр для оптимизации выбора средств защиты информации / Г. В. Басалова, А. А. Сычугов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2016. – № 11(1). – С. 122–128.
10. Game theory meets information security management / [A. Fielder, E. Panaousis, P. Malacaria et al.] // IFIP International Information Security Conference, Marrakech, Morocco, 2–4 June 2014 : Proceedings. – Berlin : Springer, 2014. – P. 15–29. DOI:10.1007/978-3-642-55415-5_2
11. Заркумова Р. Н. Применение методов теории игр при выборе средства эффективной защиты / Р. Н. Заркумова // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 41–46.
12. Gao X. A game-theoretic analysis of information sharing and security investment for complementary firms / X. Gao, W. Zhong, S. Mei // Journal of the Operational Research Society. – 2014. – Т. 65, № 11. – P. 1682–1691. DOI:10.1057/jors.2013.13
13. Ляхно В. А. Модель интеллектуальной системы управления городскими автобусными перевозками / В. А. Ляхно // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 2. – С. 119–127. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-2-15
14. Malyukov V. P. Discrete-approximation method for solving a bilinear differential game / V. P. Malyukov // Cybernetics and Systems Analysis. – 1993. – Vol. 29, № 6. – P. 879–888.
15. Development of the decision making support system to control a procedure of financial investment / [V. Lakhno, V. Malyukov, N. Gerasymchuk et al.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 6, № 3. – P. 34–41. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.119259
16. Lakhno V. A. Development of a support system for managing the cyber security / V. A. Lakhno // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2017. – № 2. – P. 109–116. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-12
17. Smeraldi F. How to spend it: optimal investment for cyber security / F. Smeraldi, P. Malacaria // 1st International Workshop on Agents and CyberSecurity, Paris, France, 06–08 May 2014 : Proceedings. – New York : ACM, 2014. – P. 8. DOI: 10.1145/2602945.2602952
18. Cyber-investment and cyber-information exchange decision modeling / [D. K. Tosh, M. Molloy, S. Sengupta et al.] // High Performance Computing and Communications IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security (CSS), New York, 24–26 August 2015 : Proceedings. – New York : IEEE, 2015. – P. 1219–1224. DOI: 10.1109/HPCC-CSS-ICSS.2015.264

SYSTEM FOR WEB RESOURCES CONTENT STRUCTURING AND RECOGNIZING WITH THE MACHINE LEARNING ELEMENTS

Dyvak M. P. – Dr.Sc., Professor, Dean of the Faculty of Computer Information Technology, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

Kovbasistyi A. V. – Post-graduate student at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

Melnyk A. M. – PhD, Associate Professor at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

Turchyn L. Y. – PhD, Associate Professor at the Business, Trade and Marketing Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

Martsenyuk Y. O. – PhD, Associate Professor at the Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

ABSTRACT

Context. A large number of web resources of different organizations requires checking of relevance and correctness of the content, in particular, concerning characteristics of the organization, staff, etc. For this, it is necessary to develop a system of the automated content analysis. This task causes the need to develop a method and software for structuring and recognizing of web resources content. Existing parsing systems do not provide solving of the specified task, since they do not contain elements of machine learning. The object of the research is the process of automated analysis of the web resources content.

Objective. The goal of the work is the creation of the system for web resources content structuring and recognizing.

Method. The system of structuring and recognizing of text content of web resources with elements of machine learning is considered. Models of the system functioning are proposed. The architecture for realizing of software system for structuring and recognizing of text content of web resources is developed. Example of implementation of the model of developed system for structuring, recognizing and revealing of outdated and incorrect information about personnel on the web resource of educational institution is given.

Results. The developed software may be used by support services in order to update and correct the information content.

Conclusions. The system of structuring and recognizing of content of web resources with the machine learning elements has been considered. The proposed system compared with the known ones, ensures automated content structuring, recognizing of outdated, non-relevant or wrong information. Represented example of the structuring and recognizing of outdated and incorrect information on the website of educational institution confirms the effectiveness of the proposed system.

KEYWORDS: Content analysis, parsing, machine learning.

NOMENCLATURE

Pr O is a parent element and the attribute;

Id_Type is an identifier of type which allows to improve the belonging of an object to a group that already has more common characteristics than *Dsc* characteristic;

O_Phr is a characteristic of the object analyzed, allows different linguistic representation in the form of phrases;

O_Frm is a word and that define specific characteristics presented in word forms;

O_Bs is the words and their bases;

IdLg is an identifier of language implementation;

IdBs is an identifier of words base;

WBase is a base of the word;

IdFm is an identifier of words form;

WForm is a form of words;

IdO is an identifier of object;

IdPh is an identifier of features;

Id Pr Bs is an identifier of the parental basics of the object;

KDrO is a set of key characteristics;

IdPg is an identifier of the analyzed web page;

IdO is an identifier of the analyzed object;

Id_TypeE is a type of sample characteristics.

INTRODUCTION

Structuring and recognizing of text information is one of the areas of intelligent information systems. The main component of such systems is machine learning [1].

Machine learning is a process in which a system processes a large number of examples, detects patterns and uses them to predict the characteristics of new data.

Machine learning deprives the programmer of the need to “explain in details” to the computer how to solve the problem. Instead, the computer learns to find a solution on its own [2].

In this paper, the system for structuring and recognizing of web resource content, which includes the elements of machine learning, is proposed. This system can be used for identification of incorrect and outdated information on websites.

The object of study is the process of automated analysis of web resources content.

The subject of study is the system for web resources content structuring and recognizing.

The purpose of the work is the development of method and software for web resources content structuring and recognizing using machine learning elements.

1 PROBLEM STATEMENT

Let us consider a system that performs searching, structuring and recognizing of text information on web resources, recording to a database and comparing it.

The processed object of this system is the input data in the form of text information. The structure of such information is represented in the form of tree-like relations.

Therefore, the objects that are used to analyze the relevance of their content are modeled using following structure for machine learning:

$$O_Dsc = \langle IdO, PrO, Id_Type, Dsc \rangle, \quad (1)$$

which includes the object identifiers IdO , parent element identifiers PrO and the attribute Id_Type that allows to highlight the belonging of an object to a certain group that already has more common characteristics than Dsc characteristic. At this, general object differs from particular ones by the absence of parent element, for which, $PrO = NULL$.

Each characteristic of the analyzed object allows different linguistic representation in the form of phrases O_Phr . Words that define specific characteristics, are represented by phrases O_Frm and by their bases O_Bs . Phrases are used to represent the concepts to users, and bases are used for automatic identification of equivalence of language representations between analyzed data and reference data. The attributes of introduced notions can be grouped into the following structures for machine learning:

$$O_Bs = \langle IdLg, IdBs, WBase \rangle, \quad (2)$$

$$O_Frm = \langle IdLg, IdFm, IdBs, WForm \rangle, \quad (3)$$

$$O_Phr = \langle IdCn, IdLg, IdPh, IdBs, IdFm, IdPrBs \rangle. \quad (4)$$

Thus, the input data for system for web resources content structuring and recognizing functionality is represented by the set of tuples (1)–(4).

As a result of transformation of given structures, we obtain a tree-like structure in such form:

$$O_Dsc = \langle IdO, Dsc \rangle, \quad (5)$$

where O_Dsc is resulting set of text structures, the relevance of content for which is established.

The relevance of obtained results of tree-like structures transformation depends on completeness of available content representation in existing databases that are the basis for comparison. Thus, in the content analysis process, the main database must be renewed using machine learning tools. The problem of defining of indicators of content representation completeness in existing databases is beyond the scope of research represented in the paper.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Machine learning can appear in many guises. We now discuss a number of applications, the types of data they deal with, and finally, we formalize the problems in a

somewhat more stylized fashion. The latter is key if we want to avoid reinventing the wheel for every new application. Instead, much of the art of machine learning is to reduce a range of fairly disparate problems to a set of fairly narrow prototypes. Much of the science of machine learning is then to solve those problems and provide good guarantees for the solutions [4, 5].

Machine learning algorithms are organized into taxonomy, based on the desired outcome of the algorithm. Common algorithm types include [6]:

- Supervised learning – where the algorithm generates a function that maps inputs to desired outputs. One standard formulation of the supervised learning task is the classification problem: the learner is required to learn (to approximate the behavior of) a function which maps a vector into one of several classes by looking at several input-output examples of the function.

- Unsupervised learning – which models a set of inputs: labeled examples are not available.

- Semi-supervised learning - which combines both labeled and unlabeled examples to generate an appropriate function or classifier.

- Reinforcement learning – where the algorithm learns a policy of how to act given an observation of the world. Every action has some impact in the environment, and the environment provides feedback that guides the learning algorithm.

- Transduction – similar to supervised learning, but does not explicitly construct a function: instead, tries to predict new outputs based on training inputs, training outputs, and new inputs.

- Learning to learn – where the algorithm learns its own inductive bias based on previous experience.

The performance and computational analysis of machine learning algorithms is a branch of statistics known as computational learning theory. Machine learning is about designing algorithms that allow a computer to learn. Learning is not necessarily involves consciousness but learning is a matter of finding statistical regularities or other patterns in the data. Thus, many machine learning algorithms will barely resemble how human might approach a learning task. However, learning algorithms can give insight into the relative difficulty of learning in different environments [6].

The components of machine learning tools provide the ability of software systems to analyze automatically the text information in order to structure it, determine incorrect and wrong information [5].

Especially important is to develop the machine-adapted procedures for structuring the text information published on the web resources. Automated analysis and structuring of the web resources content makes it possible to solve complex applied problems in economy, ecology, medicine and more [7, 8].

Today, there are tools that can solve these problems to some extent.

In the paper [9, 10], the systems that allow parsing content of the entire website as well as its particular pages, obtaining data from dynamic pages and uploading

information in the appropriate format for its comparison are considered.

All these systems have the main drawback – they do not deal with the machine learning.

3 MATERIALS AND METHODS

The characteristics of specific object are understood as tree-like system of meaningful notions (concepts) that describe its certain meaningful properties. Some separated typical characteristics for determination of its belonging to a particular group and generalized characteristics for the whole object are included for this.

Let input content of web resource is represented in the form of tree-like structures (1)–(4). Description of the main information structures is represented in Fig. 1.

For comparison of analyzed characteristics values and their corresponding reference data, it is necessary to analyze the information represented on corresponding web pages [11].

The structure of description of information about analyzed objects is unknown a priori and may vary depending on the subject, content and technical realization of these websites. It is expedient that information on websites must be structured, not just divided into blocks or paragraphs [12]. This requirement can significantly simplify the content relevance analyzing process. In this case, structuring means the representation of information in the form of defined structures.

To analyze information about a particular object, the set of key characteristics $KDrO$ is formed. To support the analysis of the web pages content, the following auxiliary structure AS was created [13, 14]:

$$AS = \langle IdPg, IdO, IdIt, IdBs, IdFm, IdPrBs \rangle, \quad (6)$$

During analysis of HTML code of next web page of specialized website, its identifier is set:

$$CurPgId := \max(\pi_{IdLPg}(BF)) + 1, \quad (7)$$

Then, we distinguish the elements $LSTIt$ of corresponding characteristics that fill corresponding tags. These elements are used further for comparison with the elements of reference characteristics of objects OE_Dsc of specific database. It is described by the following structure:

$$OE_Dsc = \langle IdO, PrO, Id_TypeE, DscE \rangle, \quad (8)$$

Let $Wrd_k(ItPg, Lst)$ is some k -th characteristic distinguished from the corresponding object $ItPg, Lst$. In this case, machine learning procedure is described by such structure:

$$BsWrd = \pi_{Dsc}(\sigma_{Dsc=Dsc(Wrd_k(ItPg, Lst))}(O_Dsc, OE_Dsc)), \quad (9)$$

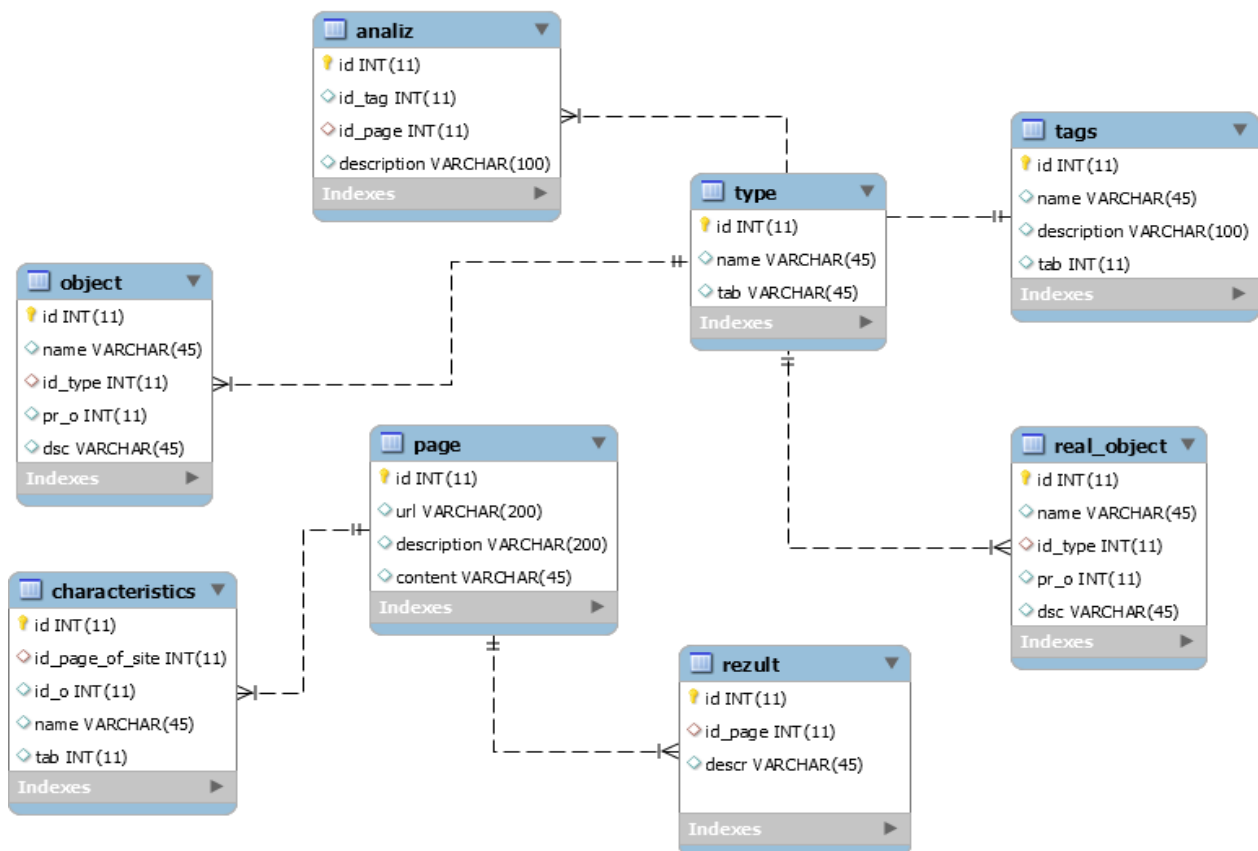


Figure 1 – Structure of the information processing and storage subsystem for the program of detecting irrelevant and inaccurate information on web resources and comparison with the existing database

If this characteristic coincides with relevant information, then its O_Dsc coincides with the corresponding relevant value. If values of these corresponding characteristics do not coincide, then the information needs to be updated [15, 16].

Based on the analysis of existing systems for websites content analysis, we can formulate the basic requirements for automated algorithms for detection of outdated and incorrect information Fig. 2:

- setting of URL filters, in order to not to parse some extra pages;
- setting of parsing depth;
- high quality content downloading;
- multi stream processing and saving of content in various formats.

After the parsing, generated results must be processed in order to provide the representation of information in such form that is suitable for further use. The exact format depends on how, in future, the collected data will be processed. Quite often, from parsed content, RSS-stream is formed using XML Fig. 3. It is convenient for using the data without rewriting procedure.

Sometimes, the result of parsing is saved into CSV-file, because this text format is very simple for further processing, easily converted to SQL queries and able to work with in Excel. In special cases, it is needed to represent the final data in form of XLS spreadsheets Fig. 4.

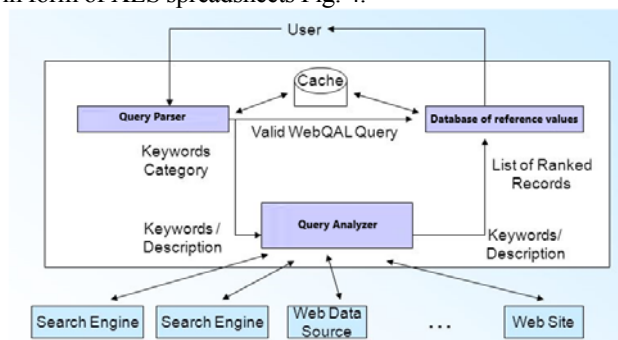


Figure 2 – Architecture of software system for structuring and recognizing of text content of web resources with the machine learning

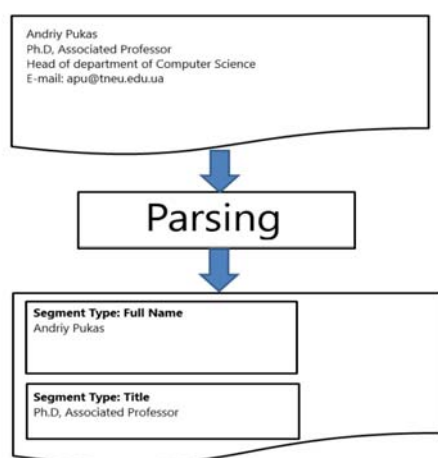


Figure 3 – Schematic illustration of information collecting using parsing, and its storing

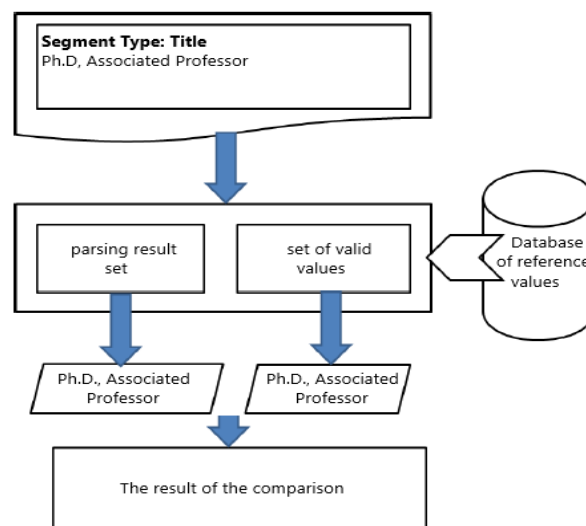


Figure 4 – Schematic illustration of the method for detecting of outdated and incorrect information on web resources and comparison with the existing database

4 EXPERIMENTS

In the process of analysis of text information obtained from web pages, attention must be paid to the process of text normalizing. This will allow to increase the percentage of establishment of equivalence between analyzed and reference.

At the normalization stage, we decrypt some of the abbreviations using corresponding subject dictionaries. In Table 2, for example, the abbreviation “Can. Tech. Sciences” is decrypted as “Candidate of Technical Sciences”. Also, we convert a part of the text into a new form. For example, the human initials that are identified in the parsing process, are transformed as it is shown in Table 1. Some phrases are also transformed into more familiar corresponding phrases that are used in the subject area. For example, “The head of the department” is transformed into a “Head of department”, as it is shown in Table 2.

Table 1 – Normalization of text information

Input	Output	Type
Can. Tech. Sciences	Candidate of Technical Sciences	Degree
ANDRIY PUKAS	Andriy Pukas	Name
The head of the department	Head of department	Staff

Table 2 – Normalization of text information

Term (Full Form/word)	Abbreviation
Doctor of Philosophy	Ph.D., PhD
Master of Science	M.S., MS, MSc
Bachelor of Computer Application	BCA, B.C.A.

5 RESULTS

Let us consider, in more details, developed system for structuring and recognizing of outdated and incorrect information on the example of the Faculty of Computer Information Technologies of Ternopil National Economic University website (staff information page) Fig. 5.

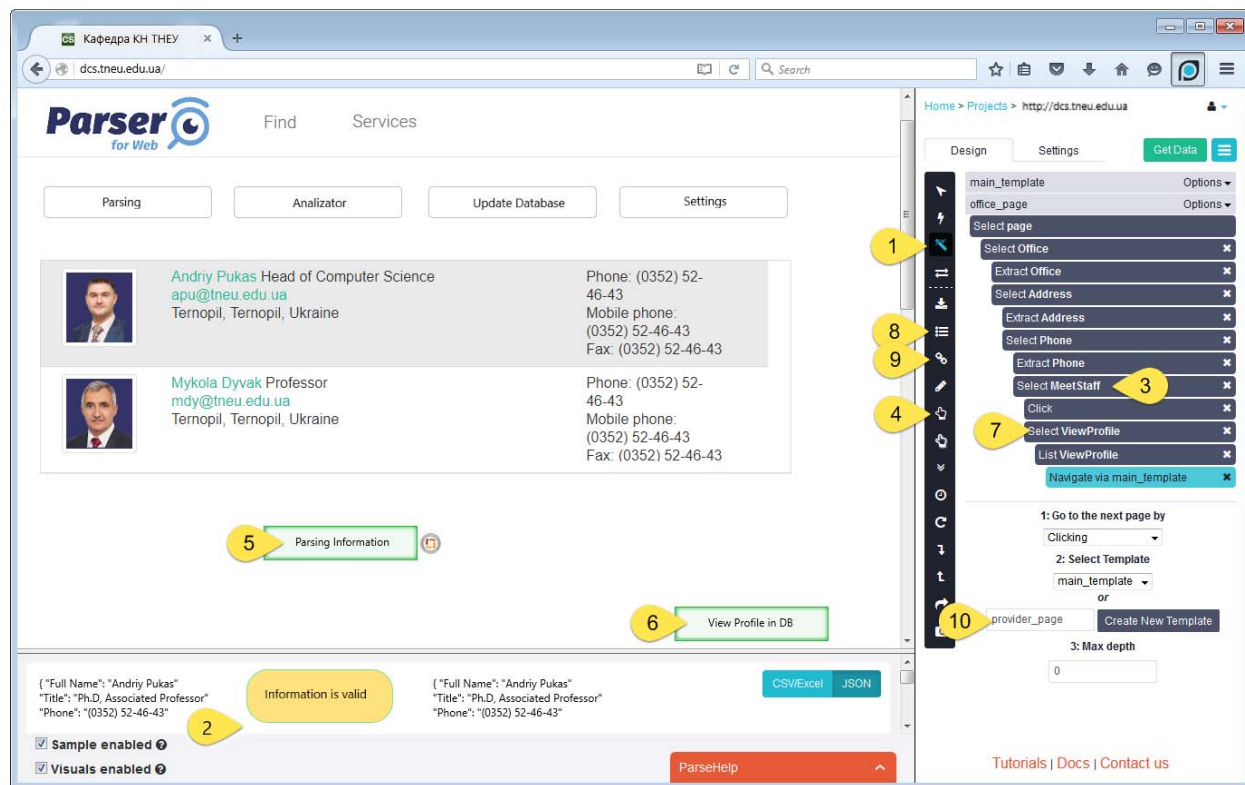


Figure 5 – Example of the structuring and recognizing of outdated and incorrect information on the website of educational institution

The lifecycle of the system includes the following stages:

- Choosing a web page or the entire website.
- Checking the validity and relevance of information.
- Selecting object.
- Selecting object attributes.
- Parsing the content of a web page or a website.
- Saving parsing results into database.
- Viewing of selected profile.
- Validation of data with the possibility of updating in a database.
- Comparison of data obtained from the website and data from the organization's database.
- In case of obtaining of insufficient results, we supplement the rules (parsing, connecting dictionaries).

6 DISCUSSION

Thus, created system for web resources content structuring and recognizing unlike existing ones, contains elements of machine learning. At the same time, the system was built based on parsing algorithms. Similar of them are used in known systems: DataCol, Sjs-parser program system, Content Downloader software system.

The advantage of proposed system is also its cross-platformism. It means that description language of content structure is universal. Realization of the system is adopted for using with different types of relational database management system. Multiple examples of system applying one of which is represented above, showed high performance in recognition, structuring and analysis of content on different types of web resources.

At the same time, developed system has some disadvantages. In particular, the presence of machine learning elements allows to expand the capabilities of the main database which is used for the content analysis, which increases the completeness of content coverage. But, on the other hand, the presence of this element at the same time reduces the reliability of the recognition results and establishment of relevance between analyzed content and basic one.

The development of this work is advisable to be directed into the research of indicators of completeness of content representation in existing databases. And in cases of application of machine learning elements – into determining the relevance of representation of the content structure elements characteristics.

CONCLUSION

The problem of structuring and recognizing of content of web resources with the machine learning elements has been considered.

Scientific novelty of obtained result consists in creation of mathematical tools of system for structuring and recognizing of content of web resources with the machine learning elements. Its main difference is the presence of machine learning components. The proposed system compared with the known ones, due to the above mentioned fact, ensures automated content structuring, recognition of outdated, non-reliable or wrong information. Represented example confirms the effectiveness of the proposed system.

Practical significance of obtained result consists in developing of software that may be used by support services in order to update and correct the content information. The software was develop based on the algorithms that execute the following functions: setting of URL filters, in order to not to

parse some extra pages; setting of parsing depth; high quality content downloading; multi stream processing and saving of content in various formats.

Prospects for further research are extension of functional possibilities of the systems in the way of use of neural networks elements for machine learning and increasing the quality of web resources content structuring.

REFERENCES

1. Abernethy J., Bartlett P., Rakhlin A., Tewari A. Optimal strategies and minimax lower bounds for online convex games, *Proceedings of the Nineteenth Annual Conference on Computational Learning Theory, COLT 2008, Pittsburgh, PA, USA, June 22–25, 2008*, pp. 1–15. DOI: 10.1007/11776420
2. Aone C., Bennett S. W. Applying machine learning to anaphora resolution, *Connectionist, statistical and symbolic approaches to learning for natural language processing*. Berlin, Springer-Verlag, 1996, pp. 302–314. DOI: 10.1007/3-540-60925-3_55
3. Ayodele T. O. Types of machine learning algorithms in New Advances in Machine Learning. Croatia, Rijeka, InTech, 2010, pp. 19–48. DOI: 10.5772/9385
4. Barber D., Bartlett P., Bousquet O., Mendelson S. Bayesian reasoning and machine learning, *Local rademacher complexities. Annals of Statistics*, 2005, Vol. 33, Issue. 4, pp. 1497–1537. DOI: 10.1145/2636805.2636813
5. Bengio Y. Learning deep architectures for AI *Foundations and Trends in Machine Learning*, 2009, Vol. 2, Issue 1, pp. 1–127. DOI: 10.1561/22000000006
6. Gerbic P., Stacey E. A Purposive approach to content analysis: designing analytical frameworks, *Internet and Higher Education*, 2005, pp. 845–859. DOI: 10.1016/j.iheduc.2004.12.003
7. Types of Machine Learning Algorithms [Electronic resource]. Access mode : http://cdn.intechopen.com/pdfs/10694/InTech-Types_of_machine_learning_algorithms.pdf
8. Harrington P. Machine Learning in Action. New York, Shelter Island, 2012, P. 66–77.
9. Kovbasistyi A., Melnyk A., Dyvak M., Brych V. et al. Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources, *XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)*. Lviv, 2017, pp. 154–156. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2017.7937555
10. Le Q. V., Ranzato M.-A., Monga R., Devin M. et al. Building high-level features using large scale unsupervised learning [Electronic resource], *International Conference on Machine Learning (ICML)*, 26–31 May 2013, Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6639343/>
11. Mayring P. Qualitative content analysis [Electronic resource], *Forum: Qualitative Social Research*. Access mode : <http://217.160.35.246/fqs-texte/2-00/2-00mayring-e.pdf>
12. Smola A., Viswanathan S. V. N. Introduction to Machine Learning [Electronic resource] : eBook. Cambridge University Press, 2008, P. 234. Access mode : <https://www.kth.se/social/upload/5397442af27654381071d167/chap1.pdf>
13. Tools for parsing in the work of an SEO specialist [Electronic resource]. Access mode: <https://netpeak.net/ru/blog/instrumenty-dlya-parsinga-v-rabote-seo-spetsialista/>.
14. Weare C., Lin W. Y. Content Analysis of the World Wide Web: Opportunities and Challenges, *Social Science Computer Review*, 2002, Vol. 18, P. 272. DOI: 10.1177/089443930001800304
15. Witten Ian H., Eibe Frank, Mark Hal Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques [Electronic resource], [3rd Edition.]. San Mateo, Morgan Kaufmann, 2011. Access mode: <https://www.elsevier.com/books/data-mining-practical-machine-learning-tools-and-techniques/witten/978-0-12-374856-0>
16. Xu Lin, Holger H. Hoos, Kevin Leyton-Brown Hydra Automatically configuring algorithms selection, *In Twenty-Fourth Conference of the Association for the Advancement of Artificial Intelligence*, 2010, pp. 210–216.

Received 25.06.2018.

Accepted 31.07.2018.

УДК 004.774

СИСТЕМА СТРУКТУРУВАННЯ ТА РОЗПІЗНАВАННЯ КОНТЕНТУ ВЕБ-РЕСУРСІВ ІЗ ЕЛЕМЕНТАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Дивак М. П. – д-р техн. наук, професор, декан факультету комп'ютерних інформаційних технологій Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

Ковбасистий А. В. – аспірант кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

Мельник А. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

Турчин Л. Я. – канд. екон. наук, доцент кафедри підприємництва, торгівлі та маркетингу Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

Марценюк Є. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Наявність великої кількості веб-ресурсів різних організацій вимагає перевірки актуальності та достовірності контенту, зокрема, який стосується характеристик організації, персоналу і т.д. Для цього необхідно розробити систему автоматизованого аналізу контенту. Зазначена задача породжує потребу у розробці методу та програмного забезпечення для структурування та розпізнавання вмісту веб-ресурсів. Існуючі системи парсингу не забезпечують розв'язування зазначеного завдання, оскільки не містять елементів машинного навчання. Об'єктом дослідження є процес автоматизованого аналізу вмісту веб-ресурсів.

Мета роботи – створення системи структурування та розпізнавання вмісту веб-ресурсів з елементами машинного навчання.

Метод. Розглянута система структурування та розпізнавання текстового вмісту веб-ресурсів із елементами машинного навчання. Запропоновані моделі функціонування системи. Розроблено архітектуру для реалізації програмної системи для структурування та розпізнавання текстового вмісту веб-ресурсів. Наведено приклад реалізації моделі розробленої системи для структурування, визнання та виявлення застарілих та невірних відомостей про персонал на веб-ресурсі навчального закладу.

Результати. Розроблений формалізований опис елементів машинного навчання та на його основі програмне забезпечення може використовуватися службою підтримки для оновлення та виправлення контенту веб-ресурсів різних організацій.

Висновки. Розглянута система структурування та розпізнавання вмісту веб-ресурсів із елементами машинного навчання. Пропонована система в порівнянні з відомими, забезпечує автоматичне структурування вмісту, визнання застарілої, недостовірної або неправильної інформації. Представлений приклад структурування та визнання застарілої та некоректної інформації на веб-сайті навчального закладу підтверджує ефективність запропонованої системи.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аналіз контенту, парсинг, машинне навчання.

СИСТЕМА СТРУКТУРИРОВАНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ КОНТЕНТА WEB-РЕСУРСОВ С ЭЛЕМЕНТАМИ

Дывак Н. П. – д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных информационных технологий Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

Ковбасистый А. В. – аспирант кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

Мельник А. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

Турчин Л. Я. – канд. экон. наук, доцент кафедры предпринимательства, торговли и маркетинга Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

Марценюк Е. А. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Наличие большого количества веб-ресурсов различных организаций требует проверки актуальности и достоверности контента, в частности, касающийся характеристик организации, персонала и т.д. Для этого необходимо разработать систему автоматизированного анализа контента. Указанная задача порождает потребность в разработке метода и программного обеспечения для структурирования и распознавания содержимого веб-ресурсов. Существующие системы парсинга не обеспечивают решения указанной задачи, поскольку не содержат элементов машинного обучения. Объектом исследования является процесс автоматизированного анализа содержимого веб-ресурсов.

Цель работы – создание системы структурирования и распознавания содержимого веб-ресурсов.

Метод. Рассмотрена система структурирования и распознавания текстового содержимого веб-ресурсов с элементами машинного обучения. Предложены модели функционирования системы. Разработана архитектура для реализации программной системы для структурирования и распознавания текстового содержимого веб-ресурсов. Приведен пример реализации модели разработанной системы для структурирования, выявления устаревших и неверных сведений о персонале на веб-ресурсе учебного заведения.

Результаты. Разработанное программное обеспечение может использоваться службой поддержки для обновления и исправления информационного содержания.

Выводы. Рассмотрена система структурирования и распознавания содержимого веб-ресурсов с элементами машинного обучения. Предлагаемая система по сравнению с известными, обеспечивает автоматическое структурирование содержания, выявления устаревшей, недостоверной или неправильной информации. Представлен пример структурирования и признание устаревшей и некорректной информации на сайте учебного заведения подтверждает эффективность предложенной системы.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анализ контента, парсинг, машинное обучение.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Optimal strategies and minimax lower bounds for online convex games / J. Abernethy, P. Bartlett, A. Rakhlin, A. Tewari // Proceedings of the Nineteenth Annual Conference on Computational Learning Theory, COLT 2008, Pittsburgh, PA, USA, June 22-25. – 2008. – P. 1–15. DOI: 10.1007/11776420
2. Aone C. Applying machine learning to anaphora resolution / C. Aone, S. W. Bennett // Connectionist, statistical and symbolic approaches to learning for natural language processing. – Berlin : Springer-Verlag, 1996. – P. 302–314. DOI: 10.1007/3-540-60925-3_55
3. Ayodele T. O. Types of machine learning algorithms in New Advances in Machine Learning / T. O. Ayodele. – Croatia, Rijeka : InTech, 2010. – P. 19–48. DOI: 10.5772/9385
4. Barber, D. Bayesian reasoning and machine learning / D. Barber, P. Bartlett, O. Bousquet, S. Mendelson // Local rademacher complexities. Annals of Statistics. – 2005. – Vol. 33, Issue 4. – P. 1497–1537. DOI: 10.1145/2636805.2636813
5. Bengio, Y. Learning deep architectures for AI / Y. Bengio // Foundations and Trends in Machine Learning. – 2009. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1–127. DOI: 10.1561/22000000006
6. Gerbic P. A Purposive approach to content analysis: designing analytical frameworks [Text] / P. Gerbic, E. Stacey // Internet and Higher Education. – 2005. – P. 845–859. DOI: 10.1016/j.iheduc.2004.12.003
7. Types of Machine Learning Algorithms [Electronic resource]. – Access mode : http://cdn.intechopen.com/pdfs/10694/InTech-Types_of_machine_learning_algorithms.pdf
8. Harrington P. Machine Learning in Action / P. Harrington. – New York : Shelter Island, 2012. – P. 66–77.
9. Method for detection of non-relevant and wrong information based on content analysis of web resources / [A. Kovbasistyi, A. Melnyk, M. Dyvak et al.] // XIIIth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH). – Lviv, 2017. – P. 154–156. DOI: 10.1109/MEMSTECH.2017.7937555
10. Building high-level features using large scale unsupervised learning [Electronic resource] / [Q. V Le, M.-A Ranzato, R. Monga et al.] // International Conference on Machine Learning (ICML). – 26–31 May 2013. – Access mode : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6639343/>
11. Mayring P. Qualitative content analysis [Electronic resource] / P. Mayring // Forum: Qualitative Social Research. – Access mode : <http://217.160.35.246/fqs-texte/2-00/2-00mayring-e.pdf>
12. Smola A. Introduction to Machine Learning [Electronic resource] : eBook / Alex Smola and S. V. N. Vishwanathan. – Cambridge University Press, 2008. – P. 234. Access mode : <https://www.kth.se/social/upload/5397442af27654381071d167/chap1.pdf>
13. Tools for parsing in the work of an SEO specialist [Electronic resource]. – Access mode: <https://netpeak.net/ru/blog/instrumenty-dlya-parsinga-v-rabote-seo-spetsialista/>
14. Weare C. Content Analysis of the World Wide Web: Opportunities and Challenges / C. Weare, W. Y. Lin // Social Science Computer Review. – 2002. – Vol. 18. – P. 272. DOI: 10.1177/089443930001800304
15. Witten, Ian H. Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques [Electronic resource] / Ian H. Witten, Eibe Frank, Mark Hall – [3rd Edition.]. – San Mateo : Morgan Kaufmann, 2011. – Access mode: <https://www.elsevier.com/books/data-mining-practical-machine-learning-tools-and-techniques/witten/978-0-12-374856-0>
16. Xu Lin Hydra Automatically configuring algorithms selection / Lin Xu Hydra, Holger H. Hoos, Kevin Leyton-Brown // In Twenty-Fourth Conference of the Association for the Advancement of Artificial Intelligence. – 2010. – P. 210–216.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Каменских А. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия.

Тюрин С. Ф. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» Пермского национального исследовательского политехнического университета, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Задача повышения энергоэффективности и надежности систем управления и вычислительной техники по-прежнему остается одной из важнейших в 21-ом веке. Особенно в области аэрокосмической микроэлектроники, где требуется обеспечить устойчивость к воздействию одиночных эффектов, порождаемых заряженными частицами, и одновременно обеспечить минимальное энергопотребление, так как возможности по ее генерации существенно ограничены. При всем этом производительность остается важным параметром для разработчиков электронных устройств. Таким образом, получается сложная оптимизационная задача с варьируемыми переменными – надежности, энергоэффективности и производительности, при существующих производственных ограничениях.

Цель работы – решение оптимизационной задачи синтеза цифровых устройств, способных работать в широком диапазоне температуры и напряжения при ограничениях по надежности и производительности.

Метод. Самосинхронные схемы, обеспечивающие стабильную работу по реальным задержкам, в том числе и при ультранизком напряжении питания, зарекомендовали себя как хорошее решение для указанной выше области применения. Для повышения надежности в критических системах часто используется резервирование, например, тройное модульное резервирование, либо коды Хэмминга для схем с памятью. Однако в самосинхронных схемах применение указанных методов затрудняется высокой избыточностью и вносимой задержкой. Кроме того, стандартная модель Маллера не позволяет учитывать влияние на систему одиночных отказов или сбоев, в результате резервирование приводит к нарушению ключевого свойства самосинхронных схем – полумодулярности. В статье развивается предложенный метод резервирования на транзисторном уровне, который в сочетании с уже хорошо известными методами позволяет получить новые эффективные решения.

Результаты. Разработана модель отказоустойчивых самосинхронных схем, позволяющая аналитически подтверждать принадлежность отказоустойчивой схемы к классу самосинхронных. Предложена методика комбинированного резервирования, позволяющая проводить синтез отказоустойчивых самосинхронных схем с оптимизацией по ключевым параметрам.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило, что только комбинированное резервирование обеспечивает достижение оптимума функций в поставленной задаче. В дальнейшем перспективно расширить объект исследования за счет синхронных и гибридных цифровых устройств.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: энергоэффективность, надежность, отказоустойчивость, самосинхронные схемы, резервирование на транзисторном уровне, комбинированное резервирование.

АББРЕВИАТУРЫ

DVFS – dynamic voltage and frequency scaling;
БМК – базовые матричные кристаллы;
ВБР – вероятность безотказной работы;
МР – мажоритарное резервирование;
НР – схема без резервирования;
ПП – последовательно-параллельный;
РТУ – резервирование на транзисторном уровне;
ССС – самосинхронные схемы;
СССАО – самосинхронные схемы с активной отказоустойчивостью;
СССПО – самосинхронные схемы с пассивной отказоустойчивостью;
ТЭ – элемент толерантный к отказам транзисторов;
ЭН – энергозатраты/надежность.

НОМЕНКЛАТУРА

A, B, C, F – схема цифрового элемента или устройства;

E – энергопотребление;

f – производительность;
 FT – схему отказоустойчивого цифрового элемента или устройства;
 I – индикатор окончания переходных процессов;
 k – допустимая кратность отказов;
 MJ – мажоритарный элемент;
 N – состояние спейсера;
 P – вероятность безотказной работы;
 Q – константная неисправность схемы;
 q – ограничение библиотеки элементов для заданной технологии;
 s – управляющий сигнал в самосинхронных схемах;
 SMA – предикат проверки полумодулярности, заданный на модели Маллера;
 SM_L – класс локально полумодулярных схем;
 t – время переключения схемы;
 t_p – время ремонта;
 U – напряжение питания.

ВВЕДЕНИЕ

Использование методов резервирования в микроэлектронике для таких критических областей примене-

ния как аэрокосмическая отрасль, системы управления ядерными электростанциями, медицинская, военная и т.д. является обязательным условием. Особенно актуальна задача обеспечения отказоустойчивости в космической отрасли, где аппаратура подвергается воздействию радиации, в том числе и тяжелых заряженных частиц. Общее направление развития микроэлектроники для всех производителей заключается в снижении энергопотребления не в ущерб производительности. В том числе и для аппаратуры спутников, которые существенно ограничены возможностями генерации электроэнергии.

Таким образом, на пересечении этих условий появляется актуальная научно-практическая задача, заключающаяся в необходимости одновременно с максимальным снижением энергопотребления обеспечить выполнение всех специальных требований по надежности, производительности. При этом необходимо учитывать возможности доступной элементной базы, библиотеки элементов, технологические ограничения.

Известны и хорошо апробированы методы тройного модульного резервирования и кодирования по Хэммингу. Однако, методы комбинированного резервирования развиты недостаточно, а именно комбинирование методов открывает широкие возможности для решения оптимизационных задач.

Цель работы – решение оптимизационной задачи синтеза цифровых устройств на основе комбинированного резервирования, способных работать в широком диапазоне температуры и напряжения при ограничениях по надежности и производительности.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать модели отказоустойчивых СС-схем;
- провести анализ эффективности методов резервирования;
- разработать методику комбинированного резервирования.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Дано F , заданная графически, набором булевых уравнений, табличным методом и т.д. Получить FT с задачей $E \rightarrow \min$, при ограничениях по $P \geq P_3$, $f \geq f_3$ и $q \leq q_3$. Кроме того, дополнительно необходимо учитывать, что в ряде систем не допускается прерывание работоспособного состояния устройства для его ремонта, в таком случае используют только методы обеспечения пассивной отказоустойчивости (например, мажоритарное резервирование). Для учета этого фактора введем ограничение t_p .

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время основным методом снижения энергопотребления является DVFS [1, 2]. Од-

нако его применение ограничено, так как влияет на надежность (ВБР, помехоустойчивость, устойчивость к радиационным эффектам) [3-6]. При проведении исследования были предложены следующие основные принципы, которые задают направление исследования:

1. В работах [7, 8] показывается, что использование СС-схемы позволило снизить энергопотребление устройств относительно синхронных аналогов. Следовательно, применение СС-схемы следует расширять и на цифровые устройства для критических областей применения.

2. Применение резервирования для повышения надежности всегда увеличивает энергопотребление, но каждый метод резервирования увеличивает его в своей мере. Следовательно, все методы резервирования должны быть аккуратно и достаточно полно оценены и должны использоваться там, где это наиболее эффективно.

3. Научные исследования моделей, методов и технологий цифровых устройств для критических областей применения всегда должны быть практически ориентированными.

4. Использование методов и технологий «Зеленых» энергоэффективных вычислений может обеспечивать снижение энергопотребления, но должно быть учтено их влияние на надежность и другие важные характеристики устройства.

Руководствуясь третьим принципом основным базисом реализации выбраны БМК, которые широко применяются в микроэлектронике специального назначения [9].

Для самосинхронных схем хорошо развиты методы саморемонта и реконфигурации на основе скользящего резервирования [10]. Однако для целого ряда критических областей требуется применение методов обеспечения пассивной отказоустойчивости.

Мажоритарное резервирование один из самых популярных способов обеспечения пассивной отказоустойчивости в цифровых устройствах [11-14], оно широко применяется на самых разных уровнях от целых микропроцессоров до отдельных логических элементов. Однако использование мажоритарирования в проектах СС-устройств проблематично, так как в результате резервирования теряется основное свойство самосинхронных схем – полумодулярность. Более подробно причины этого конфликта рассмотрены в [3]. Таким образом, для корректного синтеза отказоустойчивых СС-устройств необходимо доказать их принадлежность к классу самосинхронных и разработать модель отказоустойчивых СС-схем на основе мажоритарного резервирования.

Для решения задачи оптимизации используется метод градиентной оптимизации [11]. Самосинхронные схемы проектируются с помощью метода двухфазной реализации аperiodического автомата [15]. Проверка полумодулярности и логическое моделирование осуществляется с применением программы БТРАН, разработанной в Институте проблем информатики Российской академии наук [9].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

На основе данных логического моделирования схемы с мажоритарным резервированием был составлен граф

состояний и условия переходов. Ввиду сложности (полный граф содержит свыше 4-х тысяч состояний), на рисунках 1 и 2 представлены графы изо-

морфные исходному с точностью до эквивалентных состояний.

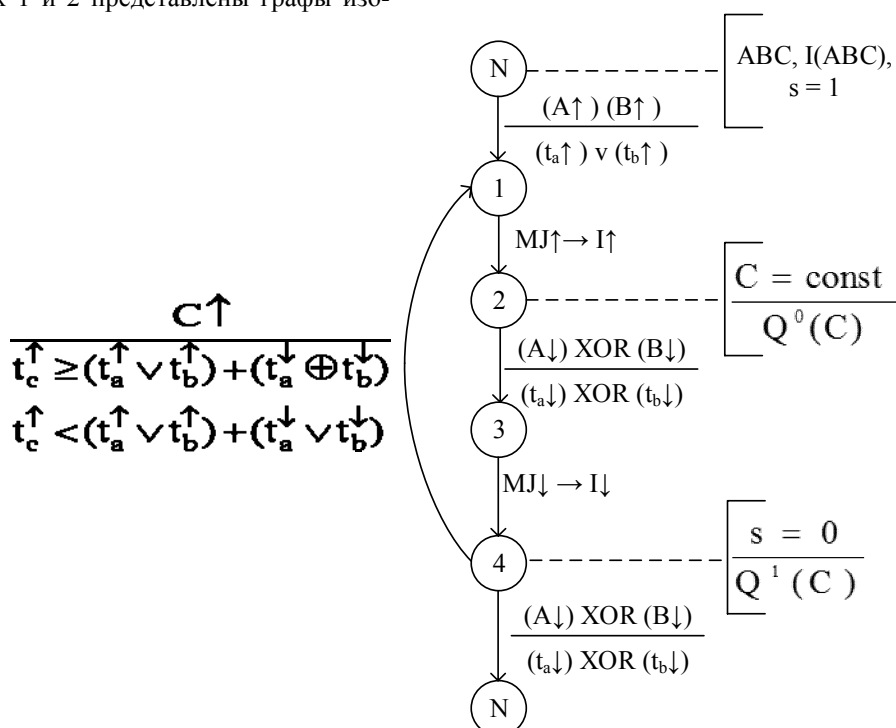


Рисунок 1 – Граф состояний отказоустойчивой СС-схемы при переходе из состояния спейсера в состояние данные, где $\uparrow$ и $\downarrow$ – символы перехода схемы в состояние логической единицы или нуля

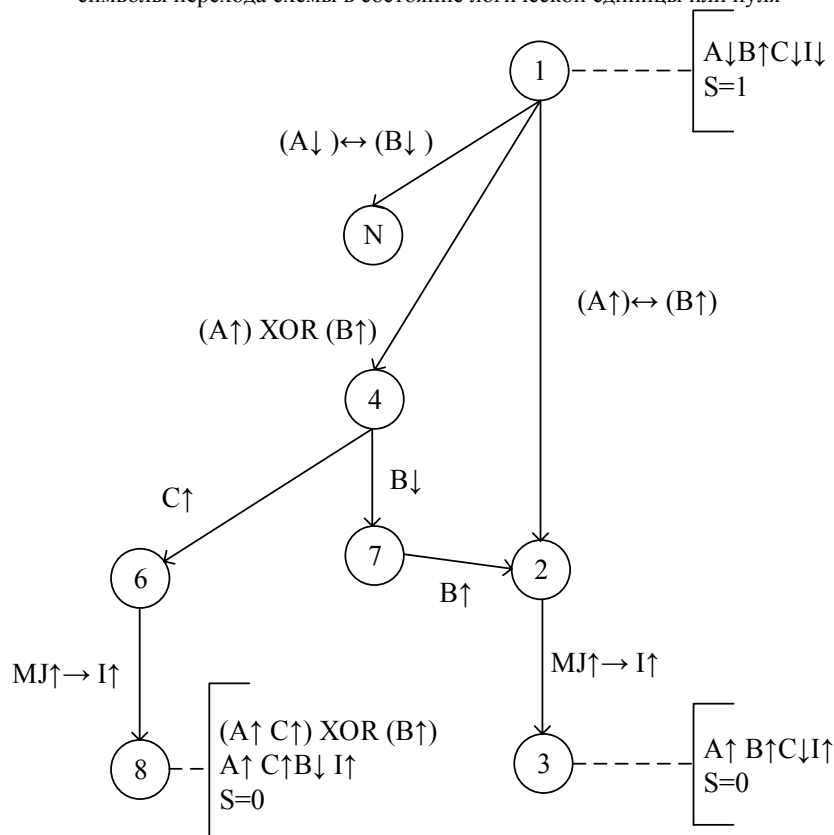


Рисунок 2 – Граф состояний отказоустойчивой СС-схемы при возврате в состояние спейсера

Нарушения полумодулярности связаны с переходом T_{4-1} . Условием этого перехода является наличие двухкратных ошибок. Таким образом, нарушение полумодулярности наблюдается тогда и только тогда, когда кратность неисправности превышает заданную или мажоритарная функция СССПО не монотонна вследствие раздельной подачи входных переменных в подсхемы. При возникновении отказа в не отказоустойчивой СС-схемы также наблюдается нарушение полумодулярности, тоже можно сказать и во втором случае: не допускается не соблюдение дисциплины сигналов.

Существующая модель Маллера не позволяет учитывать отказы и сбои, как часть нормального функционирования системы. Модель отказоустойчивых СС-схем представляет из себя усовершенствованную модель Маллера, в которой выполняются следующие правила:

Правило 1: Схема FT должна принадлежать к классу локально полумодулярных схем:

$$\forall j. [SMA(X^n, Y^j, YB^j, I^j(Y^j, YB^j), S_0)] \Rightarrow \{FT \in SM_L\}, \quad (1)$$

Правило 2: Если FT СССПО с голосованием n -из- m (кратность отказов $k=m-n$), то максимум k подсхем, в которых переход Спейсер→Данные не завершился к моменту возврата $n-k$ подсхем в состояние спейсера, принимаются за неработоспособные (в результате отказа или сбоя), до момента возврата $n>k$ подсхем в состояние спейсера:

$$\begin{aligned} \{(A^n) \uparrow\} \wedge \{(A^{n-k}) \downarrow\} &\Rightarrow [\{Q(A^k)\} \wedge \{(A^k \uparrow \notin T_n)\}], \\ \{(A^n) \uparrow\} \wedge \{(A^n) \downarrow\} &\Rightarrow Q(\emptyset). \end{aligned} \quad (2)$$

Совокупность правил 1–2 и модели Маллера дает модель отказоустойчивых самосинхронных схем.

В соответствии с поставленной задачей необходимо распределить все исследуемые методы обеспечения отказоустойчивости по их эффективности. Для качественного анализа введем комплексные показатели:

Первый показатель позволяет оценить, какие методы надежности позволяют больше снизить энергозатраты и меньше снизить надежность при изменении напряжения питания. Таким образом, получается градиентный показатель ($\mathcal{E}H'$), который отражает приращение (снижение/увеличение) энергозатрат относительно приращения ВБР (3):

$$\mathcal{E}H'_p = \frac{\delta W_f(U)}{\delta P(u, t)}. \quad (3)$$

Методы обеспечения отказоустойчивости распределяются по убыванию показателя (3), приоритет имеют методы, у которых $\mathcal{E}H'$ больше.

Второй показатель позволяет оценить не только приращение энергозатрат относительно приращения надежности, но и сами величины энергозатрат и надежности. Для того чтобы обеспечить возможность сравнения методов обеспечения отказоустойчивости, предлагается показатель (4):

$$\mathcal{E}H(U) = W_F \frac{1}{P(u, t)}. \quad (3)$$

Методы обеспечения отказоустойчивости распределяются по возрастанию показателя (4), приоритет имеют методы, у которых $\mathcal{E}H$ меньше.

В сущности, предложенная методика комбинированного резервирования (рис. 3) позволяет снизить энергопотребление отказоустойчивых устройств за счет применения наиболее эффективных методов резервирования на выделенных участках схемы. Особенностью методики является использование методов «Зеленых» энергоэффективных вычислений [1], таких как DVFS или energy-modulated computing. Если в результате резервирования ВБР и производительность выше заданного минимума, то предлагается снизить напряжение питания. Таким образом достигается оптимальный уровень энергопотребления.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Сравнение проводилось для функционально аналогичных устройств реализованных с применением разных методов обеспечения отказоустойчивости. Рассматривались такие типовые устройства как сумматоры, умножители, регистры, счетчики, ряд комбинационных схем. Для теоретических расчетов надежности использовалась модель Вейбулла-Гнеденко. В качестве материалов взяты модели транзисторов bsim v3.3 соответствующие технологиям производства БМК 1,6 мкм и 180 нм. Результаты получены в САПР NI MultiSim с помощью методов SPICE моделирования, представленных в данном пакете.

Теоретически расчеты надежности и результаты моделирования энергопотребления и производительности, подробно описанные в [16], показали следующее распределение методов обеспечения пассивной отказоустойчивости, рис. 4.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика была апробирована при разработке ППП-порта самосинхронного микропроцессора. Результаты получены на основе моделирования, модели транзисторов аналогичные описанным в разделе «Эксперименты», рис. 5.

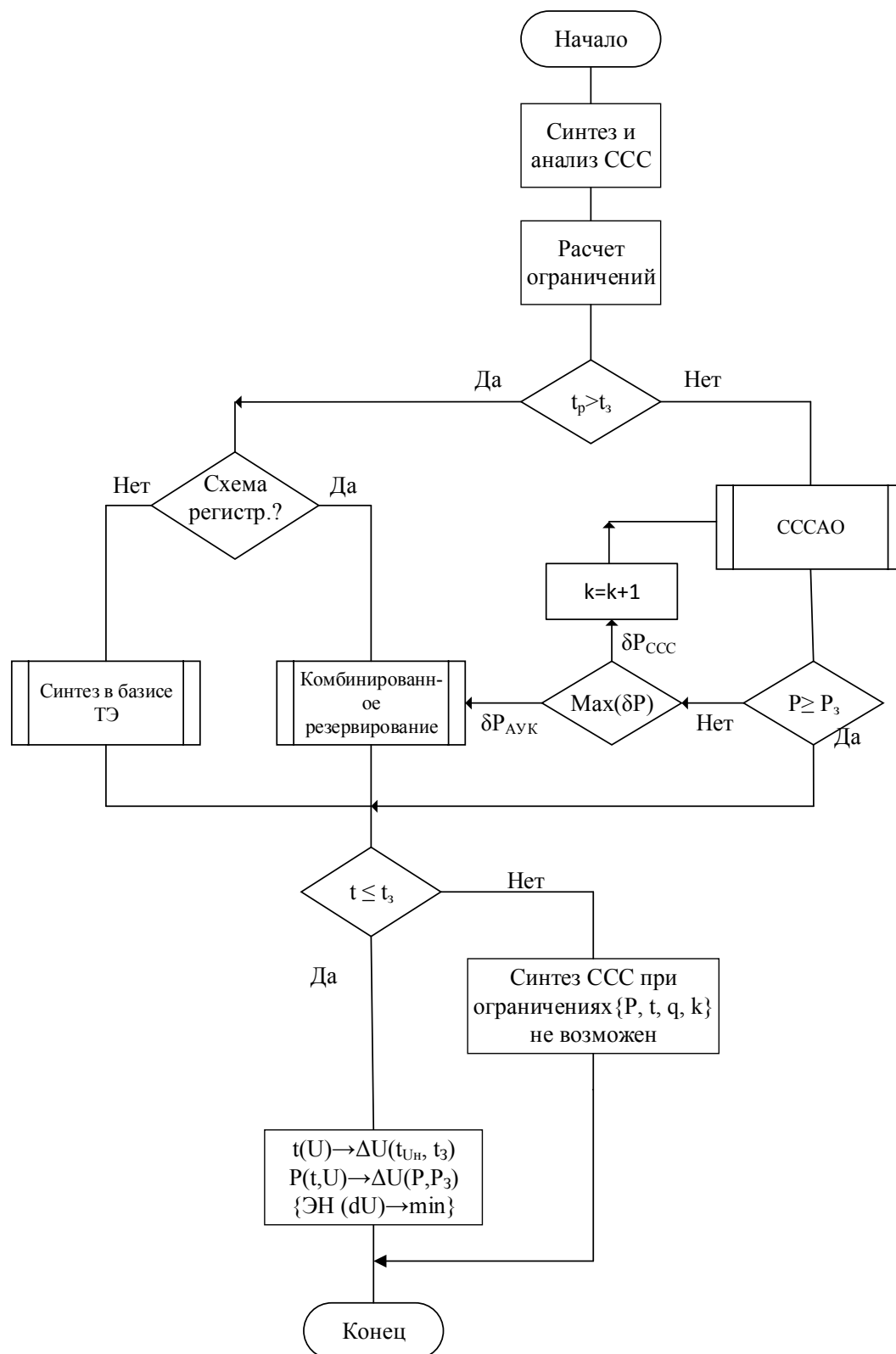


Рисунок 3 – Общая методика комбинированного резервирования

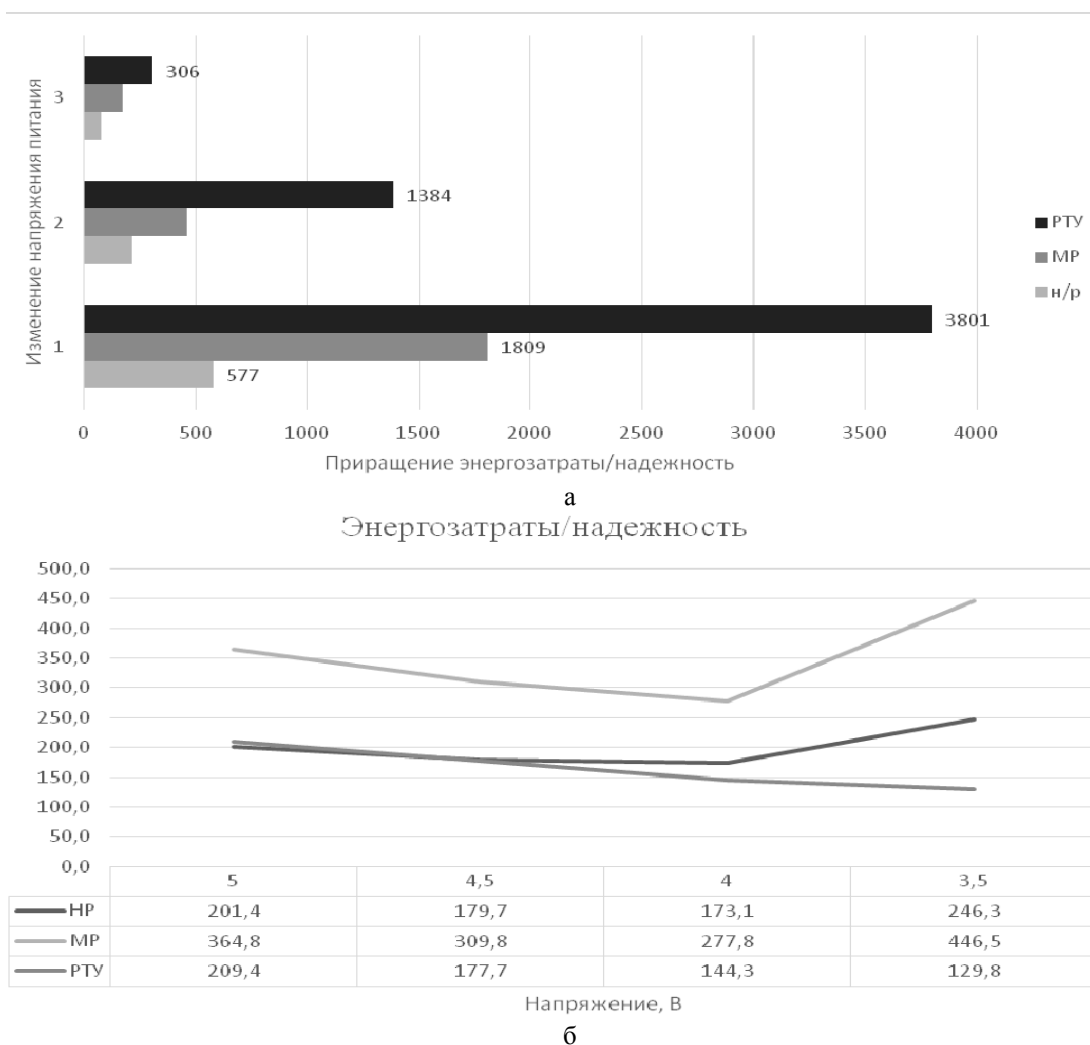


Рисунок 4 – Сравнение методов резервирования по затрату энергозатраты/надежности: а – по формуле (3); б – по формуле (4)

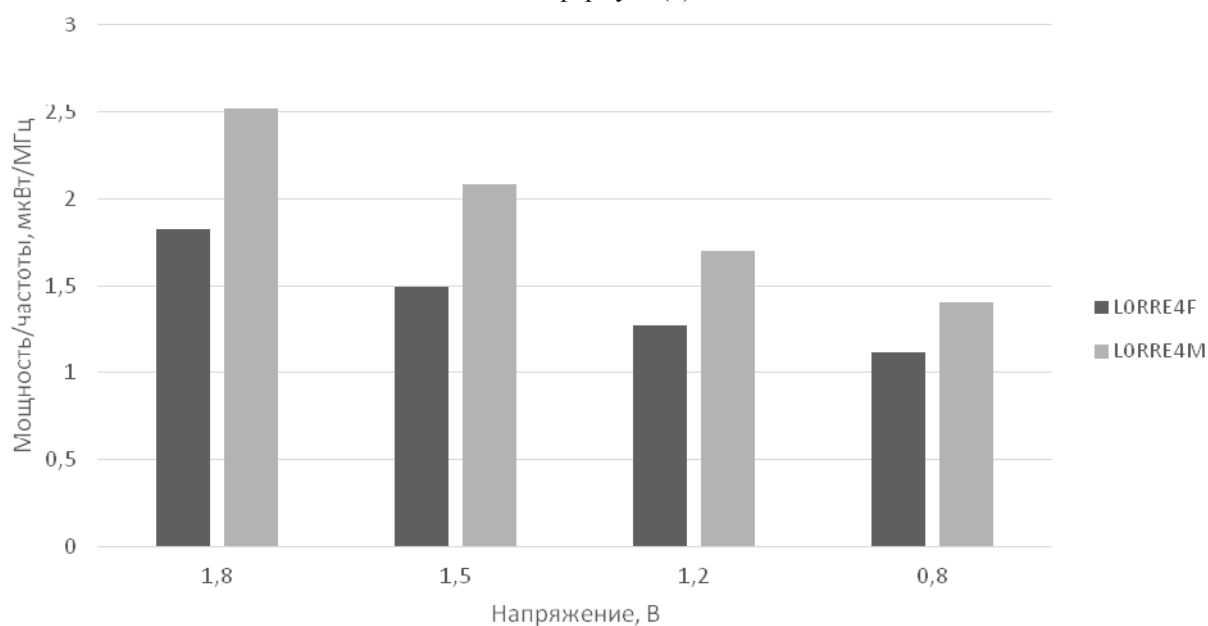


Рисунок 5 – Энергопотребление в расчете на единицу частоты ПП-порта

Последовательно-параллельный порт на основе комбинированного резервирования, основной триггер – LORRE4F, по сравнению с ПП-портом на основе мажоритарного резервирования [17]:

- быстродействие на 3–5% выше;
- мощность на единицу частоты на 25–40% ниже;
- ВБР (при нормальных условиях) выше 1,73 раза;
- аппаратные затраты – для 8-bit регистра в 1.28 раз выше.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Методика позволяет синтезировать отказоустойчивые самосинхронные схемы с учетом множества условий. Достижение результата подтверждается разработкой отказоустойчивого последовательно-параллельного порта самосинхронного микропроцессора. Использование одного метода обеспечения отказоустойчивости было не приемлемо в виду имеющихся ограничений, и только благодаря комбинированию методов обеспечения отказоустойчивости удалось достичь решения поставленной задачи.

Предложенная методика опирается на известные и апробированные методы обеспечения отказоустойчивости, а значит не решает главной задачи – разработки специальных методов для самосинхронной схемотехники, в дальнейшем планируется уделить этому большее внимание.

Можно отметить, что полученные оценки справедливы для методов проектирования самосинхронных схем, в синхронных и смешанных системах результаты могут отличаться. Исследование методов комбинированного резервирования в таких системах является следующей важной задачей.

ВЫВОДЫ

Самосинхронные схемы являются важным направлением развития микроэлектроники. Однако необходима разработка оригинальных методов обеспечения отказоустойчивости самосинхронных схем, так как прямое копирование таких методов из синхронной схемотехники приводит к отрицательным результатам. Исследование показало, что решение поставленной оптимизационной задачи лежит в области комбинирования методов. Для этого были разработаны – модели отказоустойчивых самосинхронных схем, проведен анализ эффективности методов обеспечения пассивной отказоустойчивости и предложена методика комбинированного резервирования, которая и позволяет синтезировать схемы в соответствии с условиями поставленной задачи ($E \rightarrow \min, P \geq P_3, f \geq f_3, q \leq q_3, t_p$)

Снижение энергопотребления отказоустойчивой цифровой аппаратуры остается актуальной задачей. Потребность в энергоэффективных отказоустойчивых устройствах будет в дальнейшем только расти. В дальнейшей работе предполагается больше вни-

мания уделить природе отказов (сбоев), в частности вопросам моделирования радиационной стойкости предложенных решений. Особое внимание в дальнейшем планируется уделить развитию методов обеспечения активной отказоустойчивости СС-схем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Вячеславу Сергеевичу Харченко и коллективу проекта TEMPUS «Green computing and telecommunications» за широкое и плодотворное обсуждение работы, а также Юрию Афанасьевичу Степченкову и коллективу Института проблем информатики Российской академии наук за предоставленные для исследования материалы.

ЛИТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Yakovlev A. Energy-modulated computing/ A. Yakovlev // Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition (DATE). – IEEE. – 2011. – P. 1–6.
2. Chung C. C. A 0.52/1 V fast lock-in ADPLL for supporting dynamic voltage and frequency scaling / C. C. Chung, W. S. Su, C. K. Lo // IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems. – 2016. – Vol. 24, No. 1. – P. 408–412.
3. Каменских А. Н. Проблемы анализа полумодулярности и энергонадежности Отказоустойчивых самосинхронных схем / А. Н. Каменских, Ю. А. Степченков, С. Ф. Тюрин // Электротехника. – 2015. – № 11. – С. 27–32.
4. Mukhopadhyay S. Modeling and estimation of failure probability due to parameter variations in nano-scale SRAMs for yield enhancement / S. Mukhopadhyay, H. Mahmoodi-Meimand, K. Roy // VLSI Circuits, 2004. Digest of Technical Papers. 2004 Symposium on. – IEEE, 2004. – P. 64–67.
5. Mehta N. An ultra-low-energy, variation-tolerant FPGA architecture using component-specific mapping: PhD thesis / Mehta Nikil. – California Institute of Technology, 2012. – P. 122.
6. Ghosh S. Parameter variation tolerance and error resiliency: New design paradigm for the nanoscale era / S. Ghosh, K. Roy // Proceedings of the IEEE. – 2010. – Vol. 98, №. 10. – P. 1718–1751.
7. Базис реализации супер-ЭВМ эксафлопсного класса / [И. А. Соколов, Ю. А. Степченков, Ю. А. Бобков и др.] // Информатика и ее применения. – 2014. – Т. 8, №. 1. – С. 45–70.
8. Kuang, W. Low power operation using self-timed circuits and ultra-low supply voltage / W. Kuang, J. S. Yuan // Microelectronics, The 14th International Conference on 2002-ICM. – IEEE, 2002. – P. 185–188.
9. Библиотека элементов для проектирования самосинхронных полумодулярных микросхем серий 5503/5507 и 5508/5509 / [Ю. А. Степченков, А. Н. Денисов, Ю. Г. Дьяченко и др.]. – М.: ИПИ РАН, 2013. – 391 с. ISBN 978-5-91993-027-3.
10. Аппаратная и структурная организация средств контроля и восстановления в самосинхронном кольцевом канале / [В. И. Варшавский, В. Я. Володарский, В. Б. Мараховский и др.] // Автоматика и вычисл. техника. – 1989. – JS1. – С. 61–68.
11. Kamenskih A. N. Advanced approach to development of energy-aware and naturally reliable computing systems / A. N. Kamenskih, S. F. Tyurin // Proceedings of Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EICon-RusNW), 2015 IEEE NW Russia. – IEEE, 2015. – P. 75–77.

12. An asynchronous cell library for operation in wide-temperature & ionizing-radiation environments / [J. Brady, A. M. Francis, J. Holmes et al.] // Aerospace Conference, 2015 IEEE. – IEEE, 2015. – P. 1–10.
13. The special radiation-hardened processors for new highly informative experiments in space / [O. V. Serdin, A. A. Antonov, A. G. Dubrovsky et al.] // Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing. – 2017. – Vol. 798, No. 1. – P. 012010.
14. Высокопроизводительный микропроцессор 1890вм118 с архитектурой комдив для создания доверенных систем / [С. Г. Бобков, С. И. Аряшев, П. С. Зубковский и др.] // Программные продукты и системы. – 2017. – Т. 30, № 3. – С. 345–352.
15. Автоматное управление асинхронными процессами в ЭВМ и дискретных системах / [Варшавский В. И., Кишиневский М. А., Мараховский В. Б. и др.]; под ред. В. И. Варшавского. – М.: Наука, 1986. – 398 с.
16. Каменских А. Н. Моделирование влияния резервирования на энергопотребление самосинхронных схем / А. Н. Каменских // Вестник Пермского университета. Математика. Механика. Информатика. – 2015. – № 4 (31). – С. 91–94.
17. Отказоустойчивый самосинхронный последовательно-параллельный порт: варианты реализации / [Ю. А. Степаченков, А. Н. Каменских, С. Ф. Тюрин и др.] // Системы и средства информатики. – 2016. – Т. 26, № 3. – С. 48–59.

Статья поступила в редакцию 06.02.2018.
После доработки 23.03.2018.

УДК 004.05

ЗАСТОСУВАННЯ КОМБІНОВАНОГО РЕЗЕРВУВАННЯ ПРИ ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА НАДІЙНОСТІ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ

Каменських А. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри «Автоматика і телемеханіка» Пермського національного дослідницького політехнічного університету, Росія.

Тюрін С. Ф. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Автоматика і телемеханіка» Пермського національного дослідницького політехнічного університету, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Завдання підвищення енергоефективності та надійності систем управління і обчислювальної техніки як і раніше залишається однією з найважливіших в 21-му столітті. Особливо в галузі аерокосмічної мікроелектроніки, де потрібно забезпечити стійкість до впливу одиночних ефектів, що породжуються зарядженими частинками, і одночасно забезпечити мінімальне енергоспоживання, так як можливості по її генерації істотно обмежені. При цьому продуктивність залишається важливим параметром для розробників електронних пристроїв. Таким чином, виходить складне оптимізаційне завдання з варіюваними змінними – надійності, енергоефективності та продуктивності, при існуючих виробничих обмеженнях.

Мета роботи – вирішення оптимізаційної задачі синтезу цифрових пристроїв, здатних працювати в широкому діапазоні температури і напруги при обмеженнях по надійності і продуктивності.

Метод. Самосинхронні схеми, що забезпечують стабільну роботу за реальними затримками, у тому числі і при ультранизкій напрузі живлення, зарекомендували себе як рішення для зазначеної вище галузі застосування. Для підвищення надійності в критичних системах часто використовується резервування, наприклад, потрібне модульне резервування, або коди Гемінга для схем з пам'яттю. Однак в самосинхронних схемах застосування зазначених методів ускладнюється високою надмірністю і вноситься затримкою. Крім того, стандартна модель Маллера не дозволяє враховувати вплив на систему одиночних відмов або збоїв, в результаті резервування призводить до порушення ключової властивості самосинхронних схем – напівмодулярності. У статті розвивається запропонований метод резервування на транзисторному рівні, який в поєднанні з вже добре відомими методами дозволяє отримати нові ефективні рішення.

Результати. Розроблено модель відмовостійких самосинхронних схем, що дозволяє аналітично підтверджувати належність відмовостійкої схеми до класу самосинхронних. Запропоновано методику комбінованого резервування, що дозволяє проводити синтез відмовостійких самосинхронних схем з оптимізацією за ключовими параметрами.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило, що тільки комбіноване резервування забезпечує досягнення оптимуму функцій в поставленому завданні. Надалі перспективно розширити об'єкт дослідження за рахунок синхронних і гібридних цифрових пристроїв.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: енергоефективність, надійність, відмовостійкість, самосинхронні схеми, резервування на транзисторному рівні, комбіноване резервування.

UDC 004.05

THE OPTIMIZATION OF ENERGY-EFFICIENCY AND RELIABILITY USING COMPLEX REDUNDANCY IN COMPUTING SYSTEMS

Kamenskih A. N. – PhD, Associate Professor Of “Automation and remote control” Department in Perm National Research Polytechnic University, Russia.

Tyurin S. F. – Dr. Sc., Professor, Professor Of “Automation and remote control” Department in Perm National Research Polytechnic University, Russia.

ABSTRACT

Context. The increase of energy-efficiency and reliability of computing systems is still important task in 21st century. It is especially important in the field of computing systems for aerospace because both the radiation-tolerance should be provided and the energy-consumption are very limited. Moreover, the developers should take care about performance of a computing system. There-

fore, all of this result in difficult optimization task with key-parameters – reliability, energy-efficiency and performance in conditions of existing technologies limits.

Objective. The solution of optimization task – the synthesis of digital devices that can work in wide temperature and voltage range at restrictions on reliability probability and performance.

Method. Delay-insensitive (or Self-timed according to Russian terms) circuits can stable operate in delay variation including operation under ultra-low-supply-voltage (ULSV). That is why it became a good solution for considered task. To increase reliability in the critical fields of application, the redundancy is often used. For example, the triple modular redundancy or the Hamming codes. However, the implementing of these methods in delay-insensitive circuits faces problems – excessive increase of complexity or delays in critical paths. In addition, the Muller's model are not provide possibilities to take into account failures as normal part of system operations. Thus, the definitions of fault-tolerance and semi-modularity (the basic feature of delay-insensitive circuits) have a conflict. In the paper the method of redundancy at transistor level was developed. The combination of proposed and known methods allows receiving new efficient solutions.

Results. The model of fault-tolerant self-timed circuits was developed. The method of complex redundancy for self-timed circuits was proposed. This method provides synthesis of digital devices with optimization in key parameters.

Conclusions. The research proved that only the combination of methods provide the achievement of function's optimum. It is interesting task to expand the object of research to synchronous and globally asynchronous locally synchronous computing systems in further research.

KEYWORDS: energy-efficiency, reliability, fault-tolerant, self-timed circuits, redundancy at transistor-level, complex redundancy.

REFERENCES

1. Yakovlev A. Energy-modulated computing, *Design, Automation & Test in Europe*, March, 2011, pp. 1–6.
2. Chung C. C., Su W. S., & Lo C. K. A 0.52/1 V fast lock-in ADPLL for supporting dynamic voltage and frequency scaling, *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2016, Vol 24, No. 1, pp. 408–412.
3. Kamenskikh, A. N., Stepchenkov, Y. A., & Tyurin S. F. Problems of analysis of semimodularity and energy-reliability of resilient self-timed circuits, *Russian Electrical Engineering*, 2015, No. 86(11), pp. 646–650.
4. Mukhopadhyay S., Mahmoodi-Meimand H., Roy K. Modeling and estimation of failure probability due to parameter variations in nano-scale SRAMs for yield enhancement, *VLSI Circuits, 2004. Digest of Technical Papers, Symposium on IEEE*, 2004, pp. 64–67.
5. Mehta N. An ultra-low-energy, variation-tolerant FPGA architecture using component-specific mapping (Doctoral dissertation. California Institute of Technology), 2012, 122 p.
6. Ghosh S., Roy K. Parameter variation tolerance and error resiliency: New design paradigm for the nanoscale era. *Proceedings of the IEEE*, 2010, vol. 98, No. 10, pp. 1718–1751.
7. Sokolov, I. A. et al. Implementation basis of exaflops class supercomputer, *Informatika i ee Primeneniya*, 2014, Vol. 8, No. 1, pp. 45–70. (In Russian)
8. Kuang, W., & Yuan, J. S. Low power operation using self-timed circuits and ultra-low supply voltage. *In Microelectronics, The 14th International Conference on 2002-ICM, IEEE*, December, 2002, pp. 185–188
9. Stepchenkov Y. A. et al. Biblioteka elementov dlya proektirovaniya samosinkhronnykh poluzakaznykh mikroskhem seriy 5503/5507 i 5508/5509 [Gates library for designing of self-timed ASIC circuits using series of uncommitted Logic Array 5503/5507 and 5508/5509]. Moscow, IPI RAN, 2013, 391 p.
10. Varshavskii V. I. et al. Apparatnaya i strukturnaya organizatsiya sredstv kontrolya i vosstanovleniya v samosinkhronnom kol'tsevom kanale, *Avtomatika i vychisl. tekhnika*, 1989, JS1, pp. 61–68.
11. Kamenskikh A. N., Tyurin S. F. Advanced approach to development of energy-aware and naturally reliable computing systems, *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW)*, 2015, IEEE NW Russia, IEEE, 2015.
12. Brady J., Francis A. M., Holmes J. et al. (2015) An asynchronous cell library for operation in wide-temperature & ionizing-radiation environments. *Aerospace Conference, 2015 IEEE*, 2015, pp. 1–10.
13. Serdin O. V., et al. The special radiation-hardened processors for new highly informative experiments in space. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2017, Vol. 798, No. 1, pp. 012010.
14. Bobkov S. G., et al. Vysokoproizvoditel'nyj mikroprocessor 1890vm118 s arxitekturoj komdiv dlya sozdaniya doveren'nyx sistem, *Programmnye produkty i sistemy*, 2017, Vol. 30, No. 3, pp. 345–352.
15. Varshavskii V. I., ed. Avtomatnoe upravlenie asinkhronnymi protsessami v EVM i diskretnykh sistemakh. Moscow, 1986, Nauka, 398 p.
16. Kamenskikh A. N. Modelirovanie vliyaniya rezervirovaniya na energopotreblenie samosinkhronnykh skhem *Vestnik Permskogo Universiteta. Seriya Matematika, Mehanika, Informatika*, 2015, No. 4 (31), pp. 91–94.
17. Stepchenkov, Y. A. et al. Otkazoustojchivyy samosinxronnyj posledovatel'no-parallel'nyj port: varianty realizacii, *Sistemy i sredstva informatiki*, 2016, Vol. 26, No. 3, pp. 48–59.

METHOD OF DATA EXPRESSION FROM THE UKRAINIAN CONTENT BASED ON THE ONTOLOGICAL APPROACH

Lytvyn V. V. – F.D., Professor, Head of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vysotska V. A. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Hrendus M. H. – Assistant of Information Systems and Networks Department of Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Nowadays there is a constantly increasing interest to the application of the intelligent systems (IS) in different areas such as information technologies (IT), engineering, medicine, biology, ecology, geography, jurisprudence etc. At the heart of architecture of modern IS's knowledge bases (KB) are used, which are formed due to the subject area (SA), where the given IS is used. The main part of KB is ontology as clearly structured SA's model, systematic set of terms, which explain the connections between objects of this SA. Ontologies are generally accepted and widely used in different branches of science such as knowledge engineering, presentation of knowledge, information search, knowledge management, database design, information modeling and object-oriented analysis. In particular, Gather company in their researches of IT-market attributed the use of taxonomy/ontology in his area. Consequently, research of syntactic ontological structures of KB, construction and research of optimal algorithm for syntactic analysis of Ukrainian language texts and the development of software-algorithmic means of content, automatic referencing of texts, gathering knowledge, translation etc. are relevant.

Objective. The goal of the work develop a software system for formalizing the rules of syntax of the Ukrainian language in the form of an ontological basis of knowledge for the purpose of its use for working out natural language texts in the Ukrainian language.

Method. Methods of solving the problem of creating a consolidated resource based on ontological KB were chosen decision trees, IDEF5 methodology and ontology construction methodology. The results of syntactic analysis work are taken into account by associative-semantic context analysis to optimize the process of constructing associative context relationships between words and sentence combinations within the hierarchical network of ontological BB.

Results. A consolidated information resource is created – an ontological KB of parsing analysis of Ukrainian-language text documents with the help of Protégé 3.4.7.

Conclusions. The method of data extraction based on ontological BZ and FPGA language is developed for the further development of a consolidated information resource for the syntactic elaboration of text documents. As a result, an ontological type of KB with FPSM was created. The syntactic structure of the input sentence is the foundation and frame for the next, not less important step – semantic analysis. This ontological KB of the consolidated LR of syntactic elaboration of Ukrainian-language text documents serves as a powerful basis for further development of an automated IS for parsing Ukrainian-language texts.

KEYWORDS: analysis, content-analysis, ontology, content management system.

ABBREVIATIONS

KB is a knowledge base;
AI is an artificial intelligence;
IS is an information system;
IT is an information technology;
SA is a subject area;
PIR is a processing of information resources;
LR is a linguistic resource;
RSUL is a rules of the syntax of the Ukrainian language.

NOMENCLATURE

O is an ontology;
X is a finite set of concepts for the subject area for describing the Ukrainian language;
R is a finite set of relations between concepts;
F is a set of interpretation functions;
Morphology is a finite set of concepts of the morphology of the Ukrainian language;
Punctuation is a finite set of concepts of the punctuation of the Ukrainian language;
Structure is a finite set of concepts of the structure of the Ukrainian language;

Syntax is a finite set of concepts of the syntax of the Ukrainian language;

Semantic is a finite set of concepts of the semantics of the Ukrainian language;

WordsCombination is a finite set of concepts of the formation of phrases;

Sentence is a finite set of concepts of the creation of sentences in the Ukrainian language;

SignWords is a finite set of signs of the formation of phrases;

LexicalSign is a finite set of lexical signs of the formation of phrases;

SyntacticSign is a finite set of syntactic signs of the formation of phrases;

Noun is a finite set of registered signs of the formation of phrases;

Adjective is a plurality of adjective signs of the formation of phrases;

Numeral is a finite set of numerical signs of the formation of phrases;

Pronoun is a plurality of pronoun signs of the formation of phrases;

Verb is a finite set of verb signs of the formation of phrases;

Adverb is a finite set of adverbial signs of the formation of phrases;

Coordinated is a finite set of coordinated signs of the formation of phrases;

Inferior is a finite set of subordinated signs of the formation of phrases;

SimpleWord is a finite set of simple signs of the formation of phrases;

ComplicatedWord is a finite set of complex signs of the formation of phrases;

AdversativeComt is a finite set of signs of dividing signs;

ConnectiveComt is a finite set of connecting signs;

DividingComt is a finite set of signs of opposing communication;

ContactComt is a finite set of signs of agreement;

ManagementComt is a finite set of signs of management;

AdjoiningComt is a finite set of signs of adjoining;

SignSent is the finite set of signs of the creation of sentences in the Ukrainian language;

SentenceMembers is a finite set of signs of the identification of sentence members;

NarrativeSent is a finite set of signs of the formation of narrative sentences;

PronouncedSent is a finite set of signs of the formation of questionnaire;

IncentiveSent is a finite set of signs of the formation of inductive sentences;

EmotionallyNeutral is a finite set of signs of the formation of emotionally neutral sentences;

EmotionallyColored is a finite set of signs of the formation of emotionally colored sentences;

SimpleSent is a finite set of concepts of the formation of simple sentences;

ComplicatedSent is a finite set of concepts of the formation of complex sentences;

MainSentMemb is a finite set of signs of identification of the main members of the sentence;

SecondSentMemb is the set of signs of identification of secondary members of the sentence;

AffirmativeSent is a finite set of signs of the formation of affirmative sentences;

NegativeSent is a finite set of signs of the formation of negative sentences;

SgSpSt is the finite set of signs of the formation of simple sentences.

INTRODUCTION

In the ontology study, questions arise from the first steps. Until now, there is no single definition for the concept of ontology. The concept of ontology comes from the Greek. "Ontos" – the existence, "logos" – the doctrine, the concept, this is a section of philosophy that studies existence. In computer science, this is an attempt of comprehensive and detailed formalization of a certain area of knowledge through the conceptual scheme [1]. Under the

conceptual scheme should be understood a set of concepts + information about the concept (properties, relationships, constraints, axioms and assertions about the concepts necessary to describe the processes of solving problems in the selected software) [2]. Among the specialists in computer linguistics, the most established (classical) is the definition of ontology given by Gruber T. : "Ontology is a specification of conceptualization" [3–4]. In addition to problems with the exact definition of the concept of "ontology", there is a number of problems with the description of the model of ontology in the formal language [1]. However, not all existing ontological LR fall under the given definition. Today, the evolution of applied IS goes toward increasing their intellectualism. This significantly affects the direction of scientific and technological research related to the use of computers, and also gives the society practically important results. However, at the certain stage of development, further improvement of IT by nowadays available resources becomes impossible. In such periods, a qualitative leap is required for the development tools. One such leap in the field of AI, aimed at further intellectualization of the interactions between systems and users, was the emergence of ontologies.

The purpose of the work is to design and develop the system of formalization of RSUL in the form of an ontological KB with the aim of its use for processing the Ukrainian-language content of Web-resources and extraction of data from it.

The object of the research is the processes of extraction from Ukrainian language content of Web-resources based on the ontological approach taking into account the syntax and semantics of texts.

Subject of research is methods and means of technology for processing information resources and extracting data from them based on the ontological approach.

1 PROBLEM STATEMENT

To develop a software system S of the formalization of RSUL in the form of an ontological knowledge base for its use for the processing of natural language texts written in the Ukrainian language (for example, for automated referencing, extracting knowledge from texts, translating texts into other languages, etc.). At the input of the system there are verbal rules for the syntax of the Ukrainian language, which are given in textbooks and other books about Ukrainian grammar rules.

At the output of the system there is an ontological model of the rules of the syntax of the Ukrainian language $O = \langle X, R, F \rangle$. The taxonomy of the ontology concepts X defines the syntax of the language (the root concept of ontology). The optimal determination of the plurality of relations between these concepts R and the set of rules F of the syntax of the Ukrainian language, formalized with the help of descriptive logic DL, will allow to effectively process the nature-language texts in the Ukrainian language, that is: $S: RSUL \rightarrow O$.

2 LITERATURE REVIEW

The authors of works [5–13] believe that in designing of ontologies conditionally distinguish two directions, which for some time developed separately. The first (formal) – based on logic (predicates of the first order, descriptive, modal, etc.) [14–15]. The second (linguistic) – based on the study of natural language (in particular, semantics) and the construction of ontologies on large text arrays, the so-called buildings [16–27]. Formal ontology is a set of concepts and assertions about these concepts, on the basis of which the classes, objects, relations, functions and theories are constructed [28–31]. Most models of ontologies contain the following components: concepts (concepts, classes); properties of concepts (attributes, roles); relationship between concepts (dependence, function); additional constraints that are defined by axioms [32–39]. The role of the concept is a description of the task, function, action, strategy, process of reasoning, etc. The main difference of the ontological system from the usual vocabulary is internal unity, logical interconnection and consistency of the concepts used. The second kind of ontologies is hierarchical lexical resources such as WordNet. They describe the lexical relations between the meanings of words given in the form of individual units in the hierarchical network – sinsets. The relationship between lexical units reflects the relation of objects of the outside world, therefore, such resources are often regarded as a special kind of ontology – lexical or linguistic ontologies. The main characteristic of linguistic ontologies is that they are tied to the meanings of verbal expressions (words, names groups, etc.). Linguistic ontologies cover most of the words of the language and at the same time have an ontological structure that manifests itself in the relation between concepts. Therefore, linguistic ontologies are considered as a special type of lexical database and a special type of ontology. The main difference between linguistic and formal ontologies is the degree of formalization. It is assumed that the development of such resources builds a hierarchy of lexical meanings of the natural language, and for a more rigorous description of the knowledge about world, they compare such resources with any formal ontologies. Thus, the content of one of

the projects is the establishment of the relationship between WordNet and EuroWordNet, on the one hand, and the formal ontology SUMO – Standardized Upper Merged Ontology – on the other. The project is to establish a match between the WordNet Sinsets and the concepts of ontology, in which each WordNet sinset is directly related to the concept of ontology, or is a hyponymy for some concept or instance (element) of the ontology concept. Participants in another OntoWordNet project consider that it is not enough to hold formal glue of a resource such as WordNet and formal ontology: a significant restructuring of the source lexical resource is required.

3 MATERIALS AND METHODS

The primary task of creating an ontological KB of syntactic analysis is to create diagrams of the syntax classes of the Ukrainian language, which are transformed into taxonomy of the concepts of X. Such diagrams are shown in Fig. 1–6.

In the production of data on the basis of ontological KB and the development of rules of the syntax of the Ukrainian language for the further development of a consolidated information resource of syntactic processing of text documents, it is necessary to focus on the concept of *Syntax* =< *WordsCombination, Sentence* >, in the first place. We will submit a finite set of concepts of the formation of phrases in the Ukrainian language as a cortage:

$$\begin{aligned} \text{WordsCombination} =< \text{SignWords}_1, \\ \text{SignWords}_2, \text{SignWords}_3, \text{SignWords}_4 >, \end{aligned} \quad (1)$$

where the signs of the formation of phrases in the Ukrainian language are divided into four main groups

$$\begin{aligned} \text{SignWords}_1 =< \text{LexicalSign}, \text{SyntacticSign} >, \\ \text{SignWords}_2 =< \text{Noun}, \text{Adjective}, \\ \text{Numeral}, \text{Pronoun}, \text{Verb}, \text{Adverb} >, \\ \text{SignWords}_3 =< \text{Coordinated}, \text{Inferior} >, \\ \text{SignWords}_4 =< \text{SimpleWord}, \text{ComplicatedWord} >. \end{aligned} \quad (2)$$

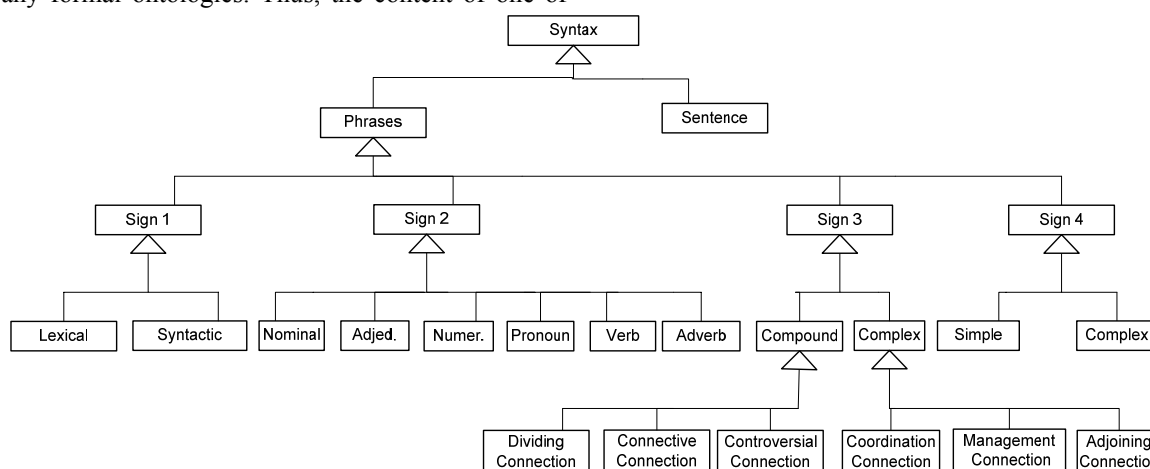


Figure 1 – A class diagram for representing the hierarchy of the classes “Syntax_PhraseCombination”

Composite signs of *SignWords₃* are described by the following sets of concepts:

$$\begin{aligned} &Coordinated = \langle AdversativeComt, \\ &ConnectiveComt, DividingComt \rangle, \\ &Inferior = \langle ContactComt, \\ &ManagementComt, AdjoiningComt \rangle. \end{aligned} \quad (3)$$

Accordingly, the finite set of concepts of the formation of sentences in the Ukrainian language (Fig. 2) will be presented as a tuple

$$\begin{aligned} &Sentence = \langle SignSent_1, SignSent_2, \\ &SignSent_3, SentenceMembers \rangle, \end{aligned} \quad (4)$$

where the signs of the formation of sentences in the Ukrainian language are divided into several main groups as

$$\begin{aligned} &SignSent_1 = \langle NarrativeSent, \\ &PronouncedSent, IncentiveSent \rangle, \\ &SignSent_2 = \langle EmotionallyNeutral, \\ &EmotionallyColored \rangle, \\ &SignSent_3 = \langle SimpleSent, ComplicatedSent \rangle, \\ &SentenceMembers = \langle MainSentMemb, \\ &SecondSentMemb \rangle, \\ &NarrativeSent = \langle AffirmativeSent, NegativeSent \rangle. \end{aligned} \quad (5)$$

To determine the simple sentence, it is necessary to analyze the sentences by using the eighth signs (Fig. 3), as described by the following tuples (6). Similarly, classes have been constructed to determine the members of a solution and a complex solution (Fig. 4–6).

$$\begin{aligned} SimpleSent = &\langle SgSpSt_1, SgSpSt_2, SgSpSt_3, \\ &SgSpSt_4, SgSpSt_5, SgSpSt_6, SgSpSt_7, SgSpSt_8 \rangle. \end{aligned} \quad (6)$$

One of the promising directions for further refinement of IS for PIR is the development of methodological, ontological and logical foundations of the design of KB intended for the analysis of text documents. Ontological aspects include a range of issues, ranging from the scope of application and to the formal description of the components of computer ontology SA. The main vector of research is aimed at formalizing the stages of construction, structuring and presentation of SA's material during the analysis and integrated with the information resource of the problem space, which allows for an effective combination of processed text materials. In turn, the effective implementation of these stages and obtaining the final result (in the form of a library ontological KB with SA) is impossible without conducting a system-ontological analysis of a given set of information LR. The information model of the SA, which is the basis of the functioning of this system, in order to record its state in time, must contain a time component. From this we can conclude that our information model has the following characteristics: the decomposition of the essence, depending on the time parameters; fixing the status of an object (registering changes in the values of a subset of the object's attributes, as changes in the status of an object); object archiving (extracting an object from the current state of the information model). The main contextual diagram reflects the external connections of the highest-level IS (Fig. 7a).

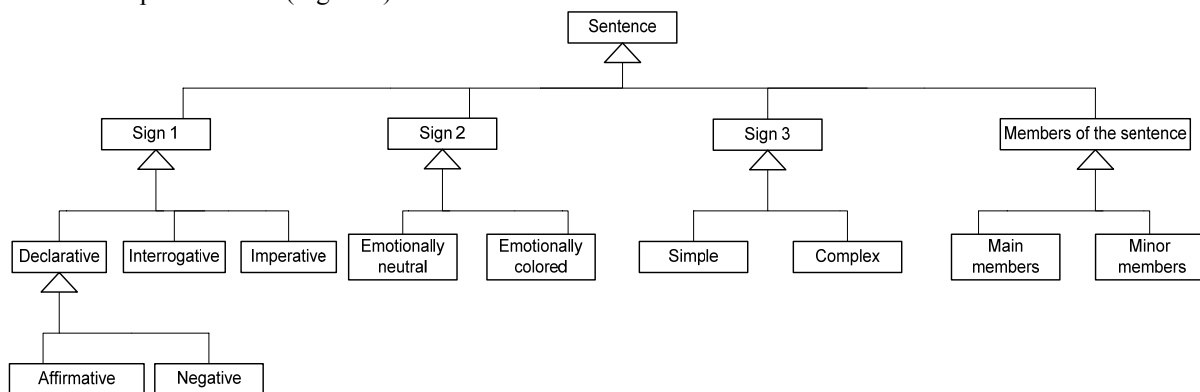


Figure 2 – A class diagram for representing the hierarchy of the classes “Sentence”

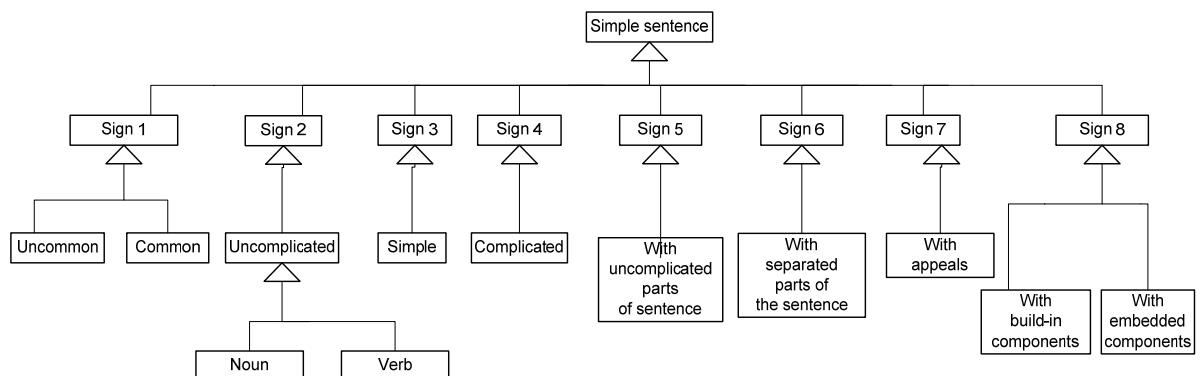


Figure 3 – A class diagram for “Simple sentence”

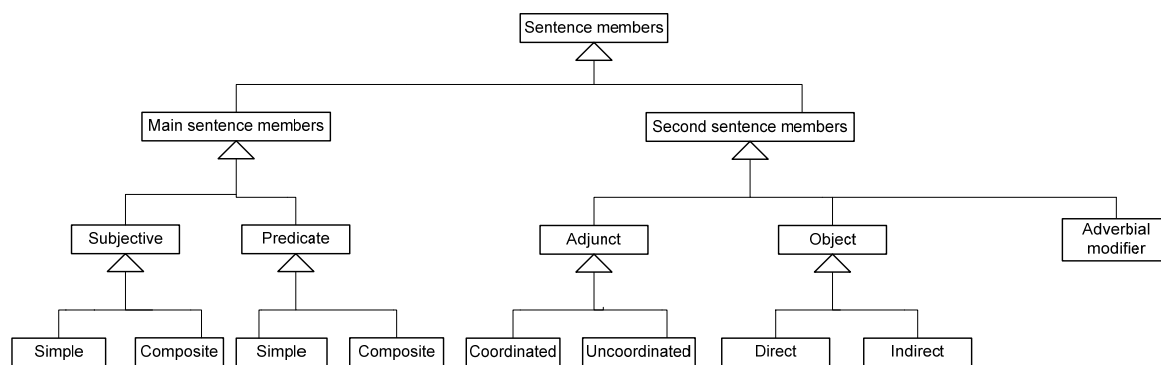


Figure 4 – A class diagram for “The members of sentence”

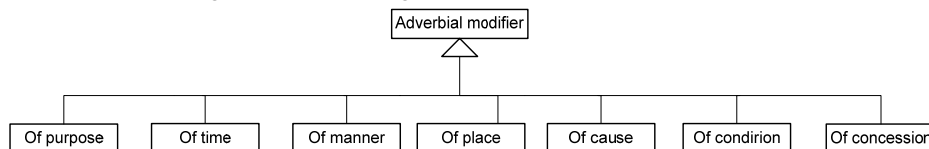


Figure 5 – A class diagram for “Adverbial modifier”

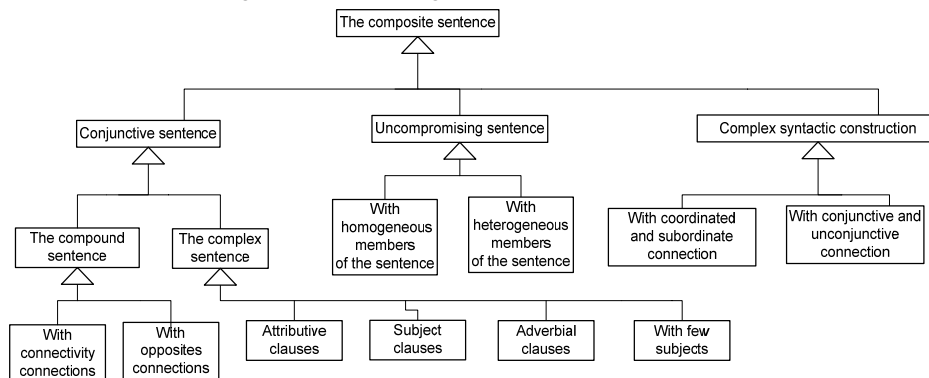


Figure 6 – A class diagram for “Complex sentence”

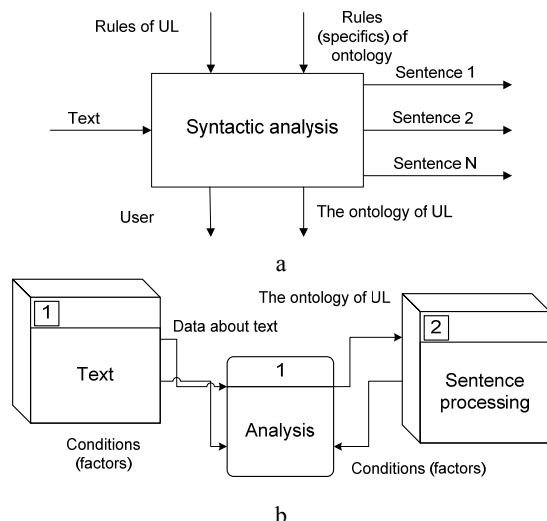


Figure 7 – Diagram of IS «Parsing Analysis»: a – IDEF0; b – DFD

The object is the real essence of the software, which changes the state over time. In the developed SA there are such classes of objects: Text and Worked Out Sentence. The interaction of two data classes of objects, that is, the structure of the IS, is given in the context diagram of Fig. 7 b. If we consider the information model at a more

© Lytvyn V. V., Vysotska V. A., Hrendus M. H., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-16

detailed level, then it should be noted that each of the object classes contains a number of specific external entities, each of which describes its attributes and specifies the relationship between the classes of objects (Fig. 8).

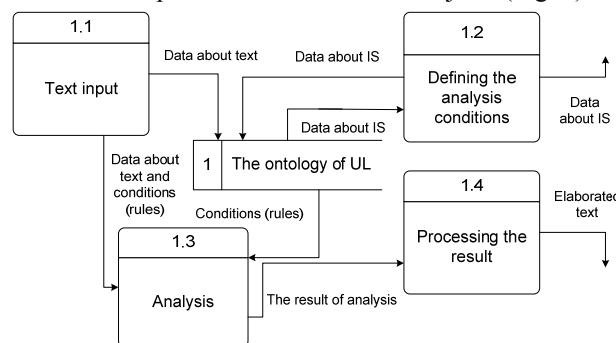


Figure 8 – Detailing of the process “Analysis”

Essences that make up IS and are real objects of a specific SA: IS, text, rule. We give the properties of the essence of the IP (all attributes of objects are static values).

1. Information system is a description of IP, which processes the Ukrainian-language text.

2. Text – displays information about the text, that is being analyzed.

3. The rule is the rules of the Ukrainian language, which are followed by the analysis of the text.

In the center of most ontologies there are classes. Protégé and other frame systems describe ontology in a declarative manner, clearly defining the class hierarchy and the affiliation of individual concepts to the corresponding classes. Ontology in OWL has similar components to frame-based ontologies. OWL terminology is based on the concepts of individual concepts or objects and properties that are generally consistent with Protégé, respectively, instances of classes and slots. Objects are separate instances of the subject field. An important difference between Protégé and OWL is that OWL does not use Unique Name Assumption (UNA). This means that two different names can, in fact, be sent to the same object. For example, the names “Queen Elizabeth”, “Queen” and “Elizabeth Windsor” mean the same object. In OWL it should be clearly defined that objects are the same or different from each other, otherwise the names may belong to the same or different objects. Properties are binary links between objects. For example, the property “to have a color” ties the object “gold” with the object “yellow”, or the property “used in” connects the object “gold” with the object “electrical engineering” (Fig. 9 a).

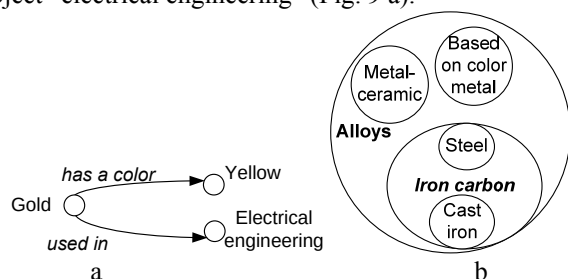


Figure 9 – Presentation: a – properties of the object; b – class structures.

In Protégé, properties are represented by slots, in descriptive logic – roles, in UML and other object-oriented views – by links. Properties can be inverse. For example, inversion to the property of the object “has a color” – “to be color”. Properties can be functional (limited to a single value), transitive or symmetric. Classes in OWL are considered as sets containing objects that are described formally (mathematically) for the exact representation of their membership in a particular class. Classes organize a class-subclass into a hierarchy-taxonomy. The OWL subclass means the need to add. For example, “cast iron” and “steel” objects (Fig. 9b) belong to the “iron-carbon alloys” class, which together with “metal-ceramic alloys” and “non-ferrous alloys” is a subclass of “alloys”. The OWL subclass means the need to add. For example, “cast iron” and “steel” objects (Fig. 9b) belong to the “iron-

carbon alloys” class, which together with “metal-ceramic alloys” and “non-ferrous alloys” is a subclass of “alloys”. In the case of building a deeper hierarchy, the objects “iron” and “steel” are regarded as separate classes with their subclasses and objects. In OWL classes, they create descriptions that specify the conditions for the matching of the object to become part of the class instances.

4 EXPERIMENTS

The main stage of the realization of the task is to create an ontological KB based on the rules of the syntax of the Ukrainian language for the further development of a consolidated LR syntactic elaboration of Ukrainian-language text documents. For this purpose, the software program Protégé 3.4.7 was used to create a hierarchy of classes and subclasses of the hierarchy of syntactic concepts based on the rules of the syntax of the Ukrainian language (Fig. 10a). Information about the selected class is displayed on the right side of the window. The upper part of this window allows users to add comments, labels and other annotations. The bottom part displays the logical characteristics of the selected class, which are specified using certain buttons on the panel when you click on the “Create new expression” icon (Figure 10 b).

An example of creating a logical class characteristic is the expression: “A phrase with a junction bond has some united connection” (Fig. 11 a–e). The next step in building a KB is to enter the class representatives in the Individuals tab (Fig. 11e), for example, representatives of the class of lexical unbound phrases. Next, the relationship between certain classes and subclasses is created in the Properties tab in the main panel (Fig. 11f). The created KB has the following relationships: compoundOf (consists of); hasConjunctive (has a connector); hasMemberOfTheSentence (has sentence members); hasPunctuation (has a punctuation mark). The SWRL Rules tab creates rules for parsing using Semantic Web Rules of Language (SWRL) and the use of a handy expression editor (Fig. 12). When writing rules, classes (subclasses), relationships, and representatives that interact with specific operands in the expression editor panel are used.

One of the benefits of Protégé 3.4.7 is the ability to create queries through the Open SPARQL Query panel. At the bottom of the main window, there will be two more windows: Query - for the query itself, Results - to output the result of the query (after pressing the button Execute query) (Figure 13). In fig. 14a the query reflects the subclasses of the Complex sentence without conjunctions, and in Fig. The 13b request reflects simultaneously the subclasses of the Sentence and Phrase Class, and also sorts their comments in alphabetical order.

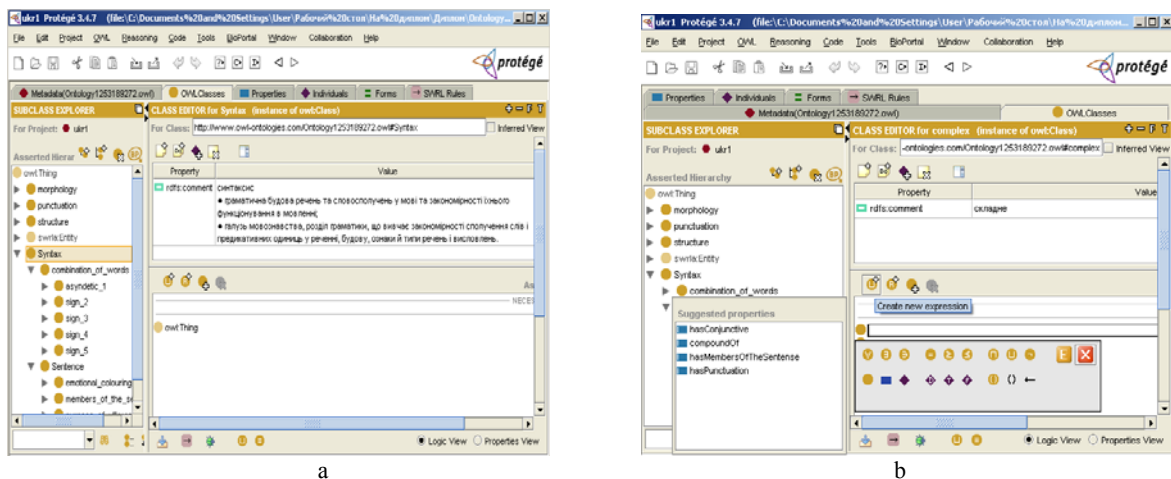


Figure 10 – In the Protégé 3.4.7 environment: a – Create a hierarchy of classes, subclasses in the OWLClasses tab and comments; b – call the panel to create the logical characteristics of classes

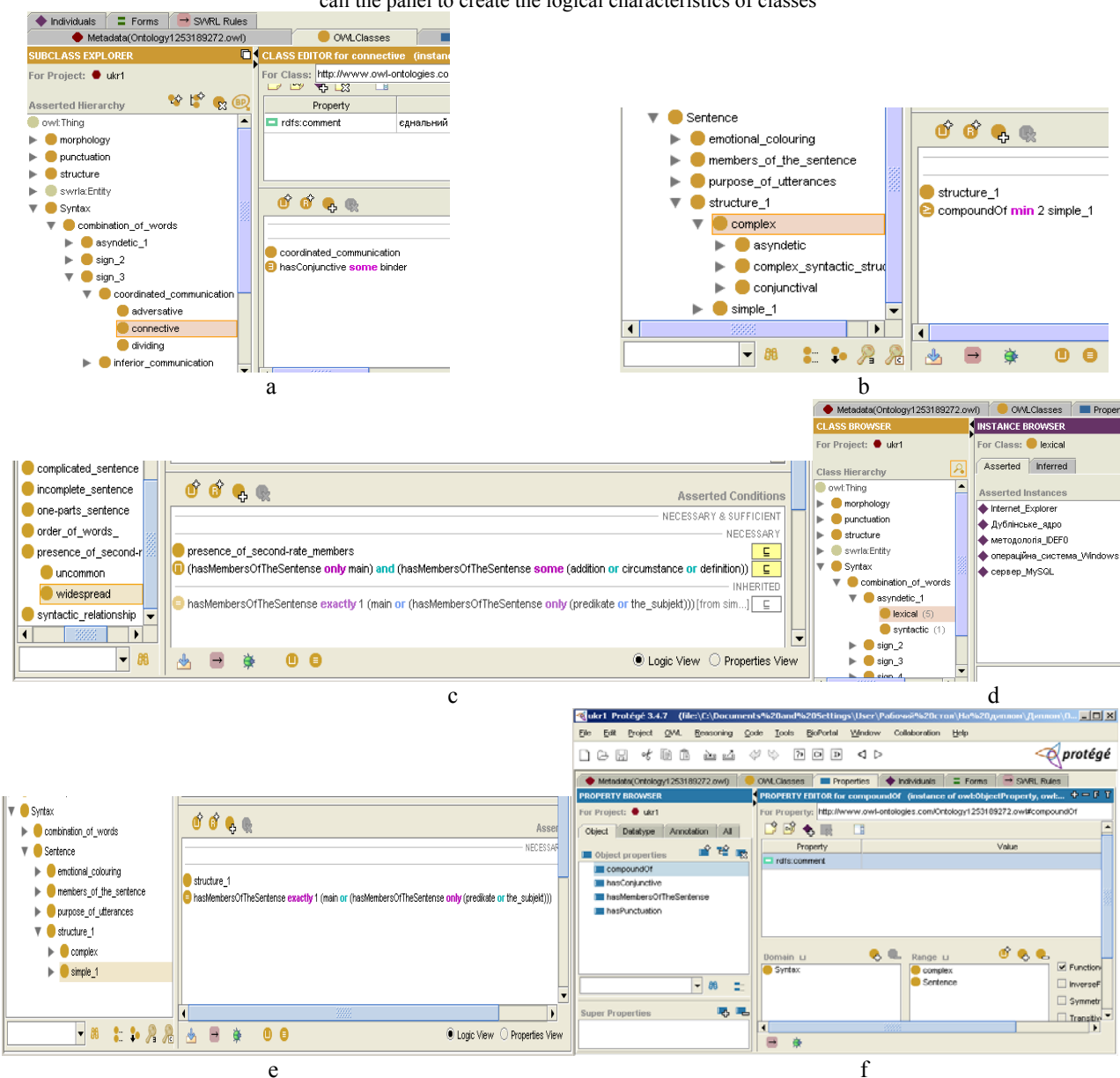


Figure 11 – Class: a – “Connective”; b – “Complex”; c – “Simple_1”; d – “Lexical”; e – “Widespread”; f – creating relationships between classes

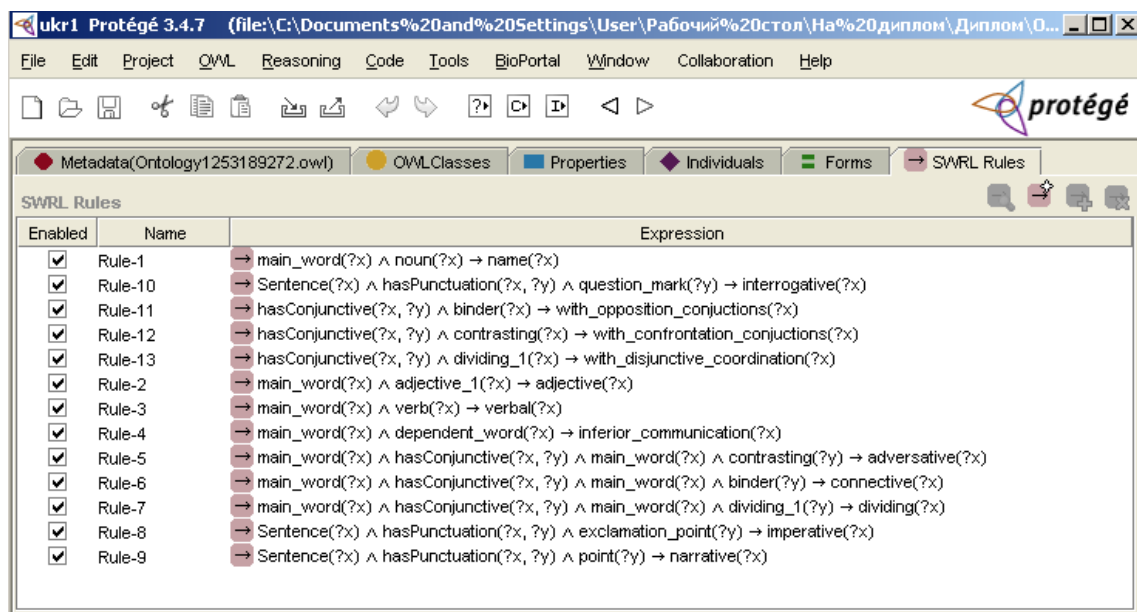


Figure 12 – Rules of KB for parsing

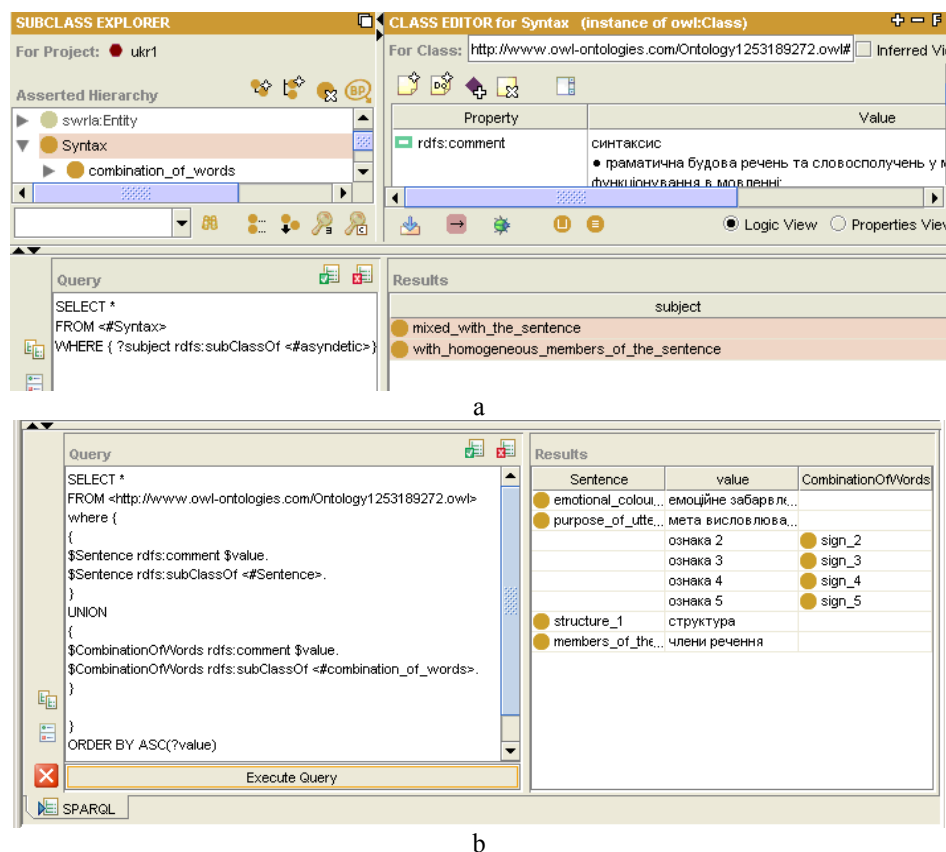


Figure 13 – Examples of sample requests

5 RESULTS

The proposed and developed procedure for extracting data from the Ukrainian-language test on the basis of parsing analysis makes it possible to supplement the conceptual graphs of text documents comparable to the context of the SA determined by the ontology. Recognizing the content of a text document in the first stage is to “recognize” the concepts and statements of this document by

defining the degree of similarity of these concepts to their likely counterparts in the ontology of the IRS, taking into account the results of the parsing analysis. A set of recognized concepts is complemented by ontology with all the concepts associated with elements of such a set by generalizing links “IS-A” on one level up, as well as by other semantic ties whose weight exceeds a given threshold value. This add-on provides the recognized text with the

conceptual context of the given SA. The relationships between concepts in the text under investigation, in turn, are recognized and used to eliminate the ambiguity of the recognition of concepts if terms with a similar name are present in an ontology in a different context and, accordingly, in different meanings. Recognized in this way, the text, supplemented by a semantically related conceptual structure from ontology, forms a coherent graph of the semantic image of this text. After that, comparing the similarity of the texts will be to calculate the semantic distance between the documents (Fig. 14).

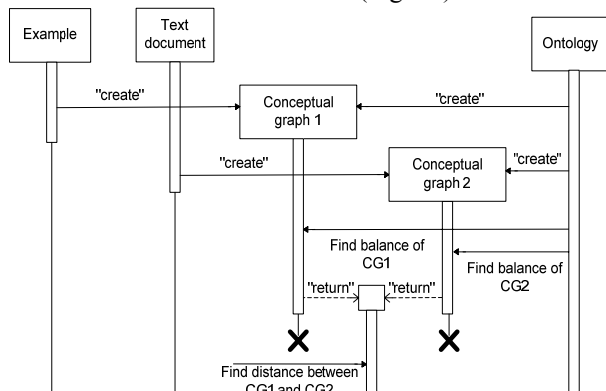


Figure 14 – The scheme of semantic comparison of documents

The procedure for comparing the text and its ranking according to similarity is included in the general algorithm of the search system of text documents by the model and consists of constructing:

- 1) weighted graph G of the text document.
- 2) supplemented by the ontology of the weighted graph of the model document, applying to each vertex of the graph G the procedure for finding his father in accordance with the connections between the concepts.
- 3) graph $\hat{G} = G \cup G'$ taking into count the results of the parsing analysis.
- 4) Reducing the redundant elements of the graph.
- 5) other graphs of documents for their ranking, applying paragraphs 1–4.
- 6) the calculations of the three centers of the importance of the graphs and the semantic distance between the graphs G and G' .

The effectiveness of the developed method on an example analysis of annotations is shown by comparing this method with the method of the vector-spatial model and the Dies coefficient [2]. An experiment with annotations of publications in the field of creativity T. G. Shevchenko (Fig. 15), which showed that the approach proposed on this basis on the basis of adaptive ontology increases the accuracy of the search of documents by an average of 20%. For this purpose from the keywords of an annotation-model the request is generated on the Internet. As a result, 25 annotations from sites corresponding to publications were received. In three methods: the method of conceptual graphs (Montes-Gomes), the Dies coefficient (variant of the vector-spatial model) and the method of adaptive ontologies, a comparative analysis of the annota-

tions obtained with the model was made (Table 1). The estimation of the effectiveness of these methods for information search is made by the parameter - the accuracy of the search:

$$precision = \frac{\text{the amount of found relevants (experts)}}{\text{the amount of all found (programs)}}.$$

Table 1 – Results of comparison of methods

Methods	Precision χ_2
The method is based on the Dys coefficient	10/15=0,66, (66 %)
The method is based on the vector-spatial model	9/12=0,75, (75 %)
Method of adaptive ontologies (developed)	11/12=0,916, (92 %)

6 DISCUSSION

The need for ontologies is related to the inability of adequate automatic processing of natural language texts by existing means. Creating thesauri does not solve the problem, since different user groups and communities use special terminology that is used by others in the second context to process and analyze information. Also, different communities often encounter different notations for the same concepts. Therefore, for qualitative elaboration of texts it is necessary to have a detailed description of the SA with a plurality of logical connections, which show the relationship between terms. The use of ontologies allows the submission of natural-language text in a suitable form for automatic processing. In addition, ontologies are used as an intermediary between the user and the IS, which allows formalizing the terms used among all users of the project.

Using this approach, account is taken of the context of documents and the context of the semantics of the terms and phrases they take. This makes it possible to automate the search for the documents most relevant to the prototype request and to reject those that are of minor importance and not in accordance with the SA.

According to the results of the experiment, we note that the method of comparison by Dace in 40% determined the most similar to the model those annotations that had the largest number of common words, in addition, the least consistent with the prototype of the content. The method of the vector-spatial model also did not give a satisfactory result. At the same time, taking into account the prior information about the SA, through weighing the vertices and links of the conceptual graphs of the reference and the annotated research, it was possible to select the most relevant annotation model.

This experiment illustrates the effectiveness of using the approach developed to work to automate the search for documents that are most relevant to the prototype query and can be used in constructing intelligent meta-search systems.

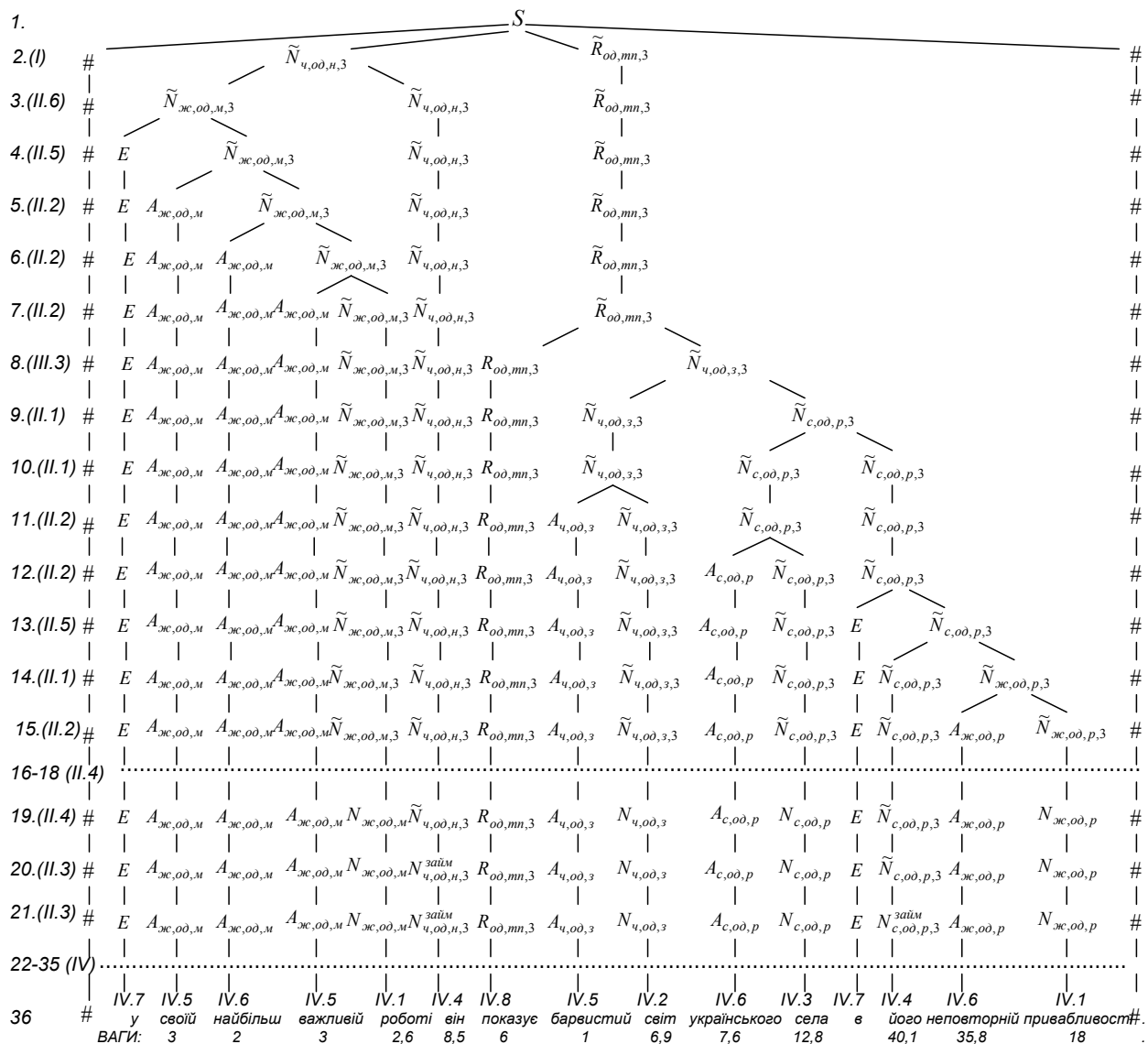


Figure 15 – The result of using syntactic analysis in Ukrainian language

CONCLUSIONS

The article deals with the scientific and practical task of extracting data from Ukrainian-language content based on the ontological approach, taking into account the features of syntax and semantics of this language.

The scientific novelty of the results obtained is that for the first time an ontological KB has been created on the basis of RSUL – for the further development of a consolidated LR syntactic elaboration of Ukrainian-language text documents. As a result of the system analysis of the software for the first time was designed KB, which contains consolidated information on RSUL-taking into account its features. The ontological aspect of designing the KB of analytical purpose is considered, which is one of the important practical applications of the direction of ontological engineering. The proposed approach solves and improves the results of solving the following urgent tasks for the processing of text documents: automated development of analytical and syntactic KB on the basis of lingual-

semantic analysis of large volumes of texts using original instrumental means (the source text is used from a variety of sources, for example from tested ones in educational institutions of textbooks in Ukrainian with SA); structuring terms and concepts in information resources from a specific SA; a significant reduction in the complexity of compiling the KB analytically and syntactically. For the first time, a method of data extraction was created based on ontological KB and RSUL for forming a consolidated information resource for syntactic processing of text documents. As a result, an ontological type KB with RSUL was created. It serves as a powerful foundation for further development of an actual ultra-complicated process of an automated system of parsing text analysis in Ukrainian. The practical significance of the results obtained is to develop a programmatic system for formalizing the RSUL by means of Protégé 3.4.7 in the form of an ontological knowledge base for its use for the processing of natural-language texts in the Ukrainian language (for

example, for heading out, referencing, extracting knowledge, translation, etc.). The created KB is sufficiently developed and allows you to perform the following important functions: creating a hierarchy of classes and subclasses of SA concepts; the introduction of representatives of classes and subclasses, which extends the possibilities of understanding and using KB; creation of a system of links between classes and subclasses; creation and execution of requests of various character; construction of rules for processing data; application of IT in the development of applications, etc. Perspectives for further research are the development of rules for analyzing the semantics of texts in Ukrainian for the more efficient extraction of knowledge from Ukrainian-language Web-resources. Using the method of evaluating the similarity of text documents on the content, based on the adaptation of its ontology to the user's SA, enables to increase the efficiency of automated search of relevant documents. However, we note that the developed method is not an alternative to well-known methods for searching documents, but their additions. For example, you first need to search for keywords, and then add the result to the contextual search.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of joint research of the department of information systems and networks of NU "Lviv Polytechnic" on the topic "Research, development and implementation of intelligent distributed information technologies and systems based on database resources, data warehouses, data and knowledge spaces in order to accelerate the processes of formation of modern information society". Scientific researches were also carried out within the framework of the research topics of the Department of ICN of Lviv Polytechnic National University on the topic "Development of intellectual distributed systems based on the ontological approach for the integration of information resources".

REFERENCES

1. Lytvyn Vasyly, Vysotska Victoria, Chyrun Lyubomyr, Dosyn Dmytro Methods based on ontologies for information resources processing. Saarbrücken, LAP, 2016, 324 p.
2. Lytvyn V. V., Vysotska V. A., Dosyn D. H. Metody ta zasoby opratsyuvannya informatsiynykh resursiv na osnovi ontolohiy. Lviv, LA «Piramida», 2016, 404 p.
3. Gruber T. A translation approach to portable ontologies specifications, *Knowledge Acquisition*, 1993, Vol. 5 (2), pp. 199–220.
4. Gruber T. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing, *International Journal Human-Computer Studies*, 1995, Vol. 43(5–6), pp. 907–928.
5. Guarino N. Formal Ontology, Conceptual Analysis and Knowledge Representation, *International Journal of Human-Computer Studies*, 1995, Vol. 43(5–6), pp. 625–640.
6. Sowa J. Conceptual Graphs as a universal knowledge representation, *Semantic Networks in Artificial Intelligence*, 1992, Vol. 23 (2–5), pp. 75–95.
7. Bulskov H. Knappe R., Andreasen R. On Querying Ontologies and Databases / H. Bulskov, // *Flexible Query Answering Systems*, 2004, pp. 191–202.
8. Calli A., Gottlob G., Pieris A. Advanced processing for ontological queries, *Very Large Databases : 36th International Conference, Singapore, September 13–17, 2010 : proceedings*. Singapore, VLDB Endowment, 2010, Vol. 3, No. 1, pp. 554–565.
9. Galopin A., Bouaud J., Pereira S., Seroussi B. An Ontology-Based Clinical Decision Support System for the Management of Patients with Multiple Chronic Disorders, *Studies in health technology and informatics, IMIA and IOS Press*, 2015, pp. 275–279.
10. Zhao Tian An Ontology-Based Decision Support System for Interventions based on Monitoring Medical Conditions on Patients in Hospital Wards, *Master Thesis in Information and Communication Technology IKT590, Spring*. Grimstad, University of Agder, 2014, 125 p.
11. Ugon A., Sedki K., Kotti A., Seroussi B., Philippe C., Ganascia JG., Garda P., Bouaud J., Pinna A. Decision System Integrating Preferences to Support Sleep Staging, *Studies in health technology and informatics*, 2016, Vol. 228, pp. 514–518.
12. Rospocher M., Serafini L. An Ontological Framework for Decision Support, *Part of the Lecture Notes in Computer Science book series, Semantic Technology : Second Joint International Conference, JIST 2012, Nara, Japan, December 2–4, 2012 : proceedings*. Nara, Springer, 2012, Vol. 7774, pp. 239–254.
13. Rospocher M., Serafini L. Ontology-centric decision support, *Semantic Technologies Meet Recommender Systems & Big Data*, 2012, Vol. 919, pp. 61–72.
14. Sutton R. S., Barto A. G. Reinforcement Learning: An Introduction. Cambridge, Massachusetts London, England : A Bradford Book, The MIT Press, 2012, 320 p.
15. Otterlo van M., Wiering M. Reinforcement learning and markov decision processes, *Reinforcement Learning*. Berlin, Springer, 2012, pp. 3–42.
16. Chen J., D. Dosyn, V. Lytvyn, A. Sachenko Smart Data Integration by Goal Driven Ontology Learning, *Advances in Big Data*, 2016, pp. 283–292.
17. Wong W., Liu W., Bennamoun M. Ontology learning from text: A look back and into the future, *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2012, Vol. 44(4):20, pp. 1–36.
18. Lytvyn V., Vysotska V., Pukach P., Bobyk I., Pakholok B. A method for constructing recruitment rules based on the analysis of a specialist's competences, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 6/2(84), pp. 4–14.
19. Montes-y-Gómez M. Gelbukh A., López-López A. Comparison of Conceptual Graphs, *Artificial Intelligence*, Vol. 1793, 2000, pp. 548–556.
20. Su J., Vysotska V., Sachenko A., Lytvyn V., Burov Y. Information resources processing using linguistic analysis of textual content, *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), 9th IEEE International Conference*, 2017, pp. 573–578.
21. Lytvyn V., Vysotska V., Veres O., Rishnyak I., Rishnyak H. Classification Methods of Text Documents Using Ontology Based Approach, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, 2017, Vol. 512, pp. 229–240.
22. Lytvyn V., Pukach P., Bobyk I., Vysotska V. The method of formation of the status of personality understanding based on the content analysis, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 5/2(83), pp. 4–12.
23. Lytvyn V., Vysotska V., Veres O., Rishnyak I., Rishnyak H. Content Linguistic Analysis Methods for Textual Documents Classification, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XI-th Int. Conf. (CSIT'2016)*, 2016, pp. 190–192.
24. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Identifying keywords on the basis of content monitoring method in ukrainian texts, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, Vol. 1(36), 2016, pp. 74–83.
25. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Sentence syntactic analysis application to keywords identification Ukrainian texts, *Radio*

- Electronics, Computer Science, Control*, Vol. 3(38), 2016, pp. 54–65.
26. Lytvyn V., Bobyk I., Vysotska V. Application of algorithmic algebra system for grammatical analysis of symbolic computation expressions of propositional logic, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, Vol. 4(39), 2016, pp. 54–67.
27. Aliksieieva K., Berko A., Vysotska V. Technology of commercial web-resource management based on fuzzy logic, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, Vol. 3(34), 2015, pp. 71–79.
28. Vysotska V. Linguistic Analysis of Textual Commercial Content for Information Resources Processing, *Proceedings of the XIIIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, 2016, pp. 709–713.
29. Lytvyn V., Vysotska V., Y. Burov, O. Veres, I. Rishnyak The Contextual Search Method Based on Domain Thesaurus, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 689. Springer International Publishing AG 2017, pp. 310–319.
30. Mykich K., Burov Y. Algebraic model for knowledge representation in situational awareness systems, *Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, 2016, pp. 165–167.
31. Mykich K., Burov Y. Uncertainty in situational awareness systems, *Proceedings of the 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, 2016, pp. 729–732.
32. Mykich K., Burov Y. Algebraic Framework for Knowledge Processing in Systems with Situational Awareness, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, pp. 217–228.
33. Mykich K., Burov Y. Research of uncertainties in situational awareness systems and methods of their processing, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 1(79), pp. 19–26.
34. Lytvyn V., Vysotska V., Pukach P., Bobyk I., Uhryn D. Development of a method for the recognition of author's style in the ukrainian language texts based on linguometry, stylemetry and glottochronology, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, Vol. 4/2(88), pp. 10–18.
35. Lytvyn V., Vysotska V., Veres O., Rishnyak I., Rishnyak The Risk Management Modelling in Multi Project Environment, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*, 2017, pp. 32–35.
36. Korobchinsky M., Vysotska V., Chyrun L., Chyrun L. Peculiarities of Content Forming and Analysis in Internet Newspaper Covering Music News, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*, 2017, pp. 52–57.
37. Naum O., Chyrun L., Kanishcheva O., Vysotska V. Intellectual System Design for Content Formation, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*, 2017, pp. 131–138.
38. Lytvyn Vasyly, Vysotska Victoria, Peleshchak Ivan, Rishnyak Ihor, Peleshchak Roman Time Dependence of the Output Signal Morphology for Nonlinear Oscillator Neuron Based on Van der Pol Model, *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*, 2018, Vol. 10, No.4, pp. 8–17. DOI: 10.5815/ijisa.2018.04.02.
39. Lytvyn Vasyly, Vysotska Victoria, Dosyn Dmytro, Holoschuk Roman, Rybchak Zoriana Application of Sentence Parsing for Determining Keywords In Ukrainian Texts, *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*, 2017, pp. 326–331.

Received 14.01.2018.

Accepted 26.02.2018.

УДК 004.9

МЕТОД ВИДОБУВАННЯ ДАНИХ З УКРАЇНОМОВНОГО КОНТЕНТУ НА ОСНОВІ ОНТОЛОГІЧНОГО ПІДХОДУ

Литвин В. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Висоцька В. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Грендус М. Г. – асистент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У даний час постійно зростає інтерес до застосування інтелектуальних систем (ІС) у різних галузях як інформаційні технології (ІТ), машинобудування, медицина, біологія, екологія, географія, юриспруденція тощо. В основі архітектури сучасних ІС використовують бази знань (БЗ), які формують відповідно до предметної області (ПО), де застосовують дану ІС. Основною частиною БЗ є онтологія як чітко структурована модель ПО, систематизований набір термінів, які пояснюють відношення об'єктів цієї ПО. Онтології є загальноновизнані та широко застосовувані в таких різних галузях науки, як інженерія знань, подання знань, інформаційний пошук, управління знаннями, проектування баз даних, інформаційне моделювання та об'єктно-орієнтований аналіз. Зокрема, фірма Gartner в дослідженні ІТ-ринку віднесла використання таксономії/онтології на третє місце в десятці передових технологій у даній галузі. Тому є актуальним дослідження структур синтаксичних онтологічних БЗ, побудова та дослідження оптимальних алгоритмів синтаксичного аналізу україномовних текстів, та розроблення програмно-алгоритмічного засобу синтаксичного опрацювання текстів, наприклад, для рубрикації Інтернет-контенту, автоматичного реферування текстів, видобування знань із них, перекладу на інші мови тощо.

Методами розв'язання проблеми створення консолідованого ресурсу на основі онтологічної БЗ були обрані дерева рішень, методологія IDEF5 та методології побудови онтологій. Результати роботи синтаксичного аналізу враховуються асоціативно-семантичним контекстним аналізом для оптимізації процесу побудови асоціативних зв'язків контексту між словами та словосполученнями речення всередині ієрархічної мережі онтологічної БЗ.

Результати. Створено консолідований інформаційний ресурс – онтологічну БЗ синтаксичного аналізу україномовних текстових документів за допомогою Protégé 3.4.7.

Висновки. Створенно метод видобування даних на основі онтологічної БЗ та ПСУМ мови для подальшого розроблення консолідованого інформаційного ресурсу синтаксичного опрацювання текстових документів. В результаті створено БЗ онтологічного типу із ПСУМ. Синтаксична структура вхідного речення є фундаментом та каркасом для наступного не менш важливого кроку – семантичного аналізу. Дана онтологічна БЗ консолідованого ЛР синтаксичного опрацювання

україномовних текстових документів виступає потужною основою для подальшого розроблення автоматизованої ІС синтаксичного аналізу україномовних текстів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аналіз, контент-аналіз, онтологія, система управління контентом.

УДК 004.9

МЕТОД ИЗВЛЕЧЕНИЯ ДАНИХ З УКРАИНОЯЗЫЧНОГО КОНТЕНТА НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

Лытвын В. В. – д-р техн. наук профессор, заведующий кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина.

Висоцька В. А. – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина.

Грендус М. Г. – ассистент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время постоянно растет интерес к применению интеллектуальных систем (ИС) в различных областях как информационные технологии (ИТ), машиностроение, медицина, биология, экология, география, юриспруденция и т.д. В основе архитектуры современных ИС используют базы знаний (БЗ), которые формируют в соответствии с предметной областью (ПО), где применяют данную ИС. Основной частью БЗ является онтология как четко структурированная модель ПО, систематизированный набор терминов, которые объясняют отношения объектов этой ПО. Онтологии являются общепризнанными и широко применяемыми в таких различных областях науки, как инженерия знаний, представления знаний, информационный поиск, управление знаниями, проектирование баз данных, информационное моделирование и объектно-ориентированный анализ. В частности, фирма Gartner в исследовании ИТ-рынка отнесла использования таксономии / онтологии на третье место в десятке передовых технологий в данной отрасли. Поэтому является актуальным исследование структур синтаксических онтологических БЗ, построение и исследование оптимальных алгоритмов синтаксического анализа украиноязычных текстов, и разработка программно-алгоритмического средства синтаксического обработки текстов, например, для рубрикации Интернет-контента, автоматического реферирования текстов, извлечения знаний из них, перевода на другие языки тому подобное.

Методами решения проблемы создания консолидированного ресурса на основе онтологической БЗ были выбраны деревья решений, методология IDEF5 и методологии построения онтологий. Результаты работы синтаксического анализа учитываются ассоциативно-семантическим контекстным анализом для оптимизации процесса построения ассоциативных связей контекста между словами и словосочетаниями предложения внутри иерархической сети онтологической БЗ.

Результаты. Создан консолидированный информационный ресурс – онтологическую БЗ синтаксического анализа украиноязычных текстовых документов с помощью Protégé 3.4.7.

Выводы. Создан метод добычи данных на основе онтологической БЗ и ПСУЯ для дальнейшей разработки консолидированного информационного ресурса синтаксического обработки текстовых документов. В результате создана БЗ онтологического типа с ПСУЯ. Синтаксическая структура входного предложения является фундаментом и каркасом для следующего не менее важного шага – семантического анализа. Данная онтологическая БЗ консолидированного ЛР синтаксического обработки украиноязычных текстовых документов выступает мощной основой для дальнейшей разработки автоматизированной ИС синтаксического анализа украиноязычных текстов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: анализ, контент-анализ, онтология, система управления контентом.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Methods based on ontologies for information resources processing / [Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Lyubomyr Chyrun, Dmytro Dosyn]. – Saarbrücken : LAP, 2016. – 324 p.
2. Литвин В. В. Методи та засоби опрацювання інформаційних ресурсів на основі онтологій / В. В. Литвин, В. А. Висоцька, Д. Г. Досин. – Львів : ЛА «Піраміда», 2016. – 404 с.
3. Gruber T. A translation approach to portable ontologies specifications / T. Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. – Vol. 5 (2). – P. 199–220.
4. Gruber T. Toward Principles for the Design of Ontologies Used for Knowledge Sharing / T. Gruber // International Journal Human-Computer Studies. – 1995. – Vol. 43(5–6). – P. 907–928.
5. Guarino N. Formal Ontology, Conceptual Analysis and Knowledge Representation / N. Guarino // International Journal of Human-Computer Studies. – 1995. – Vol. 43 (5–6). – P. 625–640.
6. Sowa J. Conceptual Graphs as a universal knowledge representation / J. Sowa // Semantic Networks in Artificial Intelligence. – 1992. – Vol. 23(2–5). – P. 75–95.
7. Bulskov H. On Querying Ontologies and Databases / H. Bulskov, R. Knappe, R. Andreasen // Flexible Query Answering Systems. – 2004. – P. 191–202.
8. Calli A. Advanced processing for ontological queries / A. Calli, G. Gottlob, A. Pieris // Very Large Databases : 36th International Conference, Singapore, September 13–17, 2010 : proceedings. – Singapore : VLDB Endowment, 2010. – Vol. 3, No. 1. – P. 554–565.
9. An Ontology-Based Clinical Decision Support System for the Management of Patients with Multiple Chronic Disorders / [A. Galopin, J. Bouaud, S. Pereira, B. Seroussi] // Studies in health technology and informatics, IMIA and IOS Press. – 2015. – P. 275–279.
10. Zhao Tian. An Ontology-Based Decision Support System for Interventions based on Monitoring Medical Conditions on Patients in Hospital Wards / Tian Zhao // Master Thesis in Information and Communication Technology IKT590, Spring. – Grimstad : University of Agder, 2014. – 125 p.
11. Decision System Integrating Preferences to Support Sleep Staging / [A. Ugon, K. Sedki, A. Kotti et al.] // Studies in health technology and informatics. – 2016. – Vol. 228. – P. 514–518.
12. Rospocher M. An Ontological Framework for Decision Support / M. Rospocher, L. Serafini // Part of the Lecture

- Notes in Computer Science book series, Semantic Technology : Second Joint International Conference, JIST 2012, Nara, Japan, December 2-4, 2012 : proceedings. – Nara : Springer, 2012. – Vol. 7774. – P. 239–254.
13. Rospocher M. Ontology-centric decision support / M. Rospocher, L. Serafini // *Semantic Technologies Meet Recommender Systems & Big Data*. – 2012. – Vol. 919. – P. 61–72.
 14. Sutton R. Reinforcement Learning: An Introduction / R. Sutton, A. Barto. – Cambridge, Massachusetts London, England : A Bradford Book, The MIT Press, 2012. – 320 p.
 15. Otterlo van M. Reinforcement learning and markov decision processes / M. van Otterlo, M. Wiering // *Reinforcement Learning*. – Berlin : Springer, 2012. – P. 3–42.
 16. Smart Data Integration by Goal Driven Ontology Learning / [J. Chen, D. Dosyn, V. Lytvyn, A. Sachenko] // *Advances in Big Data*. – 2016. – P. 283–292.
 17. Wong W. Ontology learning from text: A look back and into the future / W. Wong, W. Liu, M. Bennamoun // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. – 2012. – Vol. 44(4):20. – P. 1–36.
 18. A method for constructing recruitment rules based on the analysis of a specialist's competences / [V. Lytvyn, V. Vysotska, P. Pukach et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6/2(84). – P. 4–14.
 19. Montes-y-Gómez M. Comparison of Conceptual Graphs / M. Montes-y-Gómez, A. Gelbukh, A. López-López // *Artificial Intelligence*. – Vol. 1793. – Springer, 2000. – P. 548–556.
 20. Information resources processing using linguistic analysis of textual content / [J. Su, V. Vysotska, A. Sachenko, V. Lytvyn, Y. Burov] // *Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, 9th IEEE International Conference. – 2017. – P. 573–578.
 21. Classification Methods of Text Documents Using Ontology Based Approach / [V. Lytvyn, V. Vysotska, O. Veres, I. Rishnyak, H. Rishnyak] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer, 2017. – Vol. 512. – P. 229–240.
 22. The method of formation of the status of personality understanding based on the content analysis / [V. Lytvyn, P. Pukach, I. Bobyk, V. Vysotska] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 5/2(83). – P. 4–12.
 23. Content Linguistic Analysis Methods for Textual Documents Classification / [V. Lytvyn, V. Vysotska, O. Veres et al.] // *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XI-th Int. Conf. (CSIT'2016)*. – 2016. – P. 190–192.
 24. Bisikalo O. V. Identifying keywords on the basis of content monitoring method in ukrainian texts / O. V. Bisikalo, V. A. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – Vol. 1(36). – 2016. – P. 74–83.
 25. Bisikalo O.V. Sentence syntactic analysis application to keywords identification Ukrainian texts / O. V. Bisikalo, V. A. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – Vol. 3(38). – 2016. – P. 54–65.
 26. Lytvyn V. Application of algorithmic algebra system for grammatical analysis of symbolic computation expressions of propositional logic / V. Lytvyn, I. Bobyk, V. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – Vol. 4(39). – 2016. – P. 54–67.
 27. Aliksieieva K. Technology of commercial web-resource management based on fuzzy logic / K. Aliksieieva, A. Berko, V. Vysotska // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – Vol. 3(34). – 2015. – P. 71–79.
 28. Vysotska V. Linguistic Analysis of Textual Commercial Content for Information Resources Processing / V. Vysotska // *Proceedings of the XIIIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. – 2016. – P. 709–713.
 29. The Contextual Search Method Based on Domain Thesaurus / [V. Lytvyn, V. Vysotska, Y. Burov et al.] // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Vol. 689. – Springer International Publishing AG 2017. – P. 310–319.
 30. Mykich K. Algebraic model for knowledge representation in situational awareness systems / K. Mykich, Y. Burov // *Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. – 2016. – P. 165–167.
 31. Mykich K. Uncertainty in situational awareness systems / K. Mykich, Y. Burov // *Proceedings of the 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*. – 2016. – P. 729–732.
 32. Mykich K. Algebraic Framework for Knowledge Processing in Systems with Situational Awareness / K. Mykich, Y. Burov // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – Springer. – P. 217–228.
 33. Mykich K. Research of uncertainties in situational awareness systems and methods of their processing / K. Mykich, Y. Burov // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 1(79). – 2016. – P. 19–26.
 34. Development of a method for the recognition of author's style in the ukrainian language texts based on linguometry, stylemetry and glottochronology / [V. Lytvyn, V. Vysotska, P. Pukach et al.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – Vol. 4/2(88). – 2017. – P. 10–18.
 35. The Risk Management Modelling in Multi Project Environment / [V. Lytvyn, V. Vysotska, O. Veres et al.] // *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*. – 2017. – P. 32–35.
 36. Peculiarities of Content Forming and Analysis in Internet Newspaper Covering Music News / [M. Korobchinsky, V. Vysotska, L. Chyrun, L. Chyrun] // *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*. – 2017. – P. 52–57.
 37. Intellectual System Design for Content Formation / [O. Naum, L. Chyrun, O. Kanishcheva, V. Vysotska] // *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*. – 2017. – P. 131–138.
 38. Time Dependence of the Output Signal Morphology for Nonlinear Oscillator Neuron Based on Van der Pol Model / [V. Lytvyn, V. Vysotska, I. Peleshchak et al.] // *International Journal of Intelligent Systems and Applications (IJISA)*. – Vol.10, No.4. – 2018. – P. 8–17.
 39. Application of Sentence Parsing for Determining Keywords In Ukrainian Texts / Vasyl Lytvyn, Victoria Vysotska, Dmytro Dosyn, Roman Holoschuk, Zoriana Rybchak // *Computer Science and Information Technologies: Proc. of the XII-th Int. Conf. CSIT'2017*. – 2017. – P. 326–331.

THE NON-LINEAR REGRESSION MODEL TO ESTIMATE THE SOFTWARE SIZE OF OPEN SOURCE JAVA-BASED SYSTEMS

Prykhodko N. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Finance Department, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

Prykhodko S. B. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software of Automated Systems, Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of estimating the software size in the early stage of a software project is important, since the information obtained from estimating the software size is used for predicting the software development effort, including open-source Java-based information systems. The object of the study is the process of estimating the software size of open-source Java-based information systems. The subject of the study is the regression models for estimating the software size of open-source Java-based information systems.

Objective. The goal of the work is the creation of the non-linear regression model for estimating the software size of open-source Java-based information systems on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation.

Method. The model, confidence and prediction intervals of multiply non-linear regression for estimating the software size of open-source Java-based information systems are constructed on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation for non-Gaussian data with the help of appropriate techniques. The techniques to build the models, equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions are based on the multiple non-linear regression analysis using the multivariate normalizing transformations. The appropriate techniques are considered. The techniques allow to take into account the correlation between random variables in the case of normalization of multivariate non-Gaussian data. In general, this leads to a reduction of the mean magnitude of relative error, the widths of the confidence and prediction intervals in comparison with the linear models or nonlinear models constructed using univariate normalizing transformations.

Results. Comparison of the constructed model with the linear model and non-linear regression models based on the decimal logarithm and the Johnson univariate transformation has been performed.

Conclusions. The non-linear regression model to estimate the software size of open-source Java-based information systems is constructed on the basis of the Johnson multivariate transformation for S_B family. This model, in comparison with other regression models (both linear and non-linear), has a larger multiple coefficient of determination, a larger value of percentage of prediction and a smaller value of the mean magnitude of relative error. The prospects for further research may include the application of other multivariate normalizing transformations and data sets to construct the non-linear regression model for estimating the software size of open-source Java-based information systems.

KEYWORDS: software size estimation, Java-based information system, non-linear regression model, univariate normalizing transformation, non-Gaussian data.

ABBREVIATIONS

HTML is hypertext markup language;
JSP is Java server pages;
KLOC is the thousand lines of code;
LB is lower bound;
MD is Mahalanobis distance;
MMR is a magnitude of relative error;
MMRE is a mean magnitude of relative error;
PHP is hypertext preprocessor;
PRED is percentage of prediction;
SQL is structured query language;
UB is upper bound;
VBA is visual Basic for application.

NOMENCLATURE

$\hat{\mathbf{b}}$ is estimator for vector of linear regression equation parameters, $\mathbf{b} = \{b_1, b_2, \dots, b_k\}^T$;
 $\hat{b}_i$ is estimator for the i -th parameter of linear regression equation;
 k is a number of independent variables (regressors);
 N is a number of data points;

$N(0,1)$ is a Gaussian distribution with zero mathematical expectation and unit variance;

$\mathbf{P}$ is a non-Gaussian random vector,

$\mathbf{P} = \{Y, X_1, X_2, \dots, X_k\}^T$;

R^2 is a multiple coefficient of determination;

$\mathbf{S}_N$ is a sample covariance matrix, $\mathbf{S}_N = [S_{ij}]$;

$\mathbf{T}$ is a Gaussian random vector,

$\mathbf{T} = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}^T$;

$t_{\alpha/2, v}$ is a quantile of student's t -distribution with v degrees of freedom and $\alpha/2$ significance level;

X_1 is a total number of classes;

X_2 is a total number of relationships;

X_3 is an average number of attributes per class,

Y is an actual software size in KLOC;

$\mathbf{Z}_X^+$ is a matrix of centered regressors that contains the values $Z_{1i} - \bar{Z}_1, Z_{2i} - \bar{Z}_2, \dots, Z_{ki} - \bar{Z}_k$;

$\mathbf{z}_X$ is a vector with components Z_i ;

$(\mathbf{z}_X)^T$ is a transpose of $\mathbf{z}_X$;

$\bar{Z}_Y$ is a sample mean of the values of the variable Z_Y ;

$\hat{Z}_Y$ is a prediction linear regression equation result;

α is a significance level;

β_2 is a multivariate kurtosis;

γ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\gamma = (\gamma_Y, \gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_k)^T$;

ε is a Gaussian random variable which defines residuals, $\varepsilon \sim N(0,1)$;

η is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\eta = \text{diag}(\eta_Y, \eta_1, \dots, \eta_k)$;

λ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\lambda = \text{diag}(\lambda_Y, \lambda_1, \dots, \lambda_k)$;

ν is a number of degrees of freedom;

Σ is a covariance matrix, $\Sigma = [\Sigma_{ij}]$;

ϕ is a vector of parameters of the Johnson multivariate translation, $\phi = (\phi_Y, \phi_1, \phi_2, \dots, \phi_k)^T$;

ψ is a vector of multivariate normalizing transformation, $\psi = \{\psi_Y, \psi_1, \psi_2, \dots, \psi_k\}^T$.

INTRODUCTION

Java is a programming language and computing platform first released by Sun Microsystems in 1995 (<https://www.java.com>). Now Java is used practically everywhere from laptops to datacenters, game consoles to supercomputers, cell phones to the Internet, including information systems. Software size is one of the most important internal metrics of software including software of open-source Java-based information systems.

The information obtained from estimating the software size are useful for predicting the software development effort by such well-known model as COCOMO II. This leads to the need to develop appropriate models to estimate the software size [1–4].

The paper [2] proposed the linear regression equations for estimating the software size of some programming languages including Java. The proposed equation is constructed by multiple linear regression analysis on the basis of the metrics that can be measured from conceptual data model based a class diagram. However, there are four basic assumptions that justify the use of linear regression models, one of which is normality of the error distribution. But this assumption is valid only in particular cases. This leads to the need to use the non-linear regression models including for estimating the software size of Java-based open-source information systems.

The object of study is the process of estimating the software size of open-source Java-based information systems.

The subject of study is the non-linear regression models to estimate the software size of open-source Java-based information systems.

The known regression equation for estimating the software size of open-source Java-based information systems [2] is linear and generally have large widths of confidence and prediction intervals.

The purpose of the work is to construct the non-linear regression model for estimating the software size of open-source Java-based information systems. The software size prediction results by constructed model should be better in comparison with other regression models, both linear and nonlinear, primarily on such standard evaluations as the multiple coefficient of determination and mean magnitude of relative error.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose given the original sample as the four-dimensional non-Gaussian data set: actual software size in the thousand lines of code (KLOC) Y , the total number of classes X_1 , the total number of relationships X_2 and the average number of attributes per class X_3 in conceptual data model from N information systems developed using the Java programming language with JSP, HTML and SQL. Suppose that there are bijective multivariate normalizing transformation of non-Gaussian random vector $\mathbf{P} = \{Y, X_1, X_2, \dots, X_k\}^T$ to Gaussian random vector $\mathbf{T} = \{Z_Y, Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}^T$ is given by

$$\mathbf{T} = \psi(\mathbf{P}) \quad (1)$$

and the inverse transformation for (1)

$$\mathbf{P} = \psi^{-1}(\mathbf{T}). \quad (2)$$

It is required to build the non-linear regression model in the form $Y = Y(X_1, X_2, X_3, \varepsilon)$ on the basis of the transformations (1) and (2).

2 REVIEW OF THE LITERATURE

In paper [2] the linear regression equation for estimating the software size of open-source Java-based information systems was proposed in the form

$$\hat{Y} = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 X_1 + \hat{b}_2 X_2 + \hat{b}_3 X_3, \quad (3)$$

where $\hat{b}_0 = -10.121$, $\hat{b}_1 = 1.201$, $\hat{b}_2 = 1.439$ and $\hat{b}_3 = 0.726$.

A normalizing transformation is often a good way to build the models, equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions [5–8]. According to [7] transformations are made for essentially four purposes, two of which are: firstly, to obtain approximate normality for the distribution of the error term (residuals) or the

dependent random variable, secondly, to transform the response and/or the predictor in such a way that the strength of the linear relationship between new variables (normalized variables) is better than the linear relationship between dependent and independent random variables.

Well-known techniques for building the equations, confidence and prediction intervals of multivariate non-linear regressions are based on the univariate normalizing transformations (such as, the decimal logarithm, Box-Cox transformation), which do not take into account the correlation between random variables in the case of normalization of multivariate non-Gaussian data. Application of such univariate normalizing transformations for building the non-linear regression models does not always lead to good normality and linear relationship between normalized variables. This leads to the need to use the multivariate normalizing transformations.

In [9] the techniques to build the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data on the basis of the bijective multivariate normalizing transformations were proposed. The techniques consist of three steps. In the first step, a set of multivariate non-Gaussian data is normalized using a bijective multivariate normalizing transformation. In the second step, the equation, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data are built. In the third step, the equations, confidence and prediction intervals of non-linear regressions for multivariate non-Gaussian data are constructed on the basis of the equation, confidence and prediction intervals of linear regression for the normalized data and the multivariate normalizing transformation. Note there is no the error term in non-linear regression equation. The absence of the error term in non-linear regression equation does not allow modeling the random dependent variable for its prediction. This leads to the need to develop the non-linear regression model for estimating the software size of open-source Java-based information systems.

3 MATERIALS AND METHODS

After normalizing the non-Gaussian data by the transformation (1) the linear regression model is built for normalized data. The linear regression model for normalized data according to (1) will have the form

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \bar{Z}_Y + (\mathbf{Z}_X^+)^T \hat{\mathbf{b}} + \varepsilon. \quad (4)$$

After that the non-linear regression model is built on the basis of the linear regression model (4) for the normalized data and the transformations (1) and (2). The non-linear regression model will have the form

$$Y = \psi_Y^{-1} \left[\bar{Z}_Y + (\mathbf{Z}_X^+)^T \hat{\mathbf{b}} + \varepsilon \right]. \quad (5)$$

The technique to build a confidence interval of non-linear regression is based on transformations (1) and (2), and a confidence interval of linear regression for normalized data

$$\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \left[(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2} \quad (6)$$

where $S_{Z_Y}^2 = \frac{1}{\nu} \sum_{i=1}^N (Z_{Y_i} - \hat{Z}_{Y_i})^2$, $\nu = N - k - 1$; $(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+$ is the $k \times k$ matrix

$$(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ = \begin{pmatrix} S_{Z_1 Z_1} & S_{Z_1 Z_2} & \dots & S_{Z_1 Z_k} \\ S_{Z_1 Z_2} & S_{Z_2 Z_2} & \dots & S_{Z_2 Z_k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{Z_1 Z_k} & S_{Z_2 Z_k} & \dots & S_{Z_k Z_k} \end{pmatrix},$$

where $S_{Z_q Z_r} = \sum_{i=1}^N [Z_{q_i} - \bar{Z}_q][Z_{r_i} - \bar{Z}_r]$, $q, r = 1, 2, \dots, k$.

The confidence interval for non-linear regression is built on the basis of the interval (6) and inverse transformation (2)

$$\psi_Y^{-1} \left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \left[(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2} \right).$$

The technique to build a prediction interval is based on multivariate transformation (1), the inverse transformation (2) and a prediction interval for normalized data

$$\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \left[(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2} \quad (7)$$

The prediction interval for non-linear regression is built on the basis of the interval (7) and inverse transformation (2)

$$\psi_Y^{-1} \left(\hat{Z}_Y \pm t_{\alpha/2, \nu} S_{Z_Y} \left\{ 1 + \frac{1}{N} + (\mathbf{z}_X^+)^T \left[(\mathbf{Z}_X^+)^T \mathbf{Z}_X^+ \right]^{-1} (\mathbf{z}_X^+) \right\}^{1/2} \right).$$

For normalizing the multivariate non-Gaussian data, we use the Johnson translation system. In our case the Johnson normalizing translation is given by [10]

$$\mathbf{T} = \boldsymbol{\gamma} + \boldsymbol{\eta} \mathbf{h} \left[\lambda^{-1} (\mathbf{P} - \boldsymbol{\varphi}) \right] \sim N_m(\mathbf{0}_m, \boldsymbol{\Sigma}), \quad (8)$$

where $\mathbf{h}[(y_Y, y_1, \dots, y_k)] = \{h_Y(y_Y), h_1(y_1), \dots, h_k(y_k)\}^T$;
 $h_i(\cdot)$ is one of the translation functions

$$h = \begin{cases} \ln(y), & \text{for } S_L \text{ (log normal) family;} \\ \ln[y/(1-y)], & \text{for } S_B \text{ (bounded) family;} \\ \text{Arsh}(y), & \text{for } S_U \text{ (unbounded) family;} \\ y & \text{for } S_N \text{ (normal) family.} \end{cases} \quad (9)$$

Here $y = (X - \varphi)/\lambda$; $\text{Arsh}(y) = \ln(y + \sqrt{y^2 + 1})$. In our case X equals Y , X_1 , X_2 or X_3 respectively.

The equation, confidence and prediction intervals of non-linear regression to estimate the software size of open-source Java-based systems are constructed on the basis of the Johnson multivariate normalizing transformation for the four-dimensional non-Gaussian data set: actual software size in the thousand lines of code (KLOC) Y , the total number of classes X_1 , the total number of relationships X_2 and the average number of attributes per class X_3 in conceptual data model from 30 information systems developed using the Java programming language with JSP, HTML and SQL. Table 1 contains the data from [2] on four metrics of software for 30 open-source Java-based systems.

Table 1 – The data set and squared MDs

No	Y	X_1	X_2	X_3	Squared MD	
					univariate	multivariate
1	11.717	8	6	4.25	0.99	0.99
2	47.52	23	19	9.565	1.65	1.50
3	84.01	26	40	11.462	10.13	6.55
4	26.999	15	14	8.933	1.33	1.89
5	41.72	20	15	5.9	0.25	0.50
6	13.015	5	6	12.4	5.89	6.64
7	30.402	18	7	6.611	1.59	3.10
8	29.159	23	10	6.957	2.26	3.13
9	53.443	28	25	4.179	3.53	4.02
10	18.694	13	9	6.615	0.39	0.89
11	26.384	16	6	5.125	2.23	4.06
12	38.721	19	16	6.579	0.19	0.19
13	75.643	26	30	6.154	1.87	2.74
14	46.72	21	24	6.048	1.31	1.66
15	6.413	7	5	4.143	2.41	6.07
16	79.534	20	37	4.85	7.06	8.20
17	36.343	18	17	5.333	0.35	0.47
18	59.684	22	31	6.182	2.49	2.62
19	50.454	15	20	11.6	2.51	3.35
20	3.055	4	1	7	10.83	7.10
21	63.257	34	17	3.971	9.16	8.29
22	91.28	35	28	13.571	17.73	11.22
23	32.707	11	17	7.545	0.98	1.54
24	11	5	5	3.6	6.15	6.36
25	5.543	6	4	3.833	2.54	5.16
26	22.686	12	11	6.667	0.11	0.22
27	3.911	3	2	6.667	7.26	5.52
28	20.841	14	7	3	8.17	7.21
29	9.269	6	5	3.5	3.23	2.82
30	7.732	7	2	11.143	5.42	5.98

For detecting the outliers in the data from Table 1 we use the technique based on multivariate normalizing transformations and the squared Mahalanobis distance (MD) [11]. There are no outliers in the data from Table 1 for 0.005 significance level and the Johnson multivariate transformation (8) for S_B family. The same result was obtained in [12] for the transformation (8) for S_U family. In [2] it was also assumed that the data contains no outliers. The values of squared MD for normalized data by the Johnson univariate transformation (9) for S_B family from Table 1 indicate the data of system 22 is multivariate outlier, since for this data row the squared MD equals to 17.73 is greater than the value of the quantile of the Chi-Square distribution, which equals to 14.86 for 0.005 significance level. Although note that without using normalization, the data of system 11 is multivariate outlier, since for this data row the squared MD equals to 15.44.

Parameters of the multivariate transformation (9) for S_B family were estimated by the maximum likelihood method. Estimators for parameters of the transformation (9) are: $\hat{\gamma}_Y = 9.63091$, $\hat{\gamma}_1 = 15.5355$, $\hat{\gamma}_2 = 25.4294$, $\hat{\gamma}_3 = 0.72801$, $\hat{\eta}_Y = 1.05243$, $\hat{\eta}_1 = 1.58306$, $\hat{\eta}_2 = 2.54714$, $\hat{\eta}_3 = 0.54312$, $\hat{\phi}_Y = -1.4568$, $\hat{\phi}_1 = -1.8884$, $\hat{\phi}_2 = -6.9746$, $\hat{\phi}_3 = 3.2925$, $\hat{\lambda}_Y = 153102.605$, $\hat{\lambda}_1 = 243051.0$, $\hat{\lambda}_2 = 311229.5$ and $\hat{\lambda}_3 = 13.90$. The sample covariance matrix S_N of the T is used as the approximate moment-matching estimator of Σ

$$S_N = \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.9514 & 0.9333 & 0.1574 \\ 0.9514 & 1.0000 & 0.9006 & 0.1345 \\ 0.9333 & 0.9006 & 1.0000 & 0.0554 \\ 0.1574 & 0.1345 & 0.0554 & 1.0000 \end{pmatrix}.$$

After normalizing the non-Gaussian data by the multivariate transformation (9) for S_B family the linear regression model (3) is built for normalized data

$$Z_Y = \hat{Z}_Y + \varepsilon = \hat{b}_0 + \hat{b}_1 Z_1 + \hat{b}_2 Z_2 + \hat{b}_3 Z_3 + \varepsilon. \quad (10)$$

Parameters of the linear regression model (10) were estimated by the least square method. Estimators for parameters of the equation (10) are such: $\hat{b}_0 = 1.02 \cdot 10^{-5}$, $\hat{b}_1 = 0.56085$, $\hat{b}_2 = 0.42491$, $\hat{b}_3 = 0.05846$.

After that the non-linear regression model (4) is built

$$Y = \hat{\phi}_Y + \hat{\lambda}_Y \left[1 + e^{-(\hat{Z}_Y + \varepsilon - \hat{\gamma}_Y)/\hat{\eta}_Y} \right]^{-1}. \quad (11)$$

where $Z_j = \gamma_j + \eta_j \ln \frac{X_j - \varphi_j}{\varphi_j + \lambda_j - X_j}$, $\varphi_j < X_j < \varphi_j + \lambda_j$, $j = 1, 2, 3$.

The model (11) is the non-linear regression model to estimate the software size of open-source Java-based information systems.

4 EXPERIMENTS

For comparison of the model (11) with other models two non-linear regression models are built on the basis of the data from Table 1 and two univariate normalizing transformations: the decimal logarithm transformation and the Johnson transformation.

The non-linear regression model is constructed on the basis of the linear regression model (4) for the normalized data and the decimal logarithm transformation

$$Y = 10^{\varepsilon + \hat{b}_0} X_1^{\hat{b}_1} X_2^{\hat{b}_2} X_3^{\hat{b}_3}. \quad (12)$$

where the estimators for parameters of the model (12) are:

$$\hat{b}_0 = -0.04536, \quad \hat{b}_1 = 0.64235, \quad \hat{b}_2 = 0.56305 \quad \text{and} \quad \hat{b}_3 = 0.18045.$$

The non-linear regression model is constructed on the basis of the linear regression model (4) for the normalized data and the Johnson univariate transformation for S_B family. In this case the estimators for parameters of the model (11) are: $\hat{\gamma}_Y = 0.46387$, $\hat{\gamma}_1 = 0.38093$, $\hat{\gamma}_2 = 0.60545$, $\hat{\gamma}_3 = 0.65592$, $\hat{\eta}_Y = 0.50326$,

$$\begin{aligned} \hat{\eta}_1 &= 0.62689, & \hat{\eta}_2 &= 0.62215, & \hat{\eta}_3 &= 0.72789, \\ \hat{\phi}_Y &= 2.817, & \hat{\phi}_1 &= 2.634, & \hat{\phi}_2 &= 0.700, & \hat{\phi}_3 &= 2.839, \\ \hat{\lambda}_Y &= 89.930, & \hat{\lambda}_1 &= 33.711, & \hat{\lambda}_2 &= 41.428, & \hat{\lambda}_3 &= 11.780, \\ \hat{b}_0 &= 0, & \hat{b}_1 &= 0.46976, & \hat{b}_2 &= 0.53539 & \text{and} & \hat{b}_3 &= 0.11397. \end{aligned}$$

The computer program implementing the constructed models (11) and (12) was developed to conduct experiments. The program was written in the sci-language for the Scilab system. Scilab (<http://www.scilab.org>) is the free and open source software, the alternative to commercial packages for system modeling and simulation packages such as MATLAB and MATRIXx.

5 RESULTS

If the Gaussian random variable ε equals zero the regression models (11) and (12) are the non-linear regression equations for which the prediction results for values of components of vector $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, X_3\}$ from Table 1 and values of MRE are shown in the Table 2. The prediction results by model (11) and values of MRE are shown in the Table 2 for two cases: the Johnson univariate and multivariate normalizing transformations. Table 2 also contains the prediction results by linear regression equation (3) from [2] for values of components of vector $\mathbf{X}$ from Table 1 and MRE values. Note, all prediction results by linear regression equation (3), non-linear regression models (11) and (12) are positive.

Table 2 – The prediction results and confidence intervals of regressions for 30 open-source Java-based systems

No	Linear regression				Non-linear regression											
					univariate normalizing transformation								the Johnson multivariate normalizing transformation			
	$\hat{Y}$	RME	LB	UB	$\hat{Y}$	RME	LB	UB	$\hat{Y}$	RME	LB	UB	$\hat{Y}$	RME	LB	UB
1	11.205	0.0437	8.301	14.109	12.197	0.0410	10.923	13.620	10.671	0.0893	8.989	12.756	11.978	0.0223	10.322	13.263
2	51.784	0.0897	48.396	55.171	53.248	0.1205	47.404	59.812	55.919	0.1768	49.992	61.568	52.316	0.1009	48.849	57.132
3	86.989	0.0355	79.427	94.551	90.515	0.0774	77.073	106.302	87.586	0.0426	83.866	89.805	87.262	0.0387	82.880	89.624
4	34.523	0.2787	31.823	37.223	33.653	0.2465	30.525	37.102	35.152	0.3020	30.502	40.115	33.719	0.2489	31.087	37.648
5	39.765	0.0469	36.726	42.804	39.052	0.0639	35.787	42.615	40.333	0.0333	35.838	44.986	38.969	0.0659	35.830	42.245
6	13.516	0.0385	6.843	20.188	10.941	0.1593	8.918	13.424	10.900	0.1625	7.968	15.255	11.602	0.1086	9.430	15.320
7	26.365	0.1328	21.326	31.404	24.255	0.2022	21.099	27.884	24.630	0.1898	20.414	29.485	23.956	0.2120	20.880	26.937
8	36.937	0.2668	30.570	43.305	35.027	0.2012	30.424	40.326	37.853	0.2982	31.806	44.302	35.358	0.2126	31.382	39.866
9	62.516	0.1698	57.570	67.462	60.729	0.1363	52.927	69.681	64.288	0.2029	57.204	70.537	62.131	0.1626	56.682	67.124
10	23.243	0.2433	20.890	25.595	22.674	0.2129	21.041	24.433	22.251	0.1903	19.396	25.446	22.451	0.2009	20.399	24.563
11	21.446	0.1872	16.885	26.006	19.692	0.2536	17.110	22.665	18.897	0.2838	15.560	22.881	19.239	0.2708	16.405	21.492
12	40.496	0.0459	38.185	42.808	39.963	0.0321	36.836	43.355	41.354	0.0680	37.021	45.812	39.831	0.0287	36.978	43.139
13	68.744	0.0912	64.647	72.842	68.808	0.0904	61.557	76.912	70.832	0.0636	65.599	75.335	68.708	0.0917	64.545	72.542
14	54.028	0.1564	50.795	57.260	52.739	0.1288	47.735	58.266	55.262	0.1828	49.875	60.436	53.278	0.1404	49.565	57.466
15	8.487	0.3234	5.441	11.534	10.056	0.5681	8.926	11.329	8.703	0.3571	7.338	10.443	9.863	0.5379	8.468	10.966
16	70.670	0.1115	61.411	79.928	62.671	0.2120	53.424	73.519	73.437	0.0767	64.730	79.996	70.101	0.1186	64.881	77.099
17	39.831	0.0960	37.362	42.300	38.454	0.0581	35.184	42.028	39.331	0.0822	34.828	44.018	38.677	0.0642	35.425	41.986
18	65.401	0.0958	59.939	70.864	63.010	0.0557	55.949	70.961	66.982	0.1223	60.723	72.447	64.714	0.0843	60.331	69.576
19	45.094	0.1062	39.943	50.244	43.124	0.1453	37.198	49.994	47.605	0.0565	39.805	55.417	44.662	0.1148	40.487	51.875
20	1.200	0.6071	-2.531	4.932	3.118	0.0206	2.525	3.850	3.430	0.1227	3.180	3.849	3.173	0.0388	2.947	3.480
21	58.055	0.0822	47.956	68.154	54.860	0.1328	45.880	65.597	70.088	0.1080	58.879	78.528	62.201	0.0167	56.926	73.899
22	82.053	0.1011	75.043	89.064	92.398	0.0123	77.034	110.827	88.089	0.0350	84.129	90.284	88.102	0.0348	84.265	91.745
23	33.031	0.0099	28.529	37.532	29.837	0.0878	26.096	34.113	31.165	0.0471	26.305	36.522	31.086	0.0496	27.987	35.574
24	5.692	0.4826	1.975	9.408	7.899	0.2819	6.666	9.359	6.502	0.4089	5.391	8.063	7.677	0.3021	6.421	8.778
25	5.622	0.0143	2.367	8.878	7.921	0.4290	6.917	9.071	6.795	0.2259	5.745	8.199	7.745	0.3972	6.621	8.678
26	24.958	0.1002	22.712	27.204	24.148	0.0644	22.338	26.104	23.874	0.0524	20.862	27.219	24.192	0.0664	22.075	26.610
27	1.197	0.6938	-2.722	5.117	3.796	0.0295	3.169	4.547	3.548	0.0929	3.253	4.038	3.763	0.0378	3.404	4.254
28	18.942	0.0911	14.883	23.001	17.897	0.1413	15.224	21.039	13.423	0.3559	9.477	19.245	15.903	0.2369	11.765	18.810
29	6.820	0.2642	3.356	10.284	8.835	0.0468	7.597	10.274	7.279	0.2147	5.991	9.053	8.532	0.0795	7.117	9.686
30	9.248	0.1960	3.644	14.851	7.176	0.0719	4.599	11.199	7.022	0.0918	5.480	9.390	7.094	0.0825	5.826	8.605

MMRE and PRED(0.25) are accepted as standard evaluations of prediction results by regression models and equations. The acceptable values of MMRE and PRED(0.25) are not more than 0.25 and not less than 0.75 respectively. The acceptable value of R^2 is approximately the same as for PRED(0.25). The values of R^2 , MMRE and PRED(0.25) equal respectively 0.9621, 0.1734 and 0.7667 for linear regression equation (3), and equal respectively 0.9541, 0.1441 and 0.8667 for the model (12), and equal respectively 0.9574, 0.1579 and 0.8000 for the model (11) for the Johnson univariate transformation. The values of R^2 , MMRE and PRED(0.25) are better for the model (11) for the Johnson multivariate transformation in comparison with all previous equations, and are 0.9672, 0.1389 and 0.8667 respectively.

The confidence and prediction intervals of non-linear regression are defined for the data from Table 1. Table 2 contains the lower (LB) and upper (UB) bounds of the confidence intervals of linear and non-linear regressions on the basis of univariate and multivariate transformations respectively for 0.05 significance level. Note the lower bounds of the confidence interval of linear regression (3) from [2] are negative for the two rows of data: 20 and 27. All the lower bounds of the confidence interval of non-linear regressions are positive. The widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than for linear regression (3) from [2] for 21 rows of data: 1, 3, 6–8, 10, 11, 13, 15, 16, 18, 20–25, 27–30. Also the widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less for more data rows than for non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. The widths of the confidence interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than following the decimal logarithm univariate transformation for 24 rows of data: 2–5, 7–9, 11–14, 16–25, 27, 29 and 30. And ones are less than following the Johnson univariate transformation for 27 rows of data: 1, 2, 4–21, 23–26, 28–30. Approximately the same results are obtained for the prediction intervals of regressions.

Table 3 contains the lower (LB) and upper (UB) bounds of the prediction intervals of linear and non-linear regressions on the basis of univariate and multivariate transformations respectively for 0.05 significance level. Note the lower bounds of the prediction interval of linear regression (3) are negative for the eight rows of data: 1, 15, 20, 24, 25, 27, 29 and 30. All the lower bounds of the prediction interval of non-linear regressions are positive. The widths of the prediction interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than for linear regression (3) from [2] for 16 rows of data: 1, 3, 6, 7, 10, 11, 15, 20, 22, 24–30. Also the widths of the prediction interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less for more data rows than for non-

linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. The widths of the prediction interval of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less than following the decimal logarithm univariate transformation for 17 rows of data: 2–5, 8, 9, 12–14, 16–22 and 27. And ones are less than following the Johnson univariate transformation for 26 rows of data: 1, 2, 4–19, 21, 23–26, 28–30.

Table 3 – The bounds of the prediction intervals

No	Bounds for linear regression		Bounds for non-linear regression			
			Johnson univariate transformation		Johnson multivariate transformation	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
1	-0.004	22.413	5.679	22.412	7.536	19.277
2	40.441	63.127	32.573	75.467	36.600	68.504
3	73.784	100.194	77.736	91.114	73.863	96.264
4	23.365	45.680	17.436	58.472	21.814	48.847
5	28.521	51.009	20.726	63.360	25.763	54.772
6	0.799	26.232	5.559	24.105	7.061	19.398
7	14.424	38.305	11.701	46.283	14.924	36.873
8	24.378	49.497	18.875	61.455	22.764	51.145
9	50.614	74.418	40.607	80.655	45.398	77.523
10	12.164	34.321	10.693	42.556	14.102	34.502
11	9.699	33.192	9.052	37.791	11.900	30.337
12	29.427	51.566	21.431	64.236	26.458	55.673
13	57.169	80.319	49.028	83.854	52.398	82.637
14	42.730	65.325	32.094	74.958	37.508	69.345
15	-2.759	19.733	4.920	18.108	6.290	15.899
16	56.425	84.914	51.026	85.596	52.840	84.458
17	28.727	50.935	20.068	62.454	25.536	54.455
18	53.275	77.527	43.924	81.998	48.094	79.560
19	33.105	57.082	25.246	70.052	29.796	61.411
20	-10.250	12.651	3.009	4.748	2.516	4.443
21	43.250	72.859	45.506	84.384	44.137	78.697
22	69.156	94.951	78.586	91.334	74.127	97.180
23	21.307	44.755	15.088	54.334	19.782	45.949
24	-5.754	17.138	4.077	13.054	4.988	12.419
25	-5.682	16.927	4.203	13.643	5.062	12.421
26	13.902	36.014	11.471	44.858	15.245	36.852
27	-10.316	12.711	3.048	5.105	2.834	5.520
28	7.380	30.503	6.446	29.640	9.577	26.119
29	-4.546	18.186	4.360	14.963	5.483	13.826
30	-2.942	21.438	4.206	14.773	4.601	11.617

Following [13] multivariate kurtosis β_2 is estimated for the data on metrics of software from Table I and the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations for S_B family. The estimator of multivariate kurtosis given by [13]

$$\hat{\beta}_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left\{ (\mathbf{z}_i - \bar{\mathbf{z}})^T \mathbf{S}_N^{-1} (\mathbf{z}_i - \bar{\mathbf{z}}) \right\}^2. \quad (13)$$

In our case, in the formula (13), the vectors $\mathbf{Z}$ and $\bar{\mathbf{Z}}$ should be replaced by the vectors $\mathbf{P}$ and $\bar{\mathbf{P}}$ or $\mathbf{T}$ and $\bar{\mathbf{T}}$, respectively, for the initial (non-Gaussian) or normalized data. It is known that $\beta_2 = m(m+2)$ holds under multivariate normality. The given equality is a necessary

condition for multivariate normality. In our case $\beta_2 = 24$. The estimators of multivariate kurtosis equal 27.17, 22.38, 32.05 and 24.02 for the data from Table 1, the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation, the Johnson univariate and multivariate transformations respectively. The values of these estimators indicate that the necessary condition for multivariate normality is practically performed for the normalized data on the basis of the decimal logarithm transformation and the Johnson multivariate transformation, it does not hold for other data.

6 DISCUSSION

As it evident from the Table 2 and Table 3, the values of lower bounds of the confidence and prediction intervals of linear regression (3) from [2] for estimating the software size of open-source Java-based information systems are negative for some data rows. In our opinion, the presence of negative values may be explained by two reasons. Firstly, for the initial data from Table 1, four basic assumptions that justify the use of linear regression model, one of which is normality of the error distribution, are not valid. Secondly, there is reason to reject the hypothesis that the sample of data from Table 1 comes from a multivariate normal distribution. Note all the lower bounds of the confidence and prediction intervals of non-linear regressions are positive.

Also note that in our case for the data from Table 1, the poor normalization of multivariate non-Gaussian data using the Johnson univariate transformation leads to an increase in the widths of the confidence and prediction intervals of non-linear regression for a larger number of data rows compared to both the Johnson multivariate transformation and the decimal logarithm transformation.

The widths of the confidence and prediction intervals of non-linear regression on the basis of the Johnson multivariate transformation are less for more data rows than for linear regression and non-linear regressions following the univariate transformations, both decimal logarithm and the Johnson. Also the values of R^2 , MMRE and PRED(0.25) are better for the model (11) for the Johnson multivariate transformation in comparison with all previous equations and models, both linear and non-linear, based on univariate transformations. This may be explained best multivariate normalization and the fact that there is no reason to reject the hypothesis that the sample of data, which normalized by the Johnson multivariate transformation for S_B family, comes from a multivariate normal distribution.

CONCLUSIONS

The important problem of increase of confidence of software size estimation for open-source Java-based information systems is solved.

The scientific novelty of obtained results is that the techniques to build the non-linear regression model for multivariate non-Gaussian data on the basis of the multivariate normalizing transformations is firstly

proposed. The non-linear regression model to estimate the software size of open-source Java-based information systems is constructed on the basis of the Johnson multivariate transformation for S_B family. This model, in comparison with other regression models (both linear and non-linear), has a larger multiple coefficient of determination, a smaller value of the mean magnitude of relative error, a larger value of percentage of prediction and smaller widths of the confidence and prediction intervals of non-linear regression.

The practical significance of obtained results is that the software realizing the constructed model is developed in the sci-language for Scilab. The experimental results allow to recommend the constructed model for use in practice.

Prospects for further research may include the application of other multivariate normalizing transformations and data sets to construct the non-linear regression model for estimating the software size of open-source Java-based information systems.

REFERENCES

1. Kaczmarek J., Kucharski M. Size and effort estimation for applications written in Java, *Information and Software Technology*, 2004, Vol. 46, Issue 9, pp. 589–601. DOI: 10.1016/j.infsof.2003.11.001
2. Tan H. B. K., Zhao Y., Zhang H. Estimating LOC for information systems from their conceptual data models, *Software Engineering : the 28th International Conference (ICSE '06)*, Shanghai, China, May 20–28, 2006 : proceedings, pp. 321–330. DOI: 10.1145/1134285.1134331
3. Tan H. B. K., Zhao Y., Zhang H. Conceptual data model-based software size estimation for information systems, *Transactions on Software Engineering and Methodology*, 2009, Vol. 19, Issue 2, October 2009, Article No. 4. DOI: 10.1145/1571629.1571630
4. Kiewkanya M., Surak S. Constructing C++ software size estimation model from class diagram, *Computer Science and Software Engineering : 13th International Joint Conference, Khon Kaen, Thailand, July 13–15, 2016 : proceedings*, pp. 1–6. DOI: 10.1109/JCSSE.2016.7748880
5. Bates D. M., Watts D. G. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications. New York, John Wiley & Sons, 1988, 384 p. DOI:10.1002/9780470316757
6. Seber G.A.F., Wild C. J. Nonlinear Regression. New York, John Wiley & Sons, 1989, 768 p. DOI: 10.1002/0471725315
7. Ryan T.P. Modern regression methods. New York, John Wiley & Sons, 1997, 529 p. DOI: 10.1002/9780470382806
8. Johnson R. A., Wichern D. W. Applied Multivariate Statistical Analysis. Pearson Prentice Hall, 2007, 800 p.
9. Prykhodko S. B. Developing the software defect prediction models using regression analysis based on normalizing transformations, *Modern Problems in Testing of the Applied Software : the Research and Practice Seminar (PTAS-2016)*, Poltava, Ukraine, May 25–26, 2016 : abstracts, pp. 6–7.
10. Stanfield P. M., Wilson J. R., Mirka G. A., Glasscock N. F., Psihogios J. P., Davis J. R. Multivariate input modeling with Johnson distributions, The 28th Winter simulation conference WSC'96, Coronado, CA, USA, December 8–11, 1996 : proceedings, ed. S. Andradottir, K. J. Healy, D.H. Withers, and B. L. Nelson, *IEEE Computer Society Washington, DC, USA*, 1996, pp. 1457–1464.

11. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pugachenko K. Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data on the basis of Normalizing Transformations, *Electrical and Computer Engineering : the 2017 IEEE First Ukraine Conference (UKRCON) «Celebrating 25 Years of IEEE Ukraine Section»*, Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017 : proceedings, pp. 846–849. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100366
 12. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Application of the Squared Mahalanobis Distance for Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data, *Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering : 14th International Conference on Advanced Trends (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, February 20–24, 2018 : proceedings, pp. 962–965. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336353
 13. Mardia K. V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications, *Biometrika*, 1970, 57, pp. 519–530. DOI: 10.1093/biomet/57.3.519
- Received 18.05.2018.
Accepted 05.06.2018.

УДК 004.412:519.237.5

НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ РОЗМІРУ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ З ВІДКРИТИМ КОДОМ НА JAVA

Приходько Н. В. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри фінансів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Приходько С. Б. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проблема оцінювання розміру програмного забезпечення на ранній стадії програмного проекту є важливою, оскільки інформація, отримана при оцінюванні розміру програмного забезпечення, використовується для прогнозування трудомісткості по розробці програмного забезпечення, включаючи інформаційні системи на базі Java з відкритим вихідним кодом. Об'єктом дослідження є процес оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java. Предметом дослідження є моделі регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java. Мета роботи – створення моделі нелінійної регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java на основі багатовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона.

Метод. Моделі, довірчі інтервали та інтервали передбачення багатовимірної нелінійної регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java побудовані на основі багатовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для негаусівських даних за допомогою відповідних методів. Методи побудови моделей, рівнянь, довірчих інтервалів і інтервалів передбачення нелінійних регресій засновані на багатовимірному нелінійному регресійному аналізі з використанням багатовимірних нормалізуючих перетворень. Розглянуто відповідні методи. Ці методи дозволяють враховувати кореляцію між випадковими величинами в разі нормалізації багатовимірних негаусівських даних. Загалом, це призводить до зменшення середньої величини відносної похибки, ширини довірчих інтервалів і інтервалів передбачення в порівнянні з лінійними моделями або нелінійними моделями, побудованими з використанням одновимірних нормалізуючих перетворень.

Результати. Здійснено порівняння побудованої моделі з моделями лінійної регресії та нелінійними регресіями на основі десятичного логарифму та одновимірного перетворення Джонсона.

Висновки. Модель нелінійної регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java побудована на основі багатовимірного перетворення Джонсона для сімейства S_B . Ця модель в порівнянні з іншими регресійними моделями (як лінійними, так і нелінійними) має більший множинний коефіцієнт детермінації і менше значення середньої величини відносної похибки. Перспективи подальших досліджень можуть включати застосування інших багатовимірних нормалізуючих перетворень і наборів даних для побудови моделі нелінійної регресії для оцінювання розміру програмного забезпечення інформаційних систем з відкритим вихідним кодом на Java.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: оцінювання розміру програмного забезпечення, інформаційна система на основі Java, модель нелінійної регресії, одновимірне нормалізуюче перетворення, негаусівські дані.

УДК 004.412:519.237.5

НЕЛИНЕЙНАЯ РЕГРЕССИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗМЕРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМ С ОТКРЫТЫМ КОДОМ НА JAVA

Приходько Н. В. – канд. екон. наук, доцент, доцент кафедри фінансів Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

Приходько С. Б. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв, Україна.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проблема оценки размера программного обеспечения на ранней стадии программного проекта важна, поскольку информация, полученная при оценке размера программного обеспечения, используется для прогнозирования трудоемкости по разработке программного обеспечения, включая информационные системы на базе Java с открытым исходным кодом. Объект исследования – процесс оценки размера программного обеспечения информационных систем с

© Prykhodko N. V., Prykhodko S. B., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-17

открытым исходным кодом на Java. Предмет исследования – модели регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем с открытым исходным кодом на Java. Цель работы – создание модели нелинейной регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем с открытым исходным кодом на Java на основе многомерного нормализующего преобразования Джонсона.

Метод. Модели, доверительные интервалы и интервалы прогнозирования многомерной нелинейной регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем с открытым исходным кодом на Java построены на основе многомерного нормализующего преобразования Джонсона для негауссовских данных с помощью соответствующих методов. Методы построения моделей, уравнений, интервалов доверия и прогнозирования нелинейных регрессий основаны на многократном нелинейном регрессионном анализе с использованием многомерных нормализующих преобразований. Рассмотрены соответствующие методы. Методы позволяют учитывать корреляцию между случайными величинами в случае нормализации многомерных негауссовских данных. В общем, это приводит к уменьшению средней величины относительной погрешности, ширины доверительных интервалов и интервалов предсказания по сравнению с линейными моделями или нелинейными моделями, построенными с использованием одномерных нормализующих преобразований.

Результаты. Проведено сравнение построенной модели с линейной моделью и нелинейными регрессионными моделями на основе десятичного логарифма и одномерного преобразования Джонсона.

Выводы. Модель нелинейной регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем с открытым исходным кодом на Java построена на основе многомерного преобразования Джонсона для семейства S_B . Эта модель по сравнению с другими регрессионными моделями (как линейными, так и нелинейными) имеет больший множественный коэффициент детерминации и меньшее значение средней величины относительной погрешности. Перспективы дальнейших исследований могут включать применение других многомерных нормализующих преобразований и наборов данных для построения модели нелинейной регрессии для оценки размера программного обеспечения информационных систем с открытым исходным кодом на Java.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оценка размера программного обеспечения, информационная система на основе Java, модель нелинейной регрессии, одномерное нормализующее преобразование, негауссовские данные.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Kaczmarek J. Size and effort estimation for applications written in Java / J. Kaczmarek, M. Kucharski // Information and Software Technology. – 2004. – Vol. 46, Issue 9. – P. 589–601. DOI: 10.1016/j.infsof.2003.11.001
2. Tan H. B. K. Estimating LOC for information systems from their conceptual data models / H. B. K. Tan, Y. Zhao, H. Zhang // Software Engineering : the 28th International Conference (ICSE '06), Shanghai, China, May 20–28, 2006 : proceedings. – P. 321–330. DOI: 10.1145/1134285.1134331
3. Tan H. B. K. Conceptual data model-based software size estimation for information systems / H. B. K. Tan, Y. Zhao, H. Zhang // Transactions on Software Engineering and Methodology. – 2009. – Vol. 19, Issue 2. – October 2009. – Article No. 4. DOI: 10.1145/1571629.1571630
4. Kiewkanya M. Constructing C++ software size estimation model from class diagram / M. Kiewkanya, S. Surak // Computer Science and Software Engineering : 13th International Joint Conference, Khon Kaen, Thailand, July 13–15, 2016 : proceedings. – P. 1–6. DOI: 10.1109/JCSSE.2016.7748880
5. Bates D. M. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications / D. M. Bates, D. G. Watts. – New York : John Wiley & Sons, 1988. – 384 p. DOI:10.1002/9780470316757
6. Seber G. A. F. Nonlinear Regression / G. A. F. Seber, C. J. Wild. – New York : John Wiley & Sons, 1989. – 768 p. DOI: 10.1002/0471725315
7. Ryan T. P. Modern regression methods / T. P. Ryan. – New York : John Wiley & Sons, 1997. – 529 p. DOI: 10.1002/9780470382806
8. Johnson R. A. Applied Multivariate Statistical Analysis / R. A. Johnson, D. W. Wichern. – Pearson Prentice Hall, 2007. – 800 p.
9. Prykhodko S.B. Developing the software defect prediction models using regression analysis based on normalizing transformations / S. B. Prykhodko // Modern Problems in Testing of the Applied Software : the Research and Practice Seminar (PTTAS-2016), Poltava, Ukraine, May 25–26, 2016 : abstracts. – P. 6–7.
10. Stanfield P. M. Multivariate input modeling with Johnson distributions / [P. M. Stanfield, J. R. Wilson, G. A. Mirka, et al.] // the 28th Winter simulation conference WSC'96, Coronado, CA, USA, December 8–11, 1996 : proceedings, ed. S. Andradottir, K. J. Healy, D. H. Withers, and B. L. Nelson. – IEEE Computer Society Washington, DC, USA, 1996. – P. 1457–1464.
11. Prykhodko S. Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data on the basis of Normalizing Transformations / S. Prykhodko, N. Prykhodko, L. Makarova, K. Pugachenko // Electrical and Computer Engineering : the 2017 IEEE First Ukraine Conference (UKRCON) «Celebrating 25 Years of IEEE Ukraine Section», Kyiv, Ukraine, May 29 – June 2, 2017 : proceedings. – P. 846–849. DOI: 10.1109/UKRCON.2017.8100366
12. Application of the Squared Mahalanobis Distance for Detecting Outliers in Multivariate Non-Gaussian Data / [S. Prykhodko, N. Prykhodko, L. Makarova, A. Pukhalevych] // Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering : 14th International Conference on Advanced Trends (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20–24, 2018 : proceedings. – P. 962–965. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336353
13. Mardia K. V. Measures of multivariate skewness and kurtosis with applications / K. V. Mardia // Biometrika. – 1970. – 57. – P. 519–530. DOI: 10.1093/biomet/57.3.519

ВИБІР ПЕРЕВАЖНОГО АЛГОРИТМУ ВБУДОВУВАННЯ ЦИФРОВИХ ВОДЯНИХ ЗНАКІВ В ВІДЕОФАЙЛИ

Шостак Н. В. – аспірант кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

Безрук В. М. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

Астраханцев А. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційно-мережної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. За останній час значно збільшилась кількість атак на інтелектуальну власність, яка, відповідно до результатів опитувань, займає провідне місце у структурі сучасного суспільства. Всебічний розвиток країни неможливий без генерації власних інтелектуальних даних і їх захисту, який на тлі інформаційних війн є найбільш актуальною задачею в сучасному суспільстві. Оскільки інтелектуальні дані мають не лише генеруватися та зберігатися а й передаватися по відкритих каналах зв'язку, то підвищується важливість та актуальність дослідження стійкості методів захисту інтелектуальних даних до дії завад в каналах. Вирішенню цієї актуальної задачі присвячена дана робота.

Мета роботи – визначення стеганографічного алгоритму приховування цифрового водяного знаку в відеоконтєйнері, оптимального за критеріями швидкодії, стійкості до атак, прихованості та пропускну здатності за допомогою програмного моделювання та методу аналізу ієрархій.

Метод. Досліджені алгоритми вбудовування цифрових водяних знаків в рухомі зображення. Останнім часом багато уваги приділяється алгоритмам вбудовування, що мають такі властивості, як стійкість до атак та прихованість вбудованої інформації. Ці алгоритми можна класифікувати за типом області, в яку вбудовується або вилучається цифровий водяний знак, їх пропускну здатності, продуктивності в режимі реального часу та стійкості до конкретних типів атак. Існуючі алгоритми вбудовування в відео можна умовно поділити на три основні групи, в залежності від області в яку вбудовується ЦВЗ: методи вбудовування в просторовій області, в область перетворень та методи вбудовування в відео, що стиснене за стандартом MPEG. Алгоритми вбудовування ЦВЗ в просторовій області застосовуються для нестисненого відео. ЦВЗ, що вбудовується, зазвичай додається до компоненту яскравості та деяких компонентів кольорів, або тільки до компонентів кольорів. В алгоритмах вбудовування в область перетворень, водяний знак, розподіляється по області перетворення і який важко видалити після вбудовування. Для алгоритмів в області перетворень, існує кілька класів методів, що базуються на різних функціях перетворення, основними з яких є дискретне косинусне перетворення, дискретне вейвлет-перетворення та дискретне перетворення Фур'є.

Результати. За результатами розрахунків визначені оптимальні за сукупністю критеріїв алгоритми приховування цифрових водяних знаків в відеофайли.

Висновки. В даній статті використано метод аналізу ієрархій для визначення переважного за сукупністю показників якості алгоритму вбудовування інформації у відеофайли. Переважний алгоритм отримано на основі сформованих матриць порівнянь відносної важливості показників якості та результатів програмного моделювання стеганографічних алгоритмів вбудовування в відеофайли. Якщо, в якості переважального критерію була обрана пропускну здатність, то найкращі значення за вказаним критерієм забезпечує метод на основі НЗБ, підвищення стійкості якого забезпечується додатковим використанням коду Хемінга з значенням вектору пріоритетів 0,24. При використанні в якості переважального критерію стійкість до атак результати досліджень показали ефективність методу дискретного вейвлет-перетворення з можливістю вбудовування 2 бітів цифрового водяного знаку в блок ДКП в частотну область LH. Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше визначений переважний за критеріями швидкодії, пропускну здатності та стійкості до завад в каналах зв'язку метод вбудовування у відеофайли та набула подальшого розвитку теорія приховування інформації у відеофайлах шляхом підвищення завадостійкості існуючих алгоритмів.

Практична значимість роботи визначається застосуванням досліджуваних алгоритмів для захисту інтелектуальної власності на відеопродукцію, що передається каналами зв'язку з завадами, вирішення цієї задачі є актуальною проблемою в сучасному світі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: стеганографія, відео, алгоритм, ЦВЗ, метод аналізу ієрархій.

АБРЕВІАТУРИ

LSB – найменш значущий біт;
ЦВЗ – цифровий водяний знак;
MAI – метод аналізу ієрархій;
ДКП – дискретне косинусне перетворення;
ДВП – дискретне вейвлет-перетворення.

НОМЕНКЛАТУРА

MSE – середньоквадратичне відхилення;
 V – значення пікселю вихідного зображення;
 V^* – значення пікселю стегозображення;
 m – кількість рядків кадру;
 n – кількість стовпців кадру;
PSNR – пікове відношення сигнал/шум;
MAX – максимальне значення пікселю;
 a_{ij} – оцінки парних порівнянь елементів вибору;

V_j – компоненти головного власного вектора;
 P_j – компоненти вектора пріоритетів показників якості;
 C_i – компонент вектора глобальних пріоритетів;
 N – число проектних варіантів систем, що порівнюється.

ВСТУП

Стеганографія – наука про методи захисту інформації шляхом приховування факту її існування в тому або іншому середовищі. Приховування факту існування таємного повідомлення завжди видавалося доцільним для його захисту, а наявність різних технічних, хімічних, фізичних і психологічних методів такого приховування забезпечувало можливість його реалізації. Сьогодні стеганографія являє собою

сукупність алгоритмів і технічних рішень, що реалізують захист інформації, заснований на різних принципах. Однак в умовах стрімкого зростання інформаційно-телекомунікаційних технологій найбільш активно розвиваються комп'ютерні алгоритми стеганографії та способи їхнього застосування в кібернетичному просторі. Цифрове відео є одним з найпопулярніших мультимедійних даних, що поширюється в мережі Інтернет. Тому набувають широкого впровадження алгоритми вбудовування цифрових водяних знаків в відеофайли.

Об'єкт дослідження: процеси приховування конфіденційної інформації в стеганографічних контейнерах (відео-файлах), які передаються по відкритих каналах зв'язку з завадами.

Предмет досліджень – комбіновані методи захисту мультимедійних даних із застосуванням стеганографії, завадостійкого кодування та паралельної обробки даних, а також оцінки стійкості та швидкодії стеганографічних методів.

Метою даної роботи є визначення стеганографічного алгоритму приховування цифрового водяного знаку в відеоконтєйнері, оптимального за критеріями швидкодії, стійкості до атак, прихованості та пропускну здатності за допомогою програмного моделювання та методу аналізу ієрархій.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Задано методи приховування інформації, які мають широке поширення та забезпечують високі показники якості – методи НЗБ, Коха-Жао та метод на основі ДВП-ДКП. Вказані методи мають бути програмно реалізовані та по отриманих реалізаціях мають бути оцінені наступні критерії якості: пропускну здатність, швидкість вбудовування та витягнення повідомлення, ступінь спотворення початкового контейнеру та стійкість до атак. Використовуючи методи аналізу ієрархій та математичного моделювання необхідно визначити методи найкращі по сукупності критеріїв за умови максимізації пропускну здатності та стійкості до атак. В якості результуючих значень має бути отриманий глобальний вектор пріоритетів, що містить інтегровану оцінку наведених критеріїв. Додаткові обмеження накладає необхідність використання методів боротьби з завадами в каналах зв'язку для підвищення стійкості досліджуваних методів захисту інформації.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Алгоритми вбудовування цифрових водяних знаків в нерухомі зображення та в відео можуть бути розділені на 3 основні групи в залежності від області, в яку вбудовується ЦВЗ: алгоритми вбудовування в просторову область, в область перетворень та в відео, що стиснене за стандартом MPEG. Основними перевагами просторових алгоритмів є те, що вони концептуально прості і мають дуже низьку обчислювальну складність. В результаті вони стали найбільш привабливими для застосування в відео, де функціонування в режимі реального часу є головним завданням. Основною перевагою алгоритмів в області

перетворень, є те, що вони можуть використати особливі властивості альтернативних областей для усунення обмежень методів вбудовування в просторовій області або для підтримки додаткових функцій [1, 2, 3].

З метою визначення переважного алгоритму вбудовування цифрового водяного знаку було виконано розрахунки сукупності показників якості для різних алгоритмів, що наведений у [9], а потім на основі їх порівняльного аналізу використано один із методів багатокритеріального вибору єдиного варіанту – метод аналізу ієрархій [10].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Метод заміни найменш значущого біту є найбільш поширеним серед алгоритмів вбудовування ЦВЗ в просторовій області. Загальний принцип цього алгоритму полягає у заміні надмірності, малозначущої частини зображення бітами секретного повідомлення [1].

Одним з найпоширеніших алгоритмів приховування конфіденційної інформації в області перетворень зображення полягає у відносній заміні величин коефіцієнтів дискретного косинусного перетворення, який описується Кохом та Жао [2]. Для застосування алгоритму заміни частотних коефіцієнтів, відеофайл необхідно розглядати як послідовність кадрів. Кожен кадр розглядається як незалежне зображення і ЦВЗ вбудовується у кожний кадр.

Під час дослідження були запропоновані наступні модифікації алгоритму:

- в якості області вбудовування була вибрана побічна діагональ матриці ДКП;
- реалізована можливість вбудовування до 4 бітів ЦВЗ в кожен блок ДКП. У кожному блоці вибирається до 4 пар різних елементів матриці ДКП і в кожному з цих пар вбудовується біт ЦВЗ;
- реалізована нормалізація блоку після зворотнього ДКП. Якщо інформація вбудовується в блок, що має елементи зі значеннями яскравості Y, близькими до значень граничних елементів діапазону (0 та 255), після зворотнього ДКП значення цих елементів можуть вийти за граничні значення діапазону. При записуванні у відеофайл ці елементи будуть призводити до значних спотворень, навіть до повної інверсії кольору пікселя. У зв'язку з цим після зворотнього ДКП блоку потрібно нормалізувати значення елементів блоку. Нормалізація полягає у детектуванні значень, що вийшли за межі діапазону, і приведенні цих значень до значення найближчої межі діапазону;

– додано завадостійке кодування кодом Хемінга.

Для вилучення ЦВЗ з відеофайлу необхідно зробити ті самі операції, що й для вбудовування, аж до ДКП.

Характеристики стійкості до певних атак модифікованого алгоритму можна покращити, використовуючи коди Хемінга. Коди Хемінга це, ймовірно, одні з найвідоміших кодів, що самоконтролюються і самокоригуються. Коди

Хемінга дозволяють виправляти одиничну помилку (помилку в одному біті) і знаходити подвійну помилку. При реалізації цього алгоритму використовувалися коди Хемінга (7,4). Це означає, що чотири біта ЦВЗ кодувалися сьома бітами коду. В даному коді чотири біта будуть інформативними, а три – контрольними.

Ще одним поширеним алгоритмом вбудовування в область перетворень є метод дискретного вейвлет-перетворення. Основна ідея дискретного вейвлет-перетворення у процесі обробки зображення полягає в розкладанні зображення в підзображення різних просторових та частотних областей. ДВП розділяє зображення на апроксимацію первинного кадру відео (зображення з низькою роздільною здатністю) (LL), а також результату проходження його по горизонталіях (HL), вертикалях (LH) та діагоналях (HH). Потім процес може бути повторений, для розрахунку вейвлет-компонентів більш високого порядку [3, 4, 5].

В даній роботі для дослідження використовувалися такі алгоритми: метод заміни найменш значущого біту, метод заміни величин коефіцієнтів ДКП (Коха-Жао) та метод дискретного вейвлет-перетворення. Також ці алгоритми були реалізовані з додаванням кодів Хеммінга, а алгоритм Коха-Жао та ДВП з можливістю вбудовування 1, 2 або 4 бітів цифрового водяного знака в блок ДКП та ДВП і алгоритм ДВП з можливістю вбудовування в різні частотні області (HL або LH) [6, 7, 8].

Всі ці алгоритми були проаналізовані і оцінені з використанням набору наступних метрик (показників якості):

- час вбудовування – це час, який необхідний для вбудовування прихованого повідомлення в відео файл;

- час зчитування – це час, який необхідний для вилучення прихованого повідомлення із відео файл;

- пропускну спроможність – кількість бітів прихованого повідомлення, які можуть бути передані за допомогою цього методу в відеофайлі фіксованого розміру;

- MSE – відносний показник розсіювання значень. MSE для відеофайлу це показник розсіювання значень пікселів вихідного зображення і стегозображення. MSE розраховується для кожного кадру відеофайлу окремо і розраховується за формулою:

$$MSE = \frac{1}{m \cdot n} \cdot \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} (V_{ij} - V_{ij}^*)^2; \quad (1)$$

- PSNR – показник співвідношення максимально можливого значення пікселя і потужності (величини) спотворень, що визвані вбудованим ЦВЗ. У зв'язку з тим, що величину спотворень можна представити за допомогою показника MSE, PSNR можна розрахувати за допомогою MSE, використовуючи наступну формулу:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right). \quad (2)$$

Результат розрахунків показників якості для алгоритмів, описаних вище, наведено у роботі [9]. З їх аналізу витікає, що показники якості стеганографічних алгоритмів зв'язані між собою та є антагоністичними. Це означає, що при переході від одного алгоритму до іншого алгоритму одні показники стають кращими, а інші погіршуються. В такому випадку для вибору єдиного переважного стеганографічного алгоритму з урахуванням сукупності показників якості необхідно використовувати методи багатокритеріальної оптимізації.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розглянемо особливості вибору єдиного переважного алгоритму вбудовування ЦВЗ з урахуванням сукупності показників якості за допомогою методу аналізу ієрархій [10]. Суть цього методу зводиться до формування досвідченими експертами парних порівнянь відносної важливості показників якості проектних варіантів (у нашому випадку стеганографічних алгоритмів), а також оцінок відносної важливості самих проектних варіантів (стеганографічних алгоритмів).

Результати парних порівнянь елементів вибору наводяться у матричній формі:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1j} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2j} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{i1} & a_{i2} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Далі над сформованими матрицями парних порівнянь виконуються математичні перетворення, зокрема, розраховується головний власний вектор, який відповідає максимальному власному значенню матриці. Компоненти головного власного вектора матриці парних порівнянь показників якості обчислюються як середнє геометричне значення в рядку матриці парних порівнянь

$$V_j = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n a_{ij}}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (4)$$

де n – число показників якості.

Через компоненти головного власного вектора обчислюються відповідні компоненти вектора пріоритетів показників якості як нормовані значення:

$$P_j = \frac{V_j}{S}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (5)$$

$$\text{де } S = \sum_{j=1}^n V_j. \quad (6)$$

Аналогічно знаходяться оцінки матриць парних порівнянь стеганографічних алгоритмів окремо по відношенню до кожного показника якості. На основі цих матриць обчислюються компоненти відповідних головних власних векторів і векторів пріоритетів

систем $\bar{Q}_j$ по відношенню до окремих показниками якості. З використанням отриманих даних обчислюються значення компонент вектора глобальних пріоритетів $\vec{C}$ згідно співвідношення:

$$C_i = \sum_{j=1}^n P_j Q_{ij}, i = \overline{1, N}. \quad (7)$$

За максимальним значенням компонента вектора глобальних пріоритетів (7) вибирається відповідний переважний варіант стеганографічного алгоритму вбудовування ЦВЗ.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Згідно описаного методу аналізу ієрархій сформована матриця парних порівнянь для показників якості стеганографічних алгоритмів (табл. 1). Для заповнення цієї таблиці за допомогою досвідченого експерта виконані парні порівняння важливості показників якості алгоритмів вбудовування ЦВЗ в відеофайли. Діагональ цієї матриці заповнена

значеннями «1», а елементи матриці, що лежать нижче діагоналі, заповнені зворотними значеннями.

Далі отримані відповідні матриці парних порівнянь алгоритмів вбудовування ЦВЗ в відеофайл окремо по відношенню до обраних показниками якості: час вбудовування, час зчитування, MSE, PSNR, а також і отримані відповідні матриці парних порівнянь. Для прикладу в табл. 2 приведена матриця парних порівнянь алгоритмів вбудовування ЦВЗ в відео по відношенню до часу зчитування, а також обчислені власний вектор і вектор пріоритетів (табл. 2). Аналогічні матриці парних порівнянь алгоритмів вбудовування ЦВЗ отримані також по відношенню і до інших показників якості.

У табл. 3 зведені отримані оцінки компонент вектора пріоритетів показників якості, а також векторів пріоритетів алгоритмів вбудовування в відео, по відношенню до часу вбудовування, часу зчитування, MSE та PSNR. З використанням цих векторів пріоритетів обчислені значення компонент глобального вектора пріоритетів згідно (7), які наведені в останньому стовпчику табл. 3.

Таблиця 1 – Матриця парних порівнянь показників якості алгоритмів вбудовування ЦВЗ в відеофайли і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	Час вбудовування	Час зчитування	Пропускна здатність	MSE	PSNR	Компоненти головного власного вектора, V_i	Компоненти вектора пріоритетів, P_i
Час вбудовування	1	2	1/7	7	3	1,43	0,20
Час зчитування	1/2	1	1/5	4	3	1,04	0,14
Пропускна здатність	7	5	1	7	4	3,97	0,54
MSE	1/7	1/4	1/7	1	1/3	0,28	0,04
PSNR	1/3	1/3	1/4	3	1	0,61	0,08

Таблиця 2 – Матриця парних порівнянь алгоритмів вбудовування ЦВЗ в відео по відношенню до часу зчитування і обчислені оцінки компонент вектора пріоритетів

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	A_8	A_9	A_{10}	A_{11}	A_{12}	A_{13}	A_{14}	V_{II}	P_{II}
A_1	1	2	8	7	7	7	7	8	8	7	9	7	7	7	5,84	0,27
A_2	1/2	1	9	7	7	8	7	8	8	7	9	6	6	8	5,31	0,24
A_3	1/8	1/9	1	1/3	1/3	1/2	1/3	1/2	2	1/3	3	1/4	1/4	1/2	0,43	0,02
A_4	1/7	1/7	3	1	2	3	2	3	4	2	5	1/3	1/3	3	1,27	0,06
A_5	1/7	1/7	3	1/2	1	3	2	3	3	2	6	1/3	1/3	3	1,14	0,05
A_6	1/7	1/8	2	1/3	1/3	1	1/3	2	3	1/3	5	1/3	1/3	2	0,66	0,03
A_7	1/7	1/7	3	1/2	1/2	3	1	3	3	2	5	1/3	1/3	3	1,02	0,05
A_8	1/8	1/8	2	1/3	1/3	1/2	1/3	1	3	1/3	4	1/3	1/3	2	0,58	0,03
A_9	1/8	1/8	1/2	1/4	1/3	1/3	1/3	1/3	1	1/3	3	1/4	1/4	1/3	0,35	0,02
A_{10}	1/7	1/7	3	1/2	1/2	3	1/2	3	3	1	5	1/3	1/3	3	0,92	0,04
A_{11}	1/9	1/9	1/3	1/5	1/6	1/5	1/5	1/4	1/3	1/5	1	1/5	1/5	1/3	0,23	0,01
A_{12}	1/7	1/6	4	3	3	3	3	3	4	3	5	1	2	3	1,90	0,09
A_{13}	1/7	1/6	4	3	3	3	3	3	4	3	5	1/2	1	3	1,72	0,08
A_{14}	1/7	1/8	2	1/3	1/3	1/2	1/3	1/2	3	1/3	3	1/3	1/3	1	0,52	0,02

Таблиця 3 – Результати обчислення оцінок компонент глобального вектора пріоритетів

Методи вбудовування	Q_{ij}					$\bar{C}$
	0,24	0,27	0,15	0,18	0,02	<u>0,18</u>
LSB						
LSB + HammingCodes	0,28	0,24	0,25	0,25	0,02	<u>0,24</u>
Koch-Zhao (1 bit / block)	0,06	0,02	0,03	0,12	0,16	<u>0,05</u>
Koch-Zhao (1 bit / block) + Hamming Codes	0,02	0,06	0,01	0,12	0,16	<u>0,04</u>
Koch-Zhao (4 bit / block)	0,07	0,05	0,19	0,03	0,10	<u>0,13</u>
Koch-Zhao (4 bit / block) + Hamming Codes	0,04	0,03	0,09	0,03	0,10	<u>0,07</u>
DWT-DCT HL (1 bit / block)	0,04	0,05	0,02	0,02	0,07	<u>0,03</u>
DWT-DCT HL (1 bit / block) + Hamming Codes	0,05	0,03	0,01	0,01	0,07	<u>0,03</u>
DWT-DCT HL (2 bit / block)	0,05	0,02	0,07	0,01	0,07	<u>0,06</u>
DWT-DCT HL (2 bit / block) + Hamming Codes	0,04	0,04	0,03	0,01	0,07	<u>0,04</u>
DWT-DCT LH (1 bit / block)	0,03	0,01	0,03	0,04	0,05	<u>0,03</u>
DWT-DCT LH (1 bit / block) + Hamming Codes	0,03	0,09	0,01	0,06	0,04	<u>0,03</u>
DWT-DCT LH (2 bit / block)	0,03	0,08	0,07	0,05	0,03	<u>0,06</u>
DWT-DCT LH (2 bit / block) + Hamming Codes	0,02	0,02	0,03	0,06	0,03	<u>0,03</u>
$\bar{P}$	0,20	0,14	0,54	0,04	0,08	

6 ОБГОВОРЕННЯ

Захист авторських прав на відеопродукцію може забезпечуватися за допомогою вбудовування ЦВЗ в різних областях. Найбільше поширення отримали методи приховання в просторовій області, частотній області та області вейвлет-перетворення. Для визначення найкращого алгоритму на фоні завад в каналах зв'язку були обрані алгоритми, які мають найкращі показники в кожній з цих областей. Таким чином були досліджені параметри методів НЗБ, Коха-Жао, ДВП-ДКП. Згідно з методом аналізу ієрархій переважний проектний варіант вибраний за результатами аналізу значень компонент вектора глобальних пріоритетів, що наведений в табл. 3. Максимальному значенню компоненти вектора глобальних пріоритетів відповідає переважний алгоритм вбудовування ЦВЗ в відеофайл з урахуванням введених показників якості. Відповідно до результатів досліджень найкращим за умови забезпечення найвищої критеріями стійкості до атак став метод ДВП-ДКП, а найкращим за умови забезпечення найвищої швидкодії – метод НЗБ. Ці методи не мають захисту від дії завад в каналах зв'язку і потребують подальшого удосконалення шляхом додавання завадостійких кодів, наприклад коду Хемінга. Підвищення прихованості для вказаних методів можна досягти застосуванням додаткових алгоритмів переміщення даних.

ВИСНОВКИ

В даній статті використано метод аналізу ієрархій для визначення переважного за сукупністю показників якості алгоритму вбудовування інформації у відеофайли. Переважний алгоритм отримано

на основі сформованих матриць порівнянь відносної важливості показників якості та результатів програмного моделювання стеганографічних алгоритмів вбудовування в відеофайли. Якщо, в якості переважного критерія була обрана пропускна здатність, то найкращі значення за вказаним критерієм забезпечує метод на основі НЗБ, підвищення стійкості якого забезпечується додатковим використанням коду Хемінга з значенням вектору пріоритетів 0,24. При використанні в якості переважуючого критерію стійкість до атак результати досліджень показали ефективність методу дискретного вейвлет-перетворення з можливістю вбудовування 2 бітів цифрового водяного знака в блок ДКП в частотну область LH.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше визначений переважний за критеріями швидкодії, пропускної здатності та стійкості до завад в каналах зв'язку метод вбудовування у відеофайли та набула подальшого розвитку теорія приховання інформації у відеофайлах шляхом підвищення завадостійкості існуючих алгоритмів.

Практична значимість роботи визначається застосуванням досліджуваних алгоритмів для захисту інтелектуальної власності на відеопродукцію, що передається каналами зв'язку з завадами, вирішення цієї задачі є актуальною проблемою в сучасному світі.

ПОДЯКИ

Результати отримані в рамках аспірантської підготовки і використані при виконанні держбюджетної НДР (№ДР0117U002528) Харківського національного університету радіоелектроніки.

ЛИТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Грибунин В. Г. Цифровая стеганография / В. Г. Грибунин. – М. : СОЛОН-Пресс, 2002. – 272 с.
2. Конахович Г. Ф. Компьютерная стеганография. Теория и практика / Г. Ф. Конахович, А. Ю. Пузыренко. – К. : МК-Пресс, 2006. – 288 с.
3. Essaouabi A. Waveletbased object watermarking system for mpeg4 video / A. Essaouabi, E. Ibnelhaj, F.A. Regragu // International Journal of Computer Science and Security. – 2010. – Vol. 3, Issue 6. – P. 448.
4. Nikolaidis N. Robust image watermarking in the spatial domain / N. Nikolaidis, I. Pitas // Signal Processing, Special Issue on Copyright Protection and Control. – 1998. – Vol. 66, № 3. – P. 385–403.
5. Arena S. Digital watermarking applied to MPEG2 coded video sequence exploiting space and frequency masking / S. Arena, M. Caramma // Proceedings International Conference on Image Processing. – 2000. – Vol. 3. – P. 438–441.
6. Koch E. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling / E. Koch, J. Zhao // IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing. – 1995. – Vol. 1. – P. 123–132.
7. Langelaar G. Watermarking Digital Image and Video Data / G. Langelaar, I. Setyawan, R. Legendijk // IEEE Signal Processing Magazine. – 2000. – Vol 17. – P. 20–43.
8. Hartung F. Watermarking of Uncompressed and Compressed Video / F. Hartung, B. Girod // Signal Processing. – 1998. – Vol. 66, № 3. – P. 283–301.
9. Shostak N. Comparative analysis of effectiveness video watermarking techniques / N. Shostak, A. Astrakhansev, S. Romanko // Science of Europe. – 2017. – Vol. 15. – P. 92–95.
10. Безрук В. М. Многокритериальный анализ и выбор средств телекоммуникаций / В. М. Безрук, Д. В. Чеботарева, Ю. В. Скорик. – X. : СМІТ, 2017. – 268 с.

Стаття надійшла до редакції 10.04.2018.

Після доробки 25.05.2018.

УДК 004.056

ВЫБОР ПРЕДПОЧТИТЕЛЬНОГО АЛГОРИТМА ВСТРАИВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ВОДЯНЫХ ЗНАКОВ В ВИДЕОФАЙЛЫ

Шостак Н. В. – аспирант кафедры информационно-сетевой инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Безрук В. М. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры информационно-сетевой инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Астраханцев А. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационно-сетевой инженерии Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В последнее время существенно увеличилось количество атак на интеллектуальную собственность, которая, в соответствии с результатами опросов, занимает ведущее место в структуре современного общества. Всестороннее развитие страны невозможно без генерации собственных интеллектуальных данных и их защиты, которая на фоне информационных войн является наиболее актуальной задачей в современном обществе. Поскольку интеллектуальные данные должны не только генерироваться и храниться, но и передаваться по открытым каналам связи, то повышается важность и актуальность исследования стойкости методов защиты интеллектуальных данных к действию помех в каналах. Решению этой актуальной задачи посвящена данная работа.

Цель работы – определение стеганографического алгоритма скрытия цифрового водяного знака в видеоконтейнер, оптимального по критериям быстродействия, стойкости к атакам, скрытности и пропускной способности с помощью программного моделирования и метода анализа иерархий.

Метод. Рассмотрены алгоритмы встраивания цифровых водяных знаков в видео. В последнее время огромное внимание уделяется методам встраивания, имеющие такие свойства, как стойкость к атакам и скрытность встроеной информации. Эти алгоритмы можно классифицировать по типу области в которую встраивается или извлекается цифровой водяной знак, их пропускной способности, производительности в режиме реального времени и устойчивости к конкретным типам атак. Существующие алгоритмы встраивания в видео можно условно разделить на три основные группы, в зависимости от области в которую встраивается ЦВЗ: методы встраивания в пространственной области, в область преобразований и методы встраивания в видео, которое сжато по стандарту MPEG. Алгоритмы встраивания ЦВЗ в пространственной области применяются для несжатого видео. Встраиваемый ЦВЗ обычно прилагается к компоненту яркости и некоторых компонентом цветов или только к компонентам цветов. В алгоритмах встраивания в область преобразований водяной знак распределяется по области преобразования и его трудно удалить после встраивания. Для алгоритмов в области преобразований, существует несколько классов методов, основанных на различных функциях преобразования, основными из которых являются дискретное косинусное преобразование, дискретное вейвлет-преобразование и дискретное преобразование Фурье.

Результаты. По результатам расчетов выполнен выбор преимущественного алгоритма скрытия цифровых водяных знаков в видеофайлы.

Выводы. В данной статье использован метод анализа иерархий для определения предпочтительного по совокупности показателей качества алгоритма встраивания информации в видеофайлы. Предпочтительный алгоритм получен на основе сложившихся матриц сравнений относительной важности показателей качества и результатов программного моделирования стеганографических алгоритмов встраивания в видеофайлы. Если в качестве преобладающего критерия была выбрана пропускная способность, то наилучшие значения по указанному критерию обеспечивает метод на основе НЗБ, повышение стойкости которого обеспечивается дополнительным использованием кода Хемминга со значением вектора приоритетов 0,24. При использовании в качестве преобладающего критерия стойкость к атакам результаты исследований показали эффективность метода дискретного вейвлет-преобразования с возможностью встраивания 2 битов цифрового водяного знака в блок ДКП в частотную область ЛН. Научная новизна работы заключается в том, что впервые определен преимущественный по критериям быстродействия, пропускной способности и устойчивости к помехам в каналах связи метод встраивания в видеофайлы и получила дальнейшее развитие теория сокрытия информации в видеофайлах путем повышения помехоустойчивости существующих алгоритмов.

Практическая значимость работы определяется применимостью исследуемых алгоритмов для защиты интеллектуальной собственности на видеопroduкцию, передаваемой по каналам связи с помехами, решение этой задачи является актуальной проблемой в современном мире.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стеганография, видео, алгоритм, ЦБЗ, метод анализа иерархий.

UDC 004.056

SELECTING THE PREFERRED ALGORITHM FOR THE EMBEDDING OF DIGITAL WATERMARKS INTO VIDEOFILES

Shostak N. V. – Postgraduate Student, Department of Information and Network Engineering, Kharkiv National University of radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

Bezruk V. M. – Dr.Sc. Professor, Superintendent of Department of Information and Network Engineering, Kharkiv National University of radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

Astrakhantsev A. A. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Information and Network Engineering, Kharkiv National University of radioelectronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Recently, the number of attacks on intellectual property has increased significantly, which, according to the polls, occupies a leading position in the structure of modern society. The comprehensive development of the country is impossible without generating its own intellectual data and their protection, which, in the face of information wars, is the most urgent task in modern society. Since intellectual data must not only be generated and stored, but also transmitted through open communication channels, the importance and urgency of the study of the stability of methods for protecting intellectual data to the effect of interference in channels is increasing. This work is dedicated to solving this urgent task.

Objective – definition of a steganographic algorithm for hiding a digital watermark in a video container optimal for performance criteria, resistance to attacks, concealment and bandwidth using software simulation and hierarchy analysis method.

Method. The algorithms for embedding of digital watermarks in a moving image are considered. Recently, much attention has been paid to embedding algorithms that have properties such as resistance to attacks and the concealment of embedded information. These algorithms can be classified by the type of area in which the digital watermark is embedded or seized, their bandwidth, real-time performance, and resistance to specific attack types. Existing embedding algorithms in a video can be conventionally divided into three main groups, depending on the area in which the embedded digital watermark: embedding methods in the spatial domain, in the region of transformation, and embedding methods in video compressed by the MPEG standard. The embedding algorithms of the digital watermark in the spatial area are used for uncompressed video. The embedding digital watermark is usually added to the brightness component and some color components, or only to the color components. In embedding algorithms in the transformation region, the watermark is distributed over the transformation region and difficult to remove after embedding. For methods in the field of transformation, there are several classes of methods based on different transformation functions, the main of which are the discrete cosine transform, discrete wavelet transform and discrete Fourier transform.

Results. As a result of calculations the choice of the preferred algorithm of concealment of digital watermarks in a video file was made.

Conclusions. In this article, a hierarchy analysis method is used to determine the preferred algorithm for integrating information into video files according to a combination of quality indicators. The preferred algorithm is obtained on the basis of existing matrices of comparisons of the relative importance of quality indicators and the results of software modeling of steganographic embedding algorithms in video files. If the bandwidth was chosen as the prevailing criterion, the best method based on this criterion is provided by a method based on the LSB, which is enhanced by the additional use of the Hamming code with the value of the priority vector 0.24. When the resistance to attacks was used as the predominant criterion, the results of the studies showed the effectiveness of the discrete wavelet transform method with the possibility of embedding 2 bits of the digital watermark in the DCT block into the frequency domain of LH. The scientific novelty of the work is that for the first time the method of embedding in the video file was prevailing on the criteria of speed, bandwidth and resistance to interference in communication channels, and the theory of concealing information in video files was further developed by increasing the noise immunity of existing algorithms.

The practical significance of the work is determined by the applicability of the investigated algorithms for protecting intellectual property on video products transmitted by channels of communication with the obstacles, the solution of this problem is an actual problem in the modern world.

KEYWORDS: steganography, video, algorithm, digital watermark, method of hierarchy analysis.

REFERENCES

1. Gribunin V. G. Digital Steganography. Moscow, Solon-press, 2002, 272 p.
2. Konakhovich G. F., Puzyrenko A. U. Computer steganography. Theory and Practice. Kiev, MK-Press, 2006, 288 p.
3. Essaouabi A., Ibnelhaj E., Regragu F. A. Waveletbased object watermarking system for mpeg4 video, *International Journal of Computer Science and Security*, 2010, Vol. 3, Issue 6, P. 448.
4. Nikolaidis N., Pitas I. Robust image watermarking in the spatial domain, *Signal Processing, Special Issue on Copyright Protection and Control*, 1998, Vol. 66, No. 3, pp. 385–403.
5. Arena S., Caramma M. Digital watermarking applied to MPEG2 coded video sequence exploiting space and frequency masking, *Proceedings International Conference on Image Processing*, 2000, Vol. 3, pp. 438–441.
6. Koch E., Zhao J. Towards Robust and Hidden Image Copyright Labeling, *IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing*, 1995, Vol. 1, pp. 123–132.
7. Langelaar G., Setyawan I., Lagendijk R. Watermarking Digital Image and Video Data, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2000, Vol. 17, pp. 20–43.
8. Hartung F., Girod B. Watermarking of Uncompressed and Compressed Video, *Signal Processing*, 1998, Vol. 66, No. 3, pp. 283–301.
9. Shostak N., Astrakhantsev A., Romanko S. Comparative analysis of effectiveness video watermarking techniques, *Science of Europe*, 2017, Vol. 15, pp. 92–95.
10. Bezruk V. M., Chebotaryova D. V., Skoruk J. V. Multi-criteria analysis and choice of means of telecommunications. Xar'kov, SMIT, 2017, 268 p.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 629.764

ВИКОРИСТАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРО ВЕКТОР СТАНУ ВИКОНАВЧОГО ПРИСТРОЮ В СИСТЕМІ СТАБІЛІЗАЦІЇ ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ РАКЕТИ

Авдєєв В. В. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри систем автоматизованого управління Дніпровського національного університету ім. О. Гончара, Дніпро, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розроблена методика отримання оцінок залежності запасу стійкості і приведенної роботи на перехідному процесі компенсації постійного збурювального прискорення від наявності в законі регулювання даних про поточні кінематичні параметри виконавчого пористою при умові забезпечення заданого значення статичної похибки, що дасть можливість обґрунтовано приймати рішення про рівень складності відповідних блоків системи стабілізації.

Мета роботи – оцінка впливу спрощення закону регулювання за рахунок вилучення з нього даних про вектор стану виконавчого пористою на вимоги до його потужності і запасу стійкості.

Метод. Прийнята лінійна стаціонарна в околі певної точки траєкторії модель плоского обертального руху ракети космічного призначення із врахуванням інерції виконавчого пористою. Оцінка запасу стійкості проводиться на площинах коренів характеристичного поліному і двох коефіцієнтів закону регулювання. Віднесена до квадрату постійного збурювального прискорення робота виконавчого пористою визначена шляхом аналітичного розв'язку диференціальних рівнянь збуреного обертального руху в одній із площин стабілізації. Для статично стійкої і нестійкої ракети наведені приклади залежності названих показників від коефіцієнтів закону регулювання при координатах вектору стану.

Результати. На прикладі ракети космічного призначення вперше встановлена залежність названих показників системи стабілізації від наявності в законі регулювання сигналів про приведений кут повороту рульового органу і його швидкість.

Висновки. Показана можливість вдосконалення системи стабілізації шляхом включення в закон регулювання координат вектору стану виконавчого пористою з погляду показників: запасу стійкості та енергетичні витрати на перехідних процесах.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: стабілізація руху, вектор стану, закон регулювання.

АБРЕВІАТУРИ

ВП – виконавчий пристрій;
ЗР – закон регулювання;
ОУ – об'єкт управління;
РКП – ракета космічного призначення;
СС – система стабілізації;
ХП – характеристичний поліном.

НОМЕНКЛАТУРА

A – робота ВП на перехідному процесі;
 a, b, c – коефіцієнти параболи, яка обмежує область стійкості;
 at, bt, ct – матриці моделі об'єкту управління;
 $a_{\psi\psi}, a'_{\psi\psi}, a_{\psi\delta}$ – коефіцієнти рівнянь обертального руху ракети у площині ристання;

B – постійна складова аналітичного розв'язку кута повороту рульового органу;

c_1 – жорсткість поворотного пристрою еквівалентного рульового органу;

$D_0 \dots D_3$ – коефіцієнти аналітичного розв'язку кута повороту рульового органу;

d – коефіцієнт демпфування поворотного пристрою рульового органу;

e_0 – статична похибка СС при постійному збурювальному прискоренні;

I – момент інерції рульового органу, приведений до осі його повороту;

k_{ψ}, k'_{ψ} – коефіцієнти ЗР;

k_{δ}, k'_{δ}

$k_{\psi 0}, k'_{\psi 0}$ – номінальні значення двох коефіцієнтів ЗР;

$k_{\psi h}, k_{\psi l}$ – верхнє і нижнє значення k_{ψ} в області стійкості на прямій $y = k_{\psi 0}$;

$k'_{\psi h}, k'_{\psi l}$ – верхнє і нижнє значення k'_{ψ} в області стійкості на прямій $x = k'_{\psi 0}$;

M – обертальний момент рульового органу;

m_0 – постійне збурювальне прискорення;

$Q, q_0 - q_3$ – ХП, його коефіцієнти;

q – вектор коефіцієнтів ХП;

s – змінна комплексного типу;

S_{xh}, S_{yh} – запас стійкості на площині $k_{\psi} k'_{\psi}$ щодо обмежень справа і зверху;

S_{xl}, S_{yl} – запас стійкості на площині $k_{\psi} k'_{\psi}$ щодо обмежень знизу і зліва;

T – тривалість перехідного процесу;

t – поточний час з моменту прикладання збурювального прискорення;

T_{ac} – постійна часу ВП;

u – управління – сигнал на виході регулятора;

x, y – абсциса і ордината в рівнянні параболи, яка обмежує область стійкості;

xv – вектор стану ОУ;

$\delta, \dot{\delta}$ – кут повороту рульового органу, його похідна за часом;

η – запас стійкості на площині коренів ХП;

ηf – функція в алгоритмі пошуку максимуму запасу стійкості;

ξ – коефіцієнт демпфування ВП;

$\psi, \dot{\psi}$ – кут рискання ракети, його похідна за часом.

ВСТУП

Рівень складності математичної моделі руху РКП залежить від задачі дослідження. Кількість координат вектору стану може змінюватися від двох, коли розглядається обертальний рух РКП як твердого тіла в одній площині без врахування інерції ВП, до 20 і більше, коли беруться до уваги коливальні контури, обумовлені кінцевою жорсткістю корпусу та коливаннями рідкого палива [1]. До основних показників СС відносяться запас стійкості, точність і якість перехідного процесу при компенсації збурень. Кількісно запас стійкості може бути визначений на площинах коренів ХП, частотної характеристики розімкненої системи або двох вибраних коефіцієнтів ЗР [2]. Для оцінки точності можуть бути використані вектори коефіцієнтів помилок [3], якість перехідного процесу прийнято характеризувати інтегральним критерієм, до якого входять координати вектору стану. Вимоги до запасу стійкості і точності стабілізації програмного

руху РКП, як правило, суперечливі, тому при виборі рівня складності ЗР і коефіцієнтів при координатах вектору стану приймаються компромісні рішення. Від кількості доданків ЗР залежить число датчиків у системі, спираючись на сигнали яких визначаються координати вектору стану. На початковому етапі розробки СС першочерговою є задача забезпечення стійкості обертального руху РКП як твердого тіла, при цьому приймається припущення про незалежність рухів у різних площинах. Завдяки тому, що діапазон частот, характерний для обертального руху, в першому наближенні відокремлений від частот руху центру мас, коливань палива та пружних коливань корпусу, математична модель збуреного обертального руху РКП із врахуванням інерції ВП в околі певної точки траєкторії може бути прийнята у вигляді системи лінійних диференціальних рівнянь четвертого порядку. Методи синтезу ЗР, при яких забезпечується мінімум інтегрального критерію якості перехідного процесу, передбачають врахування всіх координат вектору стану відповідно до прийнятої моделі: кут повороту корпусу, його кутова швидкість, еквівалентний кут повороту рульового органу і його кутова швидкість. Реалізація такого закону передбачає наявність датчиків усіх координат вектору стану, що не є завжди необхідним для забезпечення заданих характеристик [4]. Тому для обґрунтованого вибору ЗР доцільно встановити залежність названих показників СС від врахування в ЗР тих координат вектору стану, які з погляду технічних характеристик РКП не є найбільш пріоритетними, а саме еквівалентний кут повороту рульового органу і його швидкість.

Об'єктом дослідження є контур управління СС плоского обертального руху РКП, предметом дослідження є залежність оцінок запасу стійкості і приведеної роботи ВП від параметрів контуру управління. Метою роботи є встановлення залежності названих показників СС від наявності в ЗР доданків, пропорційних кінематичним параметрам ВП.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Під ОУ мається на увазі збурений обертальний рух ракети як твердого тіла у площині рискання. Аналогічно [5] до ОУ включені кінематичні параметри ВП. Відповідно до цього координатами вектору стану xv є кут рискання ψ , кутова швидкість $\dot{\psi}$, кут повороту руля курсу δ і кутова швидкість $\dot{\delta}$, тобто $xv^T = [\psi \ \dot{\psi} \ \delta \ \dot{\delta}]$. В околі певної точки траєкторії модель ОУ описується рівнянням:

$$\frac{dxv}{dt} = am \cdot xv + bm \cdot u + cm \cdot m_0, \quad (1)$$

де елементи матриці am залежать від параметрів РКП і траєкторії ($a_{\psi\psi}, a'_{\psi\psi}, a_{\psi\delta}$), постійної часу T_{ac} ВП і коефіцієнту демпфування ξ :

$$am = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{\psi\psi} & a'_{\psi\psi} & a_{\psi\delta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -\mu & -\xi \cdot \mu \cdot T_{ac} \end{bmatrix}, \mu = 1/T_{ac}^2.$$

Особливість даного ОУ в тому, що управління

$$u = k_{\psi} \cdot \psi + k'_{\psi} \cdot \dot{\psi} + k_{\delta} \cdot \delta + k'_{\delta} \cdot \dot{\delta}, \quad (2)$$

безпосередньо впливає тільки на кінематичні параметри ВП, тоді як збурювальне прискорення m_0 діє на корпус РКП, тому 4×1 – матриці b і c такі:

$$bm^T = [0 \ 0 \ 0 \ \mu], \quad cm^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0]. \quad (3)$$

Еквівалентні кінематичні параметри рульового органу $\delta, \dot{\delta}$ можуть бути розраховані також без використання відповідних датчиків спираючись на таблицю функції сигналів $\psi, \dot{\psi}$, яка з необхідним рівнем швидкодії поновлюється у реальному часі.

Ставиться задача розробити методику визначення оцінки впливу спрощення ЗР (2) за рахунок вилучення з нього доданків, пропорційних куту повороту рульового органу δ або/та його кутовій швидкості $\dot{\delta}$ на запас стійкості, точність стабілізації і приведену роботу ВП при дії постійного збурювального прискорення.

Наявність такої методики дасть можливість на початковому етапі розробки СС визначати коефіцієнти ЗР виходячи із вимог запасу стійкості і якості перехідного процесу при умові забезпечення заданої точності.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Питанням стабілізації руху РКП і космічних апаратів присвячені десятки робіт, перші з них з'явилися в середині минулого сторіччя. Основні отримані результати щодо проектування СС як складової частини системи управління рухом ракети і вибору ЗР містять монографія [1]. Встановлені вимоги до частотної характеристики ВП з урахуванням осциляторів, обумовлених кінцевою жорсткістю корпусу та рідким паливом у баках.

Коливання рідини в баках або в конструкціях корисного навантаження суттєво ускладнює стабілізацію руху і вимагає спеціальних заходів при розробці проекту, зокрема, раціональний вибір форми баків і установку демпферів [6].

Коли в математичній моделі СС беруться до уваги коливання рідкого палива і кінцева жорсткість корпусу, то, як правило, розмірність вектору стану більше числа доданків ЗР, що не дає можливості безпосередньо використати описаний у роботах Красовського відомий метод аналітичного конструювання регуляторів, де коефіцієнти ЗР розраховуються виходячи з критерію якості перехідного процесу. Але необхідний запас стійкості може бути забезпечений при умові

достатнього демпфування в осциляторах і належному виборі частотної характеристики регулятора [7].

Розроблена методика оптимізації ЗР за критерієм «ймовірність стійкості», оскільки параметри РКП відомі з певною похибкою [8]. Її ефективність підтверджена на моделі восьмого порядку, в якій, крім обертового, беруться до уваги рух центру мас, пружність корпусу та динамічні характеристики ВП.

СС обертового руху РКП і космічних апаратів мають спільні особливості з погляду вимог до їхніх характеристик, побудови структурної схеми і математичної моделі, в якій залежно від поставленої задачі необхідно приймати до уваги динамічні властивості ВП.

Для зменшення похибок СС обертового руху низькоорбітального супутника запропонований варіант використання підсистеми зміщення центру мас [9] і нелінійного ЗР, параметри якого визначені методом Ляпунова. Цей метод знаходить також використання в малих супутниках, коли обертовий момент управління створюється взаємодією магнітного поля Землі з магнітним полем соленоїда, жорстко зв'язаного з корпусом. Для цього варіанту СС розроблений алгоритм кусочно постійного моменту управління, у якому відокремлені інтервали часу виміру параметрів магнітного поля Землі і поданням відповідного струму в соленоїд [10]. Як відомо, універсальний метод визначення функції Ляпунова відсутній, тому сфера використання отриманих результатів обмежується структурою вибраних математичних моделей.

Одним із методів розрахунку коефіцієнтів лінійного ЗР, при яких стає найменшою кількісна оцінка (критерій) якості перехідного процесу компенсації збурень СС, є використання системи нелінійних рівнянь Ріккати. В роботі [5] ця система наведена для моделі СС четвертого порядку, а у роботі [11] для моделі другого порядку отриманий її аналітичний розв'язок і запропонований алгоритм визначення елементів симетричної матриці критерія, при яких забезпечуються задані показники СС, зокрема, глобальна стійкість.

В названих вище роботах відсутнє обґрунтування необхідного для забезпечення заданих показників СС рівня складності ЗР, зокрема, включення в нього кінематичних параметрів ВП.

Із врахуванням заданого запасу стійкості аналітичними методами визначені залежності показників, які характеризують похибку компенсації лінійного у часі збурювального прискорення від коефіцієнтів рівнянь руху, параметрів виконавчого і корегувального пристроїв [3]. Результати отримані для моделі СС плоского обертового руху п'ятого порядку, в ЗР якої, крім традиційних, присутні доданки, пропорційні кутовому прискоренню корпусу і кутовій швидкості повороту еквівалентного рульового органу. Ці складові дають можливість збільшити область стійкості на площині решти двох коефіцієнтів ЗР і зменшити окремі координати вектору похибок, але в сигналі

регулятора зростає рівень високочастотної складової перешкод.

Розроблена методика визначення кількісних оцінок запасу стійкості СС плоского обертального руху із врахуванням динамічних характеристик ВП і включенням його кінематичних параметрів в ЗР [2]. Як відомо, на площині коренів ХП запас стійкості величиною дійсної частини найближчого до уявної осі кореня, тоді як на площині двох коефіцієнтів ЗР він визначається обмеженнями області стійкості (зліва, справа, знизу і зверху), віднесеними до номінальних значень координат робочої точки. Запас стійкості за фазою і амплітудою згідно критерію Найквіста розраховується спираючись на відповідну до прийнятої моделі частотну характеристику розімкненої СС. Дослідження ефекту врахування в ЗР кінематичних характеристик ВП з погляду названих показників і якості перехідного процесу при умові заданого значення статичної похибки не проводиться.

Отримані оцінки точності компенсації лінійного збурювального прискорення у вигляді нескладних аналітичних залежностей від параметрів РКП і коефіцієнтів ЗР [12]. Показана можливість компромісного узгодження суперечливих вимог до точності і запасу стійкості. Аналіз вимог до потужності ВП на перехідних процесах компенсації збурень не проводиться.

Аналіз доступних джерел показує, що задача визначення впливу рівня складності ЗР на показники СС обертального руху РКП і космічних апаратів ще не має остаточного розв'язку.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

В даній роботі шляхом математичного моделювання проводиться оцінка впливу рівня складності ЗР (2) на запас стійкості СС і приведену роботу її ВП протягом перехідного процесу компенсації постійного збурювального прискорення.

Названі показники визначаються при умові забезпечення заданого значення статичної похибки e_0 , від якого залежить кут ризикання після закінчення перехідного процесу. Аналіз векторів помилок [12] показує, що при цій умові між коефіцієнтами k_ψ і k_δ ЗР (2) має місце лінійна залежність:

$$k_\psi = \frac{(1 - k_\delta)}{g}; \quad g = \frac{e_0 \cdot |a_{\psi\delta}|}{(1 + a_{\psi\psi} \cdot e_0)}, \quad (4)$$

тому розмірність простору пошуку бажаних значень показників СС зменшується до трьох ($k_\delta, k'_\delta, k'_\psi$).

Математичний апарат для виконання поставленої задачі спирається на рівняння ОУ (1–3) і відомі методи теорії управління.

Так для пошуку максимуму запасу стійкості на площині коренів ХП і з метою його організації при використанні існуючого програмного забезпечення створюється функція

$$\eta f(k_\delta, k'_\delta, k'_\psi), \quad (5)$$

при виконанні якої відповідно до (1–4) проводиться розрахунок вектору q коефіцієнтів ХП

$$Q(s) = \sum_{i=0}^3 q_i \cdot s^i + s^4, \quad (6)$$

$$q(k_\delta, k'_\delta, k'_\psi) = \begin{bmatrix} q_0(k_\delta) \\ q_1(k_\delta, k'_\delta, k'_\psi) \\ q_2(k_\delta, k'_\delta) \\ q_3(k'_\delta) \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu \cdot (1 - k_\delta) \cdot (|a_{\psi\delta}| / g - a_{\psi\psi}) \\ \mu \cdot [a_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot Tac) - a_{\psi\delta} \cdot k'_\psi - a'_{\psi\psi} \cdot (1 - k_\delta)] \\ \mu \cdot [a'_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot Tac) + 1 - k_\delta] - a_{\psi\psi} \\ - [a'_{\psi\psi} + \mu \cdot (k'_\delta - \xi \cdot Tac)] \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

його чотирьох коренів $s_0 \dots s_3$ і запасу стійкості

$$\eta = \min[-\operatorname{Re}(s_0), -\operatorname{Re}(s_1), -\operatorname{Re}(s_2), -\operatorname{Re}(s_3)],$$

де $\min$ – ім'я процедури визначення найменшого числа в заданому наборі.

В області пошуку повинні виконуватися як необхідні так і достатні умови стійкості. Необхідна умова полягає в тому, щоб коефіцієнти (7) ХП (6) були більшими нуля. Обмеження зверху коефіцієнтів k_δ і k'_δ ЗР (2) дають нерівності $q_0 > 0$, $q_3 > 0$:

$$k_\delta < 1, \quad k'_\delta < \xi \cdot Tac - a'_{\psi\psi} / \mu, \quad (8)$$

Друге обмеження зверху коефіцієнта k_δ визначається з нерівності $q_2 > 0$, воно може бути розраховане, коли відповідно до (7, 8) вибраний коефіцієнт k'_δ :

$$k_\delta < 1 + a'_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot Tac) - a_{\psi\psi} / \mu. \quad (9)$$

З необхідної умови стійкості $q_1 > 0$ слідує обмеження знизу коефіцієнта k'_ψ ЗР (2) при фіксованих k_δ і k'_δ , вибраних з урахуванням нерівностей (8, 9):

$$k'_\psi > [a'_{\psi\psi} \cdot (1 - k_\delta) - a_{\psi\psi} \cdot (k'_\delta - \xi \cdot Tac)] / |a_{\psi\delta}| = k'_{\psi 1}. \quad (10)$$

Таким чином отримані нерівності (8–10) обмежують простір ітераційного пошуку найбільшого значення функції (5).

Щоб дослідити вплив включення в ЗР (2) координат вектору стану ВП δ і δ' на запас стійкості на

площині двох коефіцієнтів ЗР – $k_{\psi} k'_{\psi}$, необхідно використати його кількісні характеристики.

Як відомо, на площині $k_{\psi} k'_{\psi}$ ЗР (2) область стійкості СС замкнута. Для моделі (1–3) її розташування визначене шляхом використання необхідних умов стійкості та відомим методом D – розподілу, тобто відображенням на цю площину уявної осі площини коренів ХП [2].

Обмеження зліва дає необхідна умова $q_0 > 0$:

$$k_{\psi} > k_{\psi l} = \frac{a_0}{\mu \cdot a_{\psi \delta}}, \quad a_0 = \mu \cdot a_{\psi \psi} \cdot (k_{\delta} - 1), \quad (11)$$

Одне із обмежень знизу визначено в (10). Друге обмеження знизу та обмеження області стійкості справа і зверху дає рівняння параболи, яка є відображенням на площину $k_{\psi} k'_{\psi}$ уявної осі площини коренів ХП:

$$x = k_{\psi} = a \cdot y^2 + b \cdot y + c, \quad y = k'_{\psi}, \quad (12)$$

де

$$a = \frac{\mu \cdot a_{\psi \delta}}{q_3^2}, \quad b = \frac{q_2 - 2a_1 / q_3}{q_3},$$

$$c = (a_0 - \frac{q_2}{q_3} a_1 + \frac{a_1^2}{q_3^2}) / (\mu \cdot a_{\psi \delta}),$$

$$a_1 = \mu \cdot [a_{\psi \psi} \cdot (k'_{\delta} - \xi \cdot T_{AC}) + a'_{\psi \psi} \cdot (k_{\delta} - 1)].$$

Друге обмеження знизу $k'_{\psi 2}$ може бути встановлене після вибору в області стійкості номінального положення робочої точки з координатами $k_{\psi 0}, k'_{\psi 0}$,

$$k'_{\psi 2} = \min(y_1, y_2),$$

де y_1, y_2 корені рівняння $k_{\psi 0} = a \cdot y^2 + b \cdot y + c$. Очевидно до уваги слід прийняти більше із цих обмежень, тобто

$$k'_{\psi} > k'_{\psi l} = \max(k'_{\psi 1}, k'_{\psi 2}).$$

З рівняння (12) можуть бути знайдені обмеження області стійкості справа і зверху відносно положення робочої точки:

$$k_{\psi} < k_{\psi h} = a \cdot (k'_{\psi 0})^2 + b \cdot k'_{\psi 0} + c,$$

$$k'_{\psi} < k'_{\psi h} = \max(y_1, y_2).$$

Для кількісної оцінки залежності запасу стійкості СС на площині коефіцієнтів ЗР (2) $k_{\psi} k'_{\psi}$ від включення в нього координат вектору стану ВП δ і $\dot{\delta}$ можуть бути використані чотири безрозмірні показники, визначені спираючись на наведені вище обмеження:

$$s_{xh} = \frac{k_{\psi h} - k_{\psi 0}}{k_{\psi 0}}, \quad s_{yh} = \frac{k'_{\psi h} - k'_{\psi 0}}{k'_{\psi 0}},$$

$$s_{xl} = \frac{k_{\psi 0} - k_{\psi l}}{k_{\psi 0}}, \quad s_{yl} = \frac{k'_{\psi 0} - k'_{\psi l}}{k'_{\psi 0}}. \quad (13)$$

Перші два показники (13) характеризують запас стійкості на площині $k_{\psi} k'_{\psi}$ відносно обмежень зверху і справа, другі два – відносно обмежень зліва і знизу.

Одним із варіантів кількісної оцінки якості перехідного процесу є приведена робота ВП, пропорційна втратам енергії при компенсації збурення. Різні способи управління кутовим положення корпусу ракети в першому наближенні можна описати диференціальним рівнянням другого порядку:

$$I \cdot \ddot{\delta} + d \cdot \dot{\delta} + c_1 \cdot \delta = M.$$

Робота за інтервал часу dt очевидно є добуток обертального моменту на кут повороту рульового органу, тобто $M \cdot \dot{\delta} \cdot dt$, а протягом перехідного процесу тривалістю T вона дорівнює

$$A = \int_0^T |M(t) \cdot \dot{\delta}(t)| \cdot dt. \quad (14)$$

Для її визначення може бути використаний розв'язок системи диференціальних рівнянь (1–3) в аналітичному вигляді при постійній величині збурювального прискорення m_0 і нульових початкових значеннях. Так кут повороту рульового органу має зручний для отримання похідних за часом вигляд:

$$\delta(t) = B + \sum_{i=0}^3 D_i \cdot e^{s_i \cdot t},$$

де s_i – корені ХП (6), а величини B, D_i можуть бути визначені операторним методом.

Робота (14) пропорційна m_0^2 , тому для кількісної характеристики якості перехідного процесу компенсації постійного збурення з погляду енергетичних витрат ВП доцільно використати цю величину, віднесу до квадрату збурювального прискорення, тобто A/m_0^2 .

Таким чином алгоритм оцінки ефекту використання в ЗР (2) сигналів δ і $\dot{\delta}$ з погляду запасу стійкості і вимог до потужності ВП при умові забезпечення заданого значення статичної похибки e_0 будується спираючись на запропоновані кількісні характеристики названих показників (5, 13, 14).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Експеримент проводиться чисельним шляхом з використанням моделі СС (1–3) і кількісних характеристик її показників (5, 13, 14) на прикладі (табл. 1) статично стійкої ракети ($a_{\psi\psi} < 0$) і статично нестійкої ($a_{\psi\psi} > 0$). Необхідні для розрахунку приведеної роботи параметри ВП наведені у табл. 2. Задане значення статичної похибки $e_0 = 0,6378$ с².

Таблиця 1 – Параметри моделі ОУ

№ варіанту	$a_{\psi\psi}$	$a_{\psi\delta}$	$a'_{\psi\psi}$	Tac	ξ
	с ²		С ⁻¹	с	–
1	–0,30	–0,200	–0,110	0,15	0,8
2	1,12	–0,256	–0,041	0,20	1,1

Таблиця 2 – Параметри ВП

I	c_1	d
кг·м ²	Н·м/рад	Н·м·с
478	3 372 678	2 486

Згідно плану експерименту першим кроком є пошук максимуму запасу стійкості η на площині коренів ХП в обмеженому нерівностями (8–10) тривимірному просторі k_δ k'_δ k'_ψ коефіцієнтів ЗР (2).

Коли кут повороту рульового органу і його швидкість не беруться до уваги, то $k_\delta = 0$ і $k'_\delta = 0$, тому другим кроком експерименту був пошук максимуму η залежно тільки від k'_ψ , оскільки згідно (4) коефіцієнт k'_ψ визначається заданим значенням статичної похибки e_0 . Порівняння екстремальних значень η , отриманих на цих кроках дає можливість кількісно оцінити ефект використання в ЗР сигналів δ і $\dot{\delta}$ з погляду цього показника.

Наступні два кроки експерименту проводилися з метою визначення ефекту використання в ЗР сигналів δ і $\dot{\delta}$ з погляду запасу стійкості на площині k_ψ k'_ψ – чотирьох кількісних оцінок (13) і приведеної роботи ВП. Для порівняння були взяті екстремальні точки коефіцієнтів ЗР, визначені ітераційним шляхом на перших двох кроках.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Використання на першому кроці експерименту процедури пошуку максимуму функції (5) – запасу

стійкості η на площині коренів ХП – у тривимірному просторі k_δ k'_δ k'_ψ коефіцієнтів ЗР (2) показує, що вона має декілька локальних екстремумів, вихід на які залежить від вибору початкової точки пошуку. Для двох прикладів даних в табл. 1 початкові точки з координатами $k_{\delta 0}$, $k'_{\delta 0}$, $k'_{\psi 0}$, які привели до найбільшого значення η , і кінцеві, наведені в табл. 3.

Особливість знайдених екстремальних точок в тому, що врахування в координатах тільки двох цифр після коми може дати зменшення знайденого максимуму до 25%.

Дослідження залежності запасу стійкості η тільки від одного коефіцієнта ЗР k'_ψ на другому кроці експерименту при нульових значеннях k_δ і k'_δ показує, що функція $\eta(k'_\psi)$ унімодальна і вихід на екстремум (табл. 4) не залежить від початкової точки. На відміну від екстремальної точки у тривимірному просторі, при врахуванні в значенні k'_ψ двох цифр після коми зменшення запасу стійкості не перевищує десятих часток процента.

Таблиця 3. – Координати початкової і кінцевої точки пошуку максимуму запасу стійкості η на площині коренів ХП

№ варіанту	$k_{\delta 0}$	$k'_{\delta 0}$	$k'_{\psi 0}$	η_0
	k_δ	k'_δ	k'_ψ	η
	–	с	–	с ⁻¹
1	–0,31	–0,17	15	0,9279
	–0,32334	–0,16888	12,66306	2,58876
2	0	–0,17	40	–0,09902
	–0,76885	–0,18778	15,27949	2,50063

Як слідує з порівняння запасу стійкості СС η в табл. 3 і табл. 4, врахування в ЗР (2) кінематичних параметрів ВП може дати суттєву перевагу з погляду цього показника. Для прикладу даних в табл. 1 при дотриманні точності координат екстремальної точки дві цифри після коми ця перевага становить 44% для статично стійкого ОУ і 60% для нестійкого.

Для варіанту даних статично стійкого ОУ (табл. 1) і коефіцієнтів, при яких має місце найбільший запас стійкості на площині коренів ХП (табл. 3, 4), визначений на третьому кроці експерименту ефект включення в ЗР доданків, пропорційних δ і $\dot{\delta}$, з погляду показників (13) кількісно характеризується першими двома стовпцями табл. 5: показник S_{yh} збільшився приблизно у чотири рази, тоді як показник S_{xh} – зменшився на 32%, S_{yl} – на 7,6%, S_{xl} залишився без змін.

Таблиця 4 – Найбільше значення запасу стійкості при $k_{\delta} = 0$ і $k'_{\delta} = 0$

№ варіанту	k'_{ψ}	η
	с	с ⁻¹
1	10,88	1,361
2	7,91	1,385

Для варіанту даних статично нестійкого ОУ (другий рядок табл. 1) кількісна характеристика ефекту включення в ЗР доданків з δ і δ' в стовпцях 3 і 4 табл. 5: показник S_{xh} зріс на 42%, S_{yh} – на 123%, S_{yl} – на ~2%, тоді як S_{xl} залишився без змін.

Врахування в значеннях коефіцієнтів тільки двох знаків після коми дає варіацію результату не більше одного процента.

На підставі проведених розрахунків встановлено, що екстремальні точки показників запасу стійкості на площині k_{ψ} k'_{ψ} не збігаються з екстремумом η у тривимірному просторі k_{δ} k'_{ψ} k'_{δ} на площині коренів ХП. Включення в ЗР доданків, пропорційних координатам δ і δ' вектору стану СС, може збільшити або зменшити окремі показники запасу стійкості (13) на десять і більше процентів.

Таблиця 5 – Оцінки запасу стійкості у відносних одиницях на площині k_{ψ} k'_{ψ}

№	1	2	3	4
k_{δ}	0	-0,32	0	-0,77
k'_{δ}	0	-0,17	0	-0,19
k_{ψ}	6,34	8,39	10,50	18,57
k'_{ψ}	10,88	12,66	7,91	15,28
S_{xh}	7,637	5,205	1,359	1,936
S_{xl}	1,237	1,237	0,583	0,583
S_{yh}	1,390	5,634	1,546	3,445
S_{yl}	0,977	0,903	0,707	0,721

Значення приведеної роботи ВП протягом перехідного процесу компенсації збурювального прискорення залежно від включення в ЗР координат вектору стану ВП (табл. 5) наведені у табл. 6 для коефіцієнтів, при яких має місце найбільший запас стійкості на площині коренів ХП (табл. 3, 4), заданих з точністю дві цифри після коми.

В рядках 1, 2 табл. 6 наведені результати розрахунків приведеної роботи ВП для статично стійкого ОУ ($a_{\psi\psi} < 0$): врахування в ЗР координат δ і δ' дало зниження приведеної роботи ВП майже на 9%, тоді як для статично нестійкого ОУ ($a_{\psi\psi} > 0$, рядки 3, 4 у табл. 6) зниження приведеної роботи A/m_0^2 становить 27%. При врахуванні тільки двох цифр після коми в коефіцієнтах ЗР величини A/m_0^2 змінюються не більше, ніж на один відсоток.

Таблиця 6 – Приведена робота на перехідному процесі ($T = 5$ с, $m_0 = 0,00132$ с⁻²)

№	k_{δ}	k'_{δ}	k_{ψ}	k'_{ψ}	$A/m_0^2 \cdot 10^{-7}$
	–	с	–	с	Н·м·с ⁴
1	0	0	6,34	10,88	9,36
2	-0,32	-0,17	8,39	12,66	8,61
3	0	0	10,50	7,91	14,86
4	-0,77	-0,19	18,57	15,28	11,68

На підставі розрахунків приведеної роботи для двох варіантів даних ОУ встановлено:

а) використання в ЗР вектору стану ВП може привести до зменшення витрат енергії на перехідному процесі компенсації збурювального прискорення;

б) екстремальні точки у тривимірному просторі k_{δ} k'_{ψ} k'_{δ} запасу стійкості на площині коренів ХП і приведеної роботи не збігаються.

5 ОБГОВОРЕННЯ

Забезпечення стійкості обертального руху ракети без врахування кінцевої жорсткості корпусу, коливання рідкого палива і збуреного руху центру мас – одна із основних задач початкового етапу розробки СС. Похибка компенсації збурень обернено пропорційна коефіцієнтам ЗР, але вони обмежені зверху динамічними характеристиками ВП, наближена модель якого у більшості випадків являє собою диференційне рівняння другого порядку. Тому розмірність вектору стану СС у цьому варіанті моделі дорівнює чотирьом, з яких основними його координатами є кут і кутова швидкість повороту корпусу ракети. Якщо в ЗР, крім них, враховуються координати вектору стану ВП, то в СС потрібно збільшити кількість датчиків або в бортовій обчислювальній машині мати відповідної швидкодії програму їх відновлення, що не завжди необхідно для забезпечення заданих значень її показників, зокрема, запасу стійкості і вимог до енергетичних характеристик ВП.

Матеріали даної роботи можуть бути корисними для вибору рівня складності ЗР в СС обертального руху ракети та космічного апарату.

ВИСНОВКИ

1. Розроблений алгоритм визначення найбільшого запасу стійкості на площині коренів ХП у тривимірному просторі коефіцієнтів ЗР при умові забезпечення заданого значення статичної похибки.

2. На прикладах статично стійкої і нестійкої ракети показана можливість шляхом включення в ЗР координат вектору стану ВП вдосконалення СС з погляду показників: запас стійкості на площині коренів ХП і на площині двох коефіцієнтів ЗР, а також енергетичних витрат ВП протягом перехідного процесу компенсації збурювального прискорення.

3. Якщо в ЗР не входять координати ВП, то при умові забезпечення заданої статичної похибки пошук компромісного рішення між показниками запасу стій-

кості і якості перехідного процесу проводиться вибором коефіцієнта ЗР при кутовій швидкості ракети.

ПОДЯКИ

Робота виконана на основі матеріалів держбюджетної науково-дослідної теми № ФТФ-30-13 Дніпровського національного університету ім. О. Гончара «Методичне забезпечення систем керування і зв'язку. Моделювання і оптимізація складних процесів і систем», № держ. реєстрації 0114 U000189.

Автор висловлює подяку колективу кафедри систем автоматизованого управління і її філіалу у державному конструкторському бюро «Південне» за підтримку.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Dynamic designing of rockets. Dynamics problems of rockets and space stages: monograph / I. M. Igdalov, L. D. Kuchma, N. V. Poliakov, Ju. D. Sheptun ; under the editorship by academician S. N. Konyukhov. – Dnipro : ЛІРА, 2013. – 280 p.
2. Авдеев В. В. Запас устойчивости системы стабилизации вращательного движения ракеты / В. В. Авдеев // Техническая механика. – 2016. – № 4. – С. 62–69.
3. Авдеев В. В. Коэффициенты ошибок стабилизации вращательного движения ракеты / В. В. Авдеев // Техническая механика. – 2014. – № 3. – С. 71–78.
4. Avdejev V. Law of control and characteristics of a stabilizing system / 6th international conference "Space technologies : present and future" 23–26 May 1917, Dnipro. – P. 113–114.
5. Авдеев В. В. Критерій якості перехідного процесу і показники точності системи стабілізації ракети / В. В. Авдеев // Авиационно-космическая техника и технология. – 2017. – № 1 (136) – С. 4–10.
6. Rogers J. Design consideration for stability of liquid payload projectiles / J. Rogers, M. Castello, G. Cooper // Journal of spacecraft and rockets. – 2013. – No 1, Vol. 50. – P. 169–178. DOI: 10.2514/1.A32292.
7. Хрусталеv М. М. Простой алгоритм стабилизации ориентации спутника с гибким элементом / М. М. Хрусталеv, А. С. Халина // Электронный журнал «Труды МАИ». – 2012. – Выпуск № 55. www.mai.ru/science/trudy.
8. Сухоребрий В. Г. Оптимизация параметров системы стабилизации ракет-носителей с помощью метода вариаций / В. Г. Сухоребрий, А. А. Цветкова, А. Б. Шопина // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. – 2015. – № 68. – С. 5–12. Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vikt_2015_68_3.
9. Chesi S. Aerodynamic three-axis attitude stabilization of a spacecraft by center-of-mass shifting / S. Chesi, O. Gong, M. Romano // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2017. – No. 7, Vol. 40. – P. 1613–1626. DOI: 10.2514/1.G002460.
10. Celani F. Spacecraft attitude stabilization with piecewise-constant magnetic dipole moment / F. Celani // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2016. – No 5, Vol. 39. – P. 1140–1146. DOI: 10.2514/1.G001388.
11. Chen C., Liang Y., Jhu W. Global stability of a system with state-dependent Riccati equation controller / C. Chen, Y. Liang, W. Jhu // Journal of guidance, control, and dynamics. – 2015. – No. 10, Vol. 38. – P. 2050–2054. DOI: 10.2514/1.G000989.
12. Авдеев В. В. Точність і запас стійкості системи стабілізації обертального руху ракети / В. В. Авдеев // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 3. – С. 93–98. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-12.

Стаття надійшла до редакції 18.01.2018.
Після доробки 06.02.2018.

УДК 629.764

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ О ВЕКТОРЕ СОСТОЯНИЯ ИСПОЛНИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА В СИСТЕМЕ СТАБИЛИЗАЦИИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ РАКЕТЫ

Авдеев В. В. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры систем автоматизированного управления Днепропетровского национального университета им. О. Гончара, Днепр, Украина.

Актуальность. Разработана методика получения оценок зависимости запаса устойчивости и приведенной работы на переходном процессе компенсации постоянного возмущающего ускорения от наличия в законе регулирования данных о текущих кинематических параметрах исполнительного устройства при условии обеспечения заданного значения статической ошибки, что даст возможность обоснованно принимать решения про уровень сложности соответствующих блоков системы стабилизации.

Цель работы – оценить влияние упрощения закона регулирования за счет исключения из него данных о векторе состояния исполнительного устройства на требования к его мощности и запас устойчивости.

Метод. Принята линейная стационарная в окрестности определенной точки траектории модель плоского вращательного движения ракеты космического назначения с учетом инерции исполнительного устройства. Оценка запаса устойчивости проводится на плоскостях корней характеристического полинома и двух коэффициентов закона регулирования. Отнесенная к квадрату постоянного возмущающего ускорения работа исполнительного устройства определена путем аналитического решения дифференциальных уравнений возмущенного вращательного движения в одной из плоскостей стабилизации. Для статически устойчивой и неустойчивой ракеты приведены примеры зависимости названных показателей от коэффициентов закона регулирования при координатах вектора состояния.

Результаты. На примере ракеты космического назначения впервые установлена зависимость названных показателей системы стабилизации от наличия в законе регулирования сигналов о приведенном угле поворота рулевого органа и его скорости.

Выводы. Показана возможность усовершенствования системы стабилизации путем включения в закон регулирования координат вектора состояния исполнительного устройства с точки зрения показателей: запас устойчивости и энергетические затраты на переходных процессах.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: стабилизация движения, вектор состояния, закон регулирования.

UDC 629.764

USE OF INFORMATION ABOUT STATE VECTOR OF EXECUTIVE DEVICE IN STABILIZING SYSTEM OF A ROCKET ROTATION MOTION

Avdejev V. V. – Dr. Sc., Professor, Professor of O. Gontchar Dniprovsk National University, Dnipro, Ukraine.

Context. A method for obtaining estimates of the dependence of stability factor and reduced work during the transient process for compensation of a constant disturbing acceleration on the presence in law of control data about current kinematic parameters of the executive device under condition of ensuring a prescribed static error is developed. It will give a possibility to take decision about level of complexity for appropriate units in stabilizing system.

Objective. The purpose of the research is to estimate the influence of the law of control reduction by means of exclusion from one the data about state vector of the executive device on requirements to its power and stability factor.

Method. A linear stationary in the vicinity of a certain point of the trajectory model of a plane rotational motion of a rocket for space purposes has been adopted, with taking into account the inertia of the executive device. Estimation of the stability factor is carried out on the plane of the roots of the characteristic polynomial and two coefficients of the law of control. Divided to the square of constant perturbation acceleration, the work of the executive device is determined by analytical solution of the differential equations of perturbed rotational motion in one of the stabilization planes. For statically stable and unstable rocket the dependence examples of the named performances on coefficients of the law of control by coordinates of the state vector are made.

Results. For the application of the rocket for space purposes for the first time the dependence of the named indices of stabilizing system on availability in the law of control data about angle of rotation of steering gear and its velocity is established.

Conclusions. It is proven the ability of improvement the stabilizing system by means of inclusion in law of control kinematic parameters of the executive device from the point of view of such performances as a stability factor and energy costs during transient processes.

KEYWORDS: stabilization of motion, state vector, law of control.

REFERENCES

1. Igdalov I. M., Kuchma L. D., Poliakov N. V., Sheptun Ju. D.; under the editorship by academician S. N. Konyukhov. Dynamic designing of rockets. Dynamics problems of rockets and space stages: monograph. Dnipro, JIIPA, 2013, 280 p.
2. Avdejev V. V. Zapas ustojchivosti sistemy stabilizacii vrashatel'nogo dvizhenija rakety, *Tekhnicheskaja mehanika*, 2016, No. 4, pp. 62–69.
3. Avdejev V. V. Koeficienty oshibok stabilizacii vrashatel'nogo dvizhenija rakety, *Tekhnicheskaja mehanika*, 2014, No. 3, pp. 71–78.
4. Avdejev V. Law of control and characteristics of a stabilizing system, *6th international conference "Space technologies: present and future" 23–26 May 1917. Dnipro*, pp. 113–114.
5. Avdejev V. V. Kriterij jakosti perechidnogo processu i pokazniki tochnosti systemy stabilizacii obertalnogo ruchu rakety, *Aviazionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija*, 2017, No. 1 (136), pp. 4–10.
6. Rogers J., Castello M., Cooper G. Design consideration for stability of liquid payload projectiles, *Journal of spacecraft and rockets*, 2013, No. 1, Vol. 50, pp. 169–178. DOI: 10.2514/1.A32292.
7. Hrustal'ov M. M., Halina A. S. Prosto algoritm stabilizacii orientacii sputnika s gibkim jelementom, *Jeletkronnyj zhurnal «Trudy MAI»*, Vypusk No. 55, 2012. www.mai.ru/science/trudy.
8. Suhorebryj V. G., Cvetkova A. A., Shopina A. B. Optimizacija parametrov sistemy stabilizacii raket-nositelej s pomoshh'ju metoda variacij, *Otkrytye informacionnye i komp'juternye integrirovannye tehnologii*, 2015, No. 68, pp. 5–12. Rezhim dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vikt_2015_68_3.
9. Chesi S., Gong O., Romano M. Aerodynamic three-axis attitude stabilization of a spacecraft by center-of-mass shifting, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2017, No. 7, Vol. 40, pp. 1613–1626. DOI: 10.2514/1.G00246.
10. Celani F. Spacecraft attitude stabilization with piecewise-constant magnetic dipole moment, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2016, No. 5, Vol. 39, pp. 1140–1146. DOI: 10.2514/1.G001388.
11. Chen C., Liang Y., Jhu W. Global stability of a system with state-dependent Riccati equation controller, *Journal of guidance, control, and dynamics*, 2015, No. 10, Vol. 38, pp. 2050–2054. DOI: 10.2514/1.G000989.
12. Avdejev V. V. Tochnist' i zapas stijkosti sistemi stabilizacii obertalnogo ruchu rakety, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 3, pp. 93–98. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-3-12.

SYNTHESIS OF THE NOISE IMMUNE ALGORITHM FOR ADAPTIVE CONTROL OF ORE CONCENTRATION

Morkun V. S. – Dr. Sc., Professor, Vice-Rector for research, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

Morkun N. V. – Dr. Sc., Associated Professor, Head of the Department of Automation, Computer Science and Technology Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

Hryshchenko S. M. – PhD, Head of Post-graduate and Doctoral Education Department, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

Tron V. V. – PhD, Associated Professor, Associated Professor of the Department of Automation, Computer Science and Technology, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Consideration of the transient process characteristics under current industrial conditions, i.e. a controlled object's static and dynamic characteristics when forming controlling impacts in automatic control systems of ore grinding and sizing is one of the advanced ways to increase their efficiency.

Variations in characteristics of initial materials and equipment conditions while changing a command value in closed-loop automatic control systems (ACS) result in transient processes when the granulometric composition of output products of grinding and sizing aggregates change in a wide range. It leads to additional losses of the recovered grade.

Duration of transient processes depends on how the controlled object's current condition (its static and dynamic characteristics) corresponds to the controller's adjustment in the ACS. It causes the necessity to readjust the controller's parameters from time to time that is done in the adaptive ACS to the best advantage.

The authors suggest an algorithm of noise immune correction of the controller's parameters in the closed-loop automatic control system, which is based on preliminary identification of the controlled object's static and dynamic characteristics in accordance with parameters of the transient process starting in the closed-loop ACS of the transient process. There are determined limits to its applicability at concentration plants.

Objective. The research aims to develop a noise immune algorithm of adaptive control over objects with variable static and dynamic characteristics on the basis of the controlled parameter value and the rate of its changes on the initial stage of transient processes in the closed-loop ACS.

Method. Current approaches and methods of improving ore concentration control are analyzed to substantiate the research topicality, goals and objectives. The adaptation algorithm for local ACS of ore concentration is synthesized and analyzed by methods of analytical design and computer simulation.

Results. Correction of the PI-controller according to the suggested algorithm reduces the transient time in the closed-loop ACS. It should be done at the moment determined by the condition $\dot{X}(t_n) = 0$ even in case of the optimal adjustment. The polynomial presentation degree of the filter should not be lower than 2, i.e. $m \geq 2$. In this case, filtration is satisfactory if fluctuation of the output signal does not exceed 25% of its absolute value because of noises.

Conclusions. The theory of forming specified parameters of transient processes in the closed-loop ACS by means of objects with variable static and dynamic characteristics on the basis of the controlled parameter value and the rate of its changes on the initial stage of these processes is developed in the present research. It allows synthesizing adaptive ACS, in which the error ratio in the transient process reaches zero in a minimum of time without changing its sign subject to disturbances and noises.

KEYWORDS: closed-loop system, regulation, control, algorithm, transient, adaptation, validity limits.

ABBREVIATIONS

ACS is an automatic control systems;

NFN is a neuro-fuzzy network;

PI is a proportionally integral;

$\bar{X}_i$ is a filtered value of the input value;

$\bar{Y}_i$ is a filtered value of the measured value;

$F_j(t)$ is a orthogonal j -th order polynomials;

t_n is a shift moment;

σ is a noise intensity.

NOMENCLATURE

K_o is a coefficient of the controlled object transfer function;

T_o is a time constant of the controlled object transfer function;

τ is a time delay;

$Y(t)$ is a measured value;

$X^{(i)}(t)$ is a input value;

T is a measurement interval;

$K_n^{t_n}$ is a coefficient of the controller transfer function;

$T_n^{t_n}$ is a time constant of the controller transfer function;

INTRODUCTION

Variations in characteristics of initial materials and equipment conditions while changing a command value in closed-loop automatic control systems (ACS) result in transient processes when the granulometric composition of output products of grinding and sizing aggregates change in a wide range. It leads to additional losses of the recovered grade. Duration of transient processes depends on how the controlled object's current condition (its static and dynamic characteristics) corresponds to the controller's adjustment in the ACS. It causes the necessity

to readjust the controller's parameters from time to time that is done in the adaptive ACS to the best advantage.

The object of study is to develop a noise immune algorithm of adaptive control over objects with variable static and dynamic characteristics on the basis of the controlled parameter value and the rate of its changes on the initial stage of transient processes in the closed-loop ACS.

The purpose of the work is to increase efficiency of control of ore grinding and sizing processes.

1 PROBLEM STATEMENT

Current flow sheets of automation of grinding and classifying aggregates of concentration plants are based on local automatic control systems, which maintain designed values of controlled parameters. Efficiency of such control systems is conditioned by initial information on a controlled process.

Research works [1–3] present the objective function of controlling ore grinding and classifying as follows:

$$Q_p \rightarrow \max Q_p \geq Q_{p \text{ set}}, \quad (1)$$

$$\beta_{-0,074} = \beta_{-0,074 \text{ set}}, \quad (2)$$

i.e., there is a formulated requirement of maximum (or no lower than the desired one) efficiency of ore processing equipment and the limit of the content (yield) of the control size class of the ground material is introduced.

The most efficient automatic control systems are those based on regulation or maintenance of the desired content of the control size class of the solid material in slurry considering granulometer signals. Research works [4–6] indicate that such ACS allow applying grinding capacities more efficiently due to permanent load, maintenance of the circulating load value necessary to obtain the required grind and improving concentration quality due to manufacturing the product of the grinding circuit with desired characteristics. In case of using an automatic granulometer in ACS, the regulation strategy is based on two approaches:

- maintaining the permanent size of the ground ore in the classifier overflow product слива классификатора;
- regulating the power value in the grinding circuit цикле измельчения to maintain the maximum load of the grinding aggregate.

One of the conditions of the objective function (1) $Q_p \geq Q_{p \text{ set}}$ can be fulfilled by current control systems to stabilize the grinding aggregate filling or the quantity of the initial raw materials coming to the grinder. To make technological aggregates more efficient it is necessary to influence the command value, i.e. to change the stabilization level of these control systems.

The second condition of the objective function (2) – $\beta_{-0,074} = \beta_{-0,074 \text{ set}}$ is fulfilled more efficiently by ACS with a granulometer realizing the measuring method presented in [7, 8]. The exact value of the control size class content of the ground material in slurry is determined by the useful

component content, which is measured by methods presented in [9, 10].

The changed command value in systems of automatic stabilization of technological parameters and various disturbances cause transient processes the character and duration of which are determined by current characteristics of the controlled object. During transient processes, the condition (2) of the reduced criterion is fulfilled with considerable errors.

Thus, consideration of transient characteristics for a current production situation, i.e. actually static and dynamic characteristics of a controlled object in forming controlling impacts in automatic control systems is one of the promising ways to increase efficiency of ore grinding and classifying.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Adaptive control algorithms realizing this approach provide for preliminary identification of static and dynamic characteristics of the controlled object and further correction of the controller parameters according to obtained estimates [10–12].

This approach allows reducing the operation time of technological aggregates in transient modes when there are considerable deviations of qualitative and quantitative characteristics of their end products from optimal values.

Research works [9, 13] and some others investigate variations of static and dynamic characteristics of grinding aggregates by command links under the influence of disturbing factors. For example, according to the command link “water consumption in the classifier – the content of the control size class of solid materials in the classifier overflow” the range of the changed static transfer coefficient makes $\pm 75\text{--}80\%$, that of the time constant is $\pm 10\text{--}16\%$ and that of delay time is $\pm 5\%$.

Optimal conditions of correcting PI-controller parameters presented in works [14–16] indicate that the transient process caused by changing the command value in closed-loop ACS will be completed in a minimum of time under the absence of its oscillation or its minimum.

Works [17–20] provide mathematical expressions on the basis of which an adaptation algorithm for automatic control systems is synthesized, the transfer function of which is approximated by

$$W_o(P) = \frac{K_o e^{-\tau P}}{T_o P + 1}, \quad (3)$$

where K_o и T_o are the statistic transfer function and the time constant of the controlled object; τ is time delay.

The adaptation algorithm is based on preliminary identification of static and dynamic characteristics of the controlled object by parameters of the transient process, which started in the closed-loop ACS in accordance with the following expressions

$$T_o = \frac{\lambda_o^2 - \lambda_{o0}\eta}{\lambda_{10}\eta - \lambda_o\lambda_1}, \quad (4)$$

$$K_o = \frac{\aleph_{10}\lambda_o - \aleph_{00}\lambda_1}{\aleph_{10}\eta - \lambda\lambda_1}, \quad (5)$$

where

$$\begin{aligned} \aleph_{ij} &= \sum_{k=1}^{N+1} X_k^{(j)} X_k^{(i)}; \\ \lambda_j &= \sum_{k=1}^{N+1} X_k^{(j)} Y_k; \\ \eta &= \sum_{k=1}^{N+1} Y_k^2. \end{aligned}$$

$Y(t)$ and $X^{(i)}(t)$ are measured values and if the transient process is initiated by abrupt changes of the input value

$$Y(t) = -K_n \left[X(t) + \frac{1}{T_{no}} \int_o^t X(t') dt' \right], \quad (6)$$

If the command value is changed

$$Y(t) = K_n \left[(g - X(t)) + \frac{1}{T_{no}} \int_o^t [(g - X(t'))] dt' \right], \quad (7)$$

The values of $Y(t)$ and $X^{(i)}(t)$ functions are changed in discrete moments of time in some period (O, NT) , where T is a measurement interval.

In arbitrary time moments t_a , parameters of the PI-controller are corrected so that the following condition is fulfilled:

a) the control error function $\varepsilon(t)$ should not be alternating;

b) the control error should reach the zero value in the shortest time.

In case of abrupt changes of the input value, the PI-controller parameters are corrected according to if $\tau \approx 0$

$$K_n^{+t_n} = 2 \left[K_n^{-t_n} + \frac{g + Y_-(t_n)}{X(t_n)} \right] - \frac{1}{K_o}, \quad (8)$$

$$T_n^{+t_n} = T_o \frac{4K_n^{+t_n} K_o}{(1 + K_n^{+t_n} K_o)^2}, \quad (9)$$

if $\tau \neq 0$

$$\begin{aligned} K_n^{+t_n} &= \frac{2 \{ K_n^{+t_n} \tilde{X}(t_n) + g + Y_-(t_n) \}}{\tilde{X}(t_n) - \dot{\tilde{X}}(t_n) \tau} - \\ &\quad - \frac{1}{K_o} \frac{\tilde{X}(t_n) + \dot{\tilde{X}}(t_n) \tau}{\tilde{X}(t_n) - \dot{\tilde{X}}(t_n) \tau}, \end{aligned} \quad (10)$$

where $\tilde{X}(t) \approx X(t - \tau)$.

In this case, the value of $T_n^{+t_n}$ is also determined by formula (9).

If the command value is changed, the controller parameters are corrected in accordance with the following expressions

if $\tau \approx 0$

$$K_n^{+t_n} = 2 \left[K_n^{-t_n} + \frac{X(t_n) K_o^{-1} - Y_-(t_n)}{\varepsilon(t_n)} \right] + \frac{1}{K_o}, \quad (11)$$

$$T_n^{+t_n} = T_o \frac{4K_o K_n^{+t_n}}{(1 + K_o K_n^{+t_n})^2}, \quad (12)$$

if $\tau \neq 0$

$$K_n^{+t_n} = 2 \left\{ \frac{K_n^{-t_n} \varepsilon(t_n) + X(t_n) K_o^{-1} - Y_-(t_n)}{\varepsilon(t_n - \tau)} \right\} + \frac{1}{K_o}, \quad (13)$$

In this case, the value of $T_n^{+t_n}$ is determined according to expression (12).

The Purpose of the Article. The research is aimed at determining validity limits of the given adaptation algorithm, i.e. conditions under which the satisfactory quality of condition (2) fulfillment remains if there are changed static and dynamic characteristics of the controlled object and various disturbances and noises in the input signal.

3 MATERIALS AND METHODS

The above mentioned adaptation algorithm is aimed at applying in the system controlling the object the transfer function of which is approximated by one relaxation circuit with time delay. Yet, for some technological aggregates of concentration plants, the following expression is true

$$W_o(P) = \frac{K_o e^{-\tau P}}{(T_{o1}P + 1)(T_{o2}P + 1)}, \quad (14)$$

the ratio T_{o1} and T_{o2} does not always meet the condition $T_{o1} \gg T_{o2}$.

The inverse Laplace transformation for $X(P)$ from expression (14) leads to the integral representation of $X(t)$ value

$$X(t) = \frac{K_o}{T_{o1} - T_{o2}} \int_o^{t-\tau} \left[e^{\frac{t-\tau-u}{T_{o1}}} - e^{\frac{t-\tau-u}{T_{o2}}} \right] Y(u) du, \quad (15)$$

The conducted research is aimed at determining the limit value of the ratio $T_{o2} \cdot T_{o1}^{-1}$ under which correction by formulae (8) and (10) is possible. This task is solved by modelling the transient process of the object with the transfer function (14) accompanied by further correction of the controller parameters according to (8)–(10).

Some analysis results are given in fig. 1, which reveals transient processes and corrected parameters of the controller in various time moments under different ratio of values T_{o1} and T_{o2} .

As is shown in the figures under $T_{o2} \cdot T_{o1} \leq 0.2$, the controller parameters corrected by formulae (8) and (10) generally meet correction requirements, namely, they greatly reduce the transient duration. It should be noted that, in this case, the alternating character of the controlled value $X(t)$ cannot be avoided, yet, its oscillation amplitude is not great.

The controller parameters should be corrected even if they are optimal, i.e. they meet the conditions

$$K_o \cdot K_n = 1; T_{o1} \approx T_n.$$

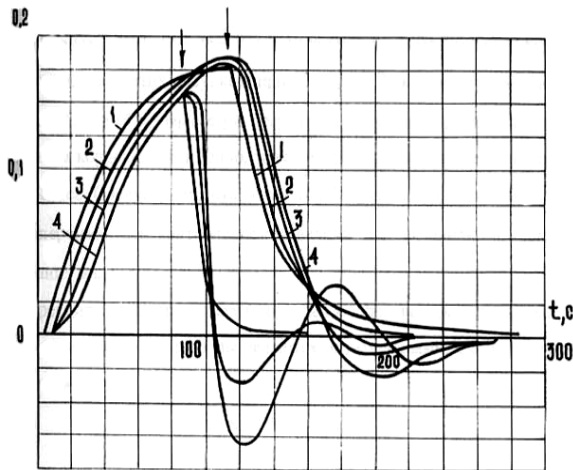


Figure 1 – Correction of the controller parameters:

1 – $T_{02}/T_{01}=0$; $K_n^{+t_n}=5.62$; $T_n=48.6$ sec; 2 – $T_{02}/T_{01}=0.1$; $K_n^{+t_n}=5.63$; $T_n=48.6$ sec; 3 – $T_{02}/T_{01}=0.2$; $K_n^{+t_n}=5.72$; $T_n=48.4$ sec; 4 – $T_{02}/T_{01}=0.3$; $K_n^{+t_n}=5.97$; $T_n=48.1$ sec; $\tau=10$ sec; $K_0=0.25$; $K_n=1$; $T_n=50$ sec; $T_{01}=50$ sec

It is shown in fig. 2, which depicts the transient process of an object with optimal controller parameters.

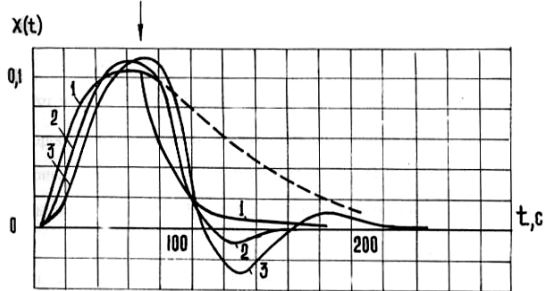


Figure 2 – Correction of the controller parameters:

1 – $T_{02}/T_{01}=0$; $K_n=9.31$; $T_n=42.0$ sec; 2 – $T_{02}/T_{01}=0.1$; $K_n=9.0$; $T_n=42.6$ sec; 3 – $T_{02}/T_{01}=0.2$; $K_n=9.73$; $T_n=41.3$ sec; $\tau=10$ sec; $K_0=0.25$; $K_n=4$; $T_n=50$ sec; $T_{01}=50$ sec

Correction can be more steady if it is conducted in the moment when the controlled value $X(t)$ reaches its maximum. This moment can be determined from the condition $\dot{X}(t)=0$. While performing the correction in the given moment, the oscillations of $X(t)$ will occur with the minimum amplitude. It is shown in fig. 1 which presents dependencies of $X(t)$ after correction of the controller parameters in various time moments.

As the analysis results reveal, it is also true for applied expressions (11)–(13).

4 EXPERIMENTS

The above principles are realized while synthesizing the noise immune adaptive control algorithm of ore concentration.

In this case, in order to determine the system parameters the values of $x(t)$, $y(t)$, $\varepsilon(t)$ in discrete time moments of 0, T , $2T$, ..., NT are measured. Corresponding values of $x(t)$, $y(t)$, $\varepsilon(t)$ in these moments form arrays of $[x_i]$, $[y_i]$, $[\varepsilon_i]$, $i=1, 2, \dots, N+1$.

© Morkun V. S., Morkun N. V., Hryshchenko S. M., Tron V. V., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-3-20

To filtrate random processes $x(t)$, $y(t)$, $\varepsilon(t)$ and determine the system parameters of K_0 and T_0 , $K_n^{+t_n}$ and $T_n^{+t_n}$ three matrices of coefficients are specified: $A \equiv [a_{ij}]$, $C \equiv [c_{ij}]$, $B \equiv [b_{jc}]$.

For $N=8$ and $m=3$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 3/4 & 1/4 & -1/2 \\ 1 & 1/2 & -2/7 & -13/14 \\ 1 & 1/4 & -17/28 & -9/14 \\ 1 & 0 & -5/7 & 0 \\ 1 & -1/4 & -17/28 & 9/14 \\ 1 & -1/2 & -2/7 & 13/14 \\ 1 & -3/4 & 1/4 & 1/2 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$B = \begin{bmatrix} 9 & 15/4 & 99/28 & 495/98 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & -1/4 & -6/7 & -181/84 \\ 0 & -1/4 & -9/14 & -19/21 \\ 0 & -1/4 & -3/7 & -1/84 \\ 0 & -1/4 & -3/14 & 11/21 \\ 0 & -1/4 & 0 & 59/84 \\ 0 & -1/4 & 3/14 & 11/21 \\ 0 & -1/4 & 3/7 & -1/84 \\ 0 & -1/4 & 9/14 & 19/21 \\ 0 & -1/4 & 6/7 & -181/84 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

The system parameters K_0 and T_0 and those of the controller $K_n^{t_n}$ and $T_n^{t_n}$ are determined in the following sequence:

1. The values of the coefficients α_j , β_j and γ_j are found by formulae

$$\begin{aligned} \alpha_j &= \sum_{i=1}^9 X_i a_{ij} / b_j, \\ \beta_j &= \sum_{i=1}^9 Y_i a_{ij} / b_j, \\ \gamma_j &= \sum_{i=1}^9 \varepsilon_i a_{ij} / b_j. \end{aligned} \quad (19)$$

2. Filtered values of the measured $\bar{X}_i$, $\bar{Y}_i$ and derivatives $\dot{\bar{X}}_i$ are determined in the same time moments

$$\begin{aligned} \bar{X}_i &= \sum_{j=1}^4 \alpha_j a_{ij}, \\ \bar{Y}_i &= \sum_{j=1}^4 \beta_j a_{ij}, \\ \dot{\bar{X}}_i &= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^4 \alpha_j C_{ij}, i=1, 2, \dots, 9. \end{aligned} \quad (20)$$

Linear filtration is used with representation of the average value of the signal $f(t)$ in some time interval as

$$\langle f(t) \rangle = \sum_{j=0}^m a_j F_j(t),$$

where $F_j(t)$ are orthogonal j -th order polynomials; a_j are real coefficients.

3. The system parameters K_o and T_o are determined.

$$\begin{aligned} T_o &= \frac{(\aleph_o \eta - \lambda_o^2)}{(\lambda_o \lambda_1 - \aleph_1 \eta)}, \\ K_o &= \frac{(\aleph_o \lambda_1 - \aleph_1 \lambda_o)}{(\lambda_o \lambda_1 - \aleph_1 \eta)}, \end{aligned} \quad (21)$$

Where

$$\begin{aligned} \aleph_o &= \sum_{k=1}^m \dot{\bar{X}}_k \bar{X}_k; \\ \lambda_o &= \sum_{k=1}^m \bar{X}_k \bar{Y}_k; \\ \aleph_1 &= \sum_{k=1}^m \dot{\bar{X}}_k \bar{X}_k; \\ \lambda_1 &= \sum_{k=1}^m \dot{\bar{X}}_k \bar{Y}_k, \quad m \leq N; \\ \eta &= \sum_{k=1}^m \bar{Y}_k \bar{Y}_k; \\ \bar{X}_k &= \bar{X}(t_k + \tau); \\ \dot{\bar{X}}_k &= \dot{\bar{X}}(t_k + \tau); \\ \bar{Y}_k &= \bar{Y}(t_k). \end{aligned} \quad (22)$$

Time moments (t_k) can coincide with measurement moments of the value of (t), $Y(t)$ and $y(t)$, i.e. (t_k)= iT , $t_k+1=(i+1)T$, etc.

4. The controller parameters are corrected, i.e. their optimal values are determine by

$$K_n^{*t_n} = \frac{1}{K_o} + 2 \left\{ \frac{K_n^{-t_n} \varepsilon(t_n) + X(t_n) / K_o - Y_-(t_n)}{\varepsilon(t_n - \tau)} \right\}, \quad (23)$$

where t_n is the shift moment which can coincide with the last measurement moment, i.e. $t_n=Nt$ (the time reading starts from the first measurement moment).

5 RESULTS

Fig. 3–4 reveal correction results after preliminary filtration and identification of the object characteristics. Identification was performed in the manner described above.

The results in Fig. 3–4 correspond to the noise intensity of $\sigma=0.01$; 0.05 . The change in the command value corresponds to the unit step ($g=1$).

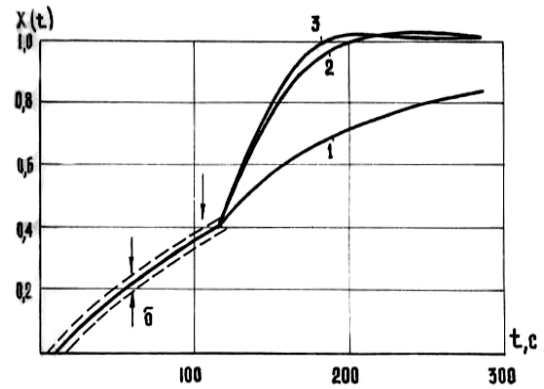


Figure 3 – Correction results of the controller parameters after preliminary filtration and identification of the object characteristics. The noise intensity is $\sigma=0.01$

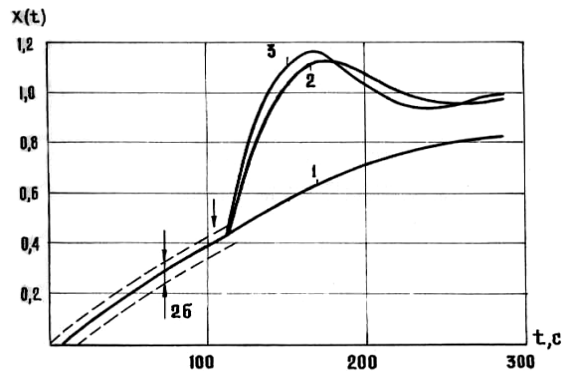


Figure 4 – Correction results of the controller parameters after preliminary filtration and identification of the object characteristics. The noise intensity is $\sigma=0.05$

6 DISCUSSION

Under the noise intensity of $\sigma=0.01$ corresponding to 5% fluctuations of the value $X(t)$ filtration (under $m \geq 2$) and further identification produce good results (fig. 3). The increased noise intensity finally affects correction results. In this case, correction also reduces the transient duration, but the controlled value appears in the new established mode oscillating with the amplitude the value of which greatly depends on the noise intensity (fig. 4).

As the observed value of $Z(t)$ is measured within the time interval $(0, NT)$ in the discrete time moments $0, T, 2T, \dots, NT$, the filtration quality depends on the number of observations and the value of the measurement interval T .

Results in fig. 3–4 are obtained under $N=40$ and $T \cdot T_0^{-1} = 0.04$.

CONCLUSIONS

Thus, we can draw the following conclusions from the above:

1) correction of the controller parameters according to expressions (8)–(13) reduces duration of the transient process in the closed-loop ACS;

2) for an object approximated by two relaxation circuits, the controller parameters can be changed

according to formulae (8)–(13), if time constants of the circuits fulfill the condition $T_{02} \cdot T_{01}^{-1} \leq 0.2$;

3) correction should be performed in the time moment determined from $\dot{X}(t_n) = 0$;

4) the controller parameters should be corrected even if they are optimal;

5) the polynomial representation degree of the filter should be no lower than 2, i.e. $m \geq 2$;

6) filtration is satisfactory if the fluctuation of the observed input signal because of noise does not exceed 25% of its absolute value.

REFERENCES

1. Protsuto V. S. Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obogatitel'nykh fabric. Moscow, Nedra, 1987, 253 p.
2. Barskiy L. A., Kozin V. Z. Sistemnyy analiz v obogashchenii poleznykh iskopayemykh. Moscow, Nedra, 1978, 486 p.
3. Morkun V. S., Morkun N. V. Estimation of the crushed ore particles density in the pulp flow based on the dynamic effects of high-energy. *Ultrasound. Archives of acoustics*, 2018, Vol. 43, Issue 1, pp. 61–67.
4. Maryuta A. N., Kachan Yu. G. Avtomaticheskii kontrol' granulometricheskogo sostava sypuchikh materialov [Text]. Kiyev, Donetsk, Vishcha shkola, 1977, 119 p.
5. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 3, pp. 49–52. URL: http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_3/007%20Golik%20Vladimir.pdf.
6. Morkun V. S. Morkun N. V., Tron V. V. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound, *Radio electronics, Computer science, Control*, 2017, No. 3, pp. 175–182. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-20>
7. Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp [Electronic resource], *Ultrasonics*, 2015, Vol. 56, pp. 340–343. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X14002443>.
8. Maryuta A. N., Davidkovich A. N., Gulenko T. I., Kondratets V. A. Avtomatizatsiya protsessov obogashcheniya rud. Kiyev, Tekhnika, 1972, 140 p.
9. Morkun V. Morkun N., Pikilnyak A. Ultrasonic facilities complex for grinding and ore classification process control, *37 th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kyiv, Ukraine, Date: APR 18–20, 2017. pp. 409–413.
10. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures, *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, No. 3, pp. 38–41. URL: http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_3/004%20Golik%20Vladimir.pdf
11. Anderson B. D. O., Moore J. B. Linear optimal control. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1971, 413 p.
12. Boyd S. P., Barratt C. H. Linear controller design: limits of performance, *Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ*, 1991, 426 p.
13. Morkun V. S., Semerikov S. O., Hryshchenko S. M. Content and teaching technology of course “ecological geoinformatics” in training of future mining engineers, *Information technologies and learning tools*, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 115–125.
14. Doyle J. C., Francis B. A., Tannenbaum A. R. *Feedback control theory*, Macmillan, New York, 1992, 219 p.
15. Tao G. Adaptive control design and analysis. Hoboken, Wiley-Interscience, 2003, 618 p.
16. Ioannou P. A., Fidan B. Adaptive control tutorial. Philadelphia, Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006, 389 p.
17. Morkun V. S., Potapov V. N. Algoritmy adaptivnogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami obogashcheniya poleznykh iskopayemykh, *Obogashcheniye rud*, 1986, No. 5, pp. 44–46.
18. Desoer C. A., Vidyasagar M. Feedback systems: input-output properties [Text]. New York, Academic Press, 1975, 264 p.
19. Doyle J. C. Analysis of feedback systems with structured uncertainties, *IEEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*, 1982, Volume 129, Issue 6, pp. 242–250.
20. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control – analysis and design. Chichester, John Wiley and Sons Ltd., 1995, 585 p.

Received 08.05.2018.

Accepted 25.06.2018.

УДК 681.513.6: 622.023.2

СИНТЕЗ ПЕРЕШКОДОЗАХИЩЕНОГО АЛГОРИТМУ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ ЗБАГАЧЕННЯ РУДИ

Моркун В. С. – д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

Моркун Н. В. – д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

Грищенко С. М. – канд. пед. наук, завідувач аспірантури та докторантури Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

Тронь В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій Криворізького національного університету, Кривий Ріг, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Облік характеристик перехідного процесу для поточної виробничої ситуації, тобто фактично статичних і динамічних характеристик об'єкту управління при формуванні керуючих впливів в системах автоматичного регулювання процесів подрібнення-класифікації руд є одним з перспективних шляхів підвищення їх ефективності.

В результаті коливань характеристик вихідної сировини і стану технологічного обладнання, а також при змінах величин завдання в замкнених системах автоматичного регулювання (САР) виникають перехідні процеси, завдяки яким гранулометричний склад вихідних продуктів для подрібнення та класифікувальних агрегатів змінюється в широких межах. Ця обставина призводить до додаткових витрат корисного компоненту.

Тривалість перехідних процесів залежить від того, наскільки точно поточний стан об'єкта управління (його статичні та динамічні характеристики) відповідає параметрам регулятора в САР. Звідси випливає необхідність періодичного підлаштування параметрів регулятора, що найкращим чином здійснюється в адаптивних САР.

Запропоновано алгоритм перешкодозахищеності корекції параметрів регулятора замкнутої системи авторегулювання, заснований на попередній ідентифікації статичних і динамічних характеристик об'єкта управління за параметрами, який почався в замкнутій САР перехідного процесу. Визначено межі його застосовності в умовах збагачувальної фабрики.

Об'єкт. Розробка перешкодозахищеного алгоритму адаптивного управління об'єктами зі змінними статичними та динамічними характеристиками на базі інформації про величину контролюваного параметру і швидкості його зміни в початковій стадії перехідних процесів в замкнутій САР.

Метод. Виконано аналіз існуючих підходів і методів оптимізації управління процесом збагачення руди для обґрунтування актуальності, цілей і завдань досліджень. Методами аналітичного конструювання та комп'ютерного моделювання виконано синтез та аналіз алгоритму адаптації для локальних САР процесів збагачення руди.

Результати. Корекція параметрів ПІ-регулятора відповідно до запропонованого алгоритму значно скорочує час перехідного процесу в замкнутій САР. Корекцію доцільно здійснювати в момент часу, який визначається за умови $\dot{X}(t_n) = 0$ і проводиться навіть в разі його оптимальної настройки. Ступінь поліномного уявлення фільтра повинна бути не нижче 2, тобто $m \geq 2$, при цьому фільтрація виявляється задовільною, якщо флуктуація спостережуваного вихідного сигналу за рахунок шуму не перевищує 25% його абсолютного значення.

Висновки. Отримавши в роботі подальший розвиток теорія формування заданих параметрів перехідних процесів в замкнених системах автоматичного управління об'єктами зі змінними статичними та динамічними характеристиками на базі інформації про величину контролюваного параметру і швидкості його зміни на початковій стадії цих процесів, дозволяє синтезувати адаптивні САР, в яких і при наявності впливів, що обурюють і перешкод в контролюваному сигналі величина неузгодженості в ході перехідного процесу досягає нульового значення за мінімальний час без зміни свого знаку.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: замкнута система, регулювання, контроль, алгоритм, перехідна, адаптація, межі дійсності.

УДК 681.513.6: 622.023.2

СИНТЕЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОБОГАЩЕНИЯ РУДЫ

Моркун В. С. – д-р техн. наук, профессор, проректор по научной работе Криворожского национального университета, Кривой Рог, Украина.

Моркун Н. В. – д-р техн. наук, доцент, заведующая кафедрой автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета, Кривой Рог, Украина.

Грищенко С. Н. – канд. пед. наук, заведующая аспирантурой и докторантурой Криворожского национального университета, Кривой Рог, Украина.

Тронь В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации, компьютерных наук и технологий Криворожского национального университета, Кривой Рог, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Учет характеристик переходного процесса для текущей производственной ситуации, т.е. фактически статических и динамических характеристик объекта управления при формировании управляющих воздействий в системах автоматического регулирования процессов измельчения-классификации руд является одним из перспективных путей повышения их эффективности.

В результате колебаний характеристик исходного сырья и состояния технологического оборудования, а также при изменениях величины задания в замкнутых системах автоматического регулирования (САР) возникают переходные процессы, в ходе которых гранулометрический состав выходных продуктов измельчительных и классифицирующих агрегатов изменяется в широких пределах. Это обстоятельство приводит к дополнительным потерям полезного компонента.

Длительность переходных процессов зависит от того, насколько точно текущее состояние объекта управления (его статические и динамические характеристики) соответствует настройкам регулятора в САР. Из этого следует необходимость периодической подстройки параметров регулятора, что наилучшим образом осуществляется в адаптивных САР.

Предложен алгоритм помехозащищенной коррекции параметров регулятора замкнутой системы авторегулирования, основанный на предварительной идентификации статических и динамических характеристик объекта управления по параметрам начавшегося в замкнутой САР переходного процесса. Определены границы его применимости в условиях обогащательной фабрики.

Объект. Разработка помехозащищенного алгоритма адаптивного управления объектами с переменными статическими и динамическими характеристиками на базе информации о величине контролируемого параметра и скорости его изменения в начальной стадии переходных процессов в замкнутой САР.

Метод. Выполнен анализ существующих подходов и методов оптимизации управления процессом обогащения руды для обоснования актуальности, целей и задач исследований. Методами аналитического конструирования и компьютерного моделирования выполнены синтез и анализ алгоритма адаптации для локальных САР процессов обогащения руды.

Результаты. Коррекция параметров ПИ-регулятора в соответствии с предложенным алгоритмом значительно сокращает время переходного процесса в замкнутой САР. Коррекцию целесообразно осуществлять в момент времени, определяемый из условия $\dot{X}(t_n) = 0$, и проводить даже в случае его оптимальной настройки. Степень полиномиального представления фильтра должна быть не ниже 2, т.е. $m \geq 2$, при этом фильтрация оказывается удовлетворительной, если флуктуация наблюдаемого выходного сигнала за счет шума не превышает 25 % его абсолютного значения.

Выводы. Получившая в работе дальнейшее развитие теория формирования заданных параметров переходных процессов в замкнутых системах автоматического управления объектами с изменяющимися статическими и динамическими характеристиками на базе информации о величине контролируемого параметра и скорости его изменения в начальной стадии этих процессов, позволяет синтезировать адаптивные САР, в которых и при наличии возмущающих воздействий и помех в контролируемом сигнале величина рассогласования в ходе переходного процесса достигает нулевого значения за минимальное время без изменения своего знака.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: замкнутая система, регулирование, управление, алгоритм, переходный процесс, адаптация, пределы допустимости.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Процуто В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В. С. Процуто. – М.: Недра, 1987. – 253 с.
2. Барский Л. А. Системный анализ в обогащении полезных ископаемых / Л. А. Барский, В. З. Козин. – М.: Недра, 1978. – 486 с.
3. Morkun V. S. Estimation of the crushed ore particles density in the pulp flow based on the dynamic effects of high-energy / V. S. Morkun, N. V. Morkun // *Ultrasound. Archives of acoustics*. – 2018. – Vol. 43, Issue 1. – P. 61–67.
4. Марюта А. Н. Автоматический контроль гранулометрического состава сыпучих материалов / А. Н. Марюта, Ю. Г. Качан. – Киев; Донецк: Вища школа, 1977. – 119 с.
5. Golik V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – No. 3. – P. 49–52. URL: http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_3/007%20Golik%20Vladimir.pdf.
6. Morkun V. S. Automatic control of the ore suspension solid phase parameters using high-energy ultrasound / V. S. Morkun, N. V. Morkun, V. V. Tron // *Radio electronics, Computer science, Control*. – 2017. – № 3. – P. 175–182. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-20>
7. Morkun V. The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp [Electronic resource] / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // *Ultrasonics*. – 2015. – Vol. 56. – P. 340–343. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X14002443>.
8. Марюта А. Н. Автоматизация процессов обогащения руд / А. Н. Марюта, А. Н. Давидкович, Т. И. Гуленко, В. А. Кондратец. – Киев: Техніка, 1972. – 140 с.
9. Morkun V. Ultrasonic facilities complex for grinding and ore classification process control / V. Morkun, N. Morkun, A. Pikilnyak // 37th IEEE International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Kyiv, Ukraine, Date: APR 18–20. – 2017. – P. 409–413.
10. Golik V. Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures / V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – No. 3. – P. 38–41. URL: http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_3/004%20Golik%20Vladimir.pdf
11. Anderson B. D. O. Linear optimal control / B. D. O. Anderson, J. B. Moore. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1971. – 413 p.
12. Boyd S. P. Linear controller design: limits of performance [Text] / S. P. Boyd, C. H. Barratt // Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1991. – 426 p.
13. Morkun V. S. Content and teaching technology of course “ecological geoinformatics” in training of future mining engineers / V. S. Morkun, S. O. Semerikov, S. M. Hryshchenko // *Information technologies and learning tools*. – 2017. – Vol. 57, No. 1. – P. 115–125.
14. Doyle J. C. Feedback control theory / J. C. Doyle, B. A. Francis, A. R. Tannenbaum. – Macmillan, New York, 1992. – 219 p.
15. Tao G. Adaptive control design and analysis / G. Tao. – Hoboken: Wiley-Interscience, 2003. – 618 p.
16. Ioannou P. A. Adaptive control tutorial / P. A. Ioannou, B. Fidan. – Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2006. – 389 p.
17. Моркун В. С. Алгоритмы адаптивного управления технологическими процессами обогащения полезных ископаемых / В. С. Моркун, В. Н. Потапов // *Обогащение руд*. – 1986. – № 5. – С. 44–46.
18. Desoer C. A. Feedback systems: input-output properties / C. A. Desoer, M. Vidyasagar. – New York: Academic Press, 1975. – 264 p.
19. Doyle J. C. Analysis of feedback systems with structured uncertainties / J. C. Doyle // *IEE Proceedings D (Control Theory and Applications)*. – 1982. – Volume 129, Issue 6. – P. 242–250.
20. Skogestad S. Multivariable feedback control – analysis and design / S. Skogestad, I. Postlethwaite. – Chichester: John Wiley and Sons Ltd., 1995. – 585 p.

ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМІВ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЇЇ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ

Хобін В. А. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

Левінський В. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

Левінський М. В. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри автоматизації технологічних процесів і робототехнічних систем Одеської національної академії харчових технологій, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Цілий ряд об'єктів технологічного типу відзначаються суттєво нелінійною статичною характеристикою, коли коефіцієнт передачі по каналу регулювання змінюється в десять і більше раз. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Зберегти компроміс між показниками якості і стійкістю процесів у системі з такими об'єктами дозволяють САР із самоналагодженням параметрів регулятора. Їх алгоритми повинні забезпечувати ефективне функціонування системи не лише в сталих, але і в перехідних по каналу завдання режимах, коли об'єкт переводиться із початкового стану, частіше з «холостого ходу», в стан номінального навантаження. Регульована змінна в пускових режимах не повинна порушувати регламентні значення технологічного процесу, бо це може призвести до виникнення аварійних ситуацій.

Мета. Вдосконалити алгоритми САР із самоналагодженням для пускових режимів об'єкту, забезпечивши за час пуску завершення процедури самоналагодження і зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

Метод. За рахунок аналізу сприятливих і несприятливих факторів для самоналагодження евристичним методом запропоноване коректування алгоритмів, отриманих для сталого режиму, на період пуску об'єкта. Перевірка ефективності коректування алгоритмів проводиться шляхом імітаційного моделювання системи в середовищі Simulink пакета програм Matlab.

Результати. Сплановані і проведені комп'ютерні експерименти з моделями альтернативних структур самоналагоджувальної системи. Отримані графіки і числові показники, які характеризують ефективність її роботи в пускових режимах.

Висновки. Для завершення процедури самоналагодження протягом періоду пуску та для запобігання неприпустимих динамічних помилок регулювання необхідно: а) збільшити коефіцієнт передачі регулятора і зменшити інерційність фільтрів в контурі самоналагодження на період пуску; б) встановити початкові значення коефіцієнта передачі моделі об'єкта регулювання на рівні максимально можливих значень його коефіцієнта передачі.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: САР із самоналагодженням, коефіцієнт передачі, складова власного руху, пусковий режим.

АБРЕВІАТУРИ

ОР – об'єкт регулювання;
ПКС – параметри контуру самоналагодження;
САР – система автоматичного регулювання;
САРС – САР самоналагоджувальна;
ФНЧ – фільтр низької частоти.

НОМЕНКЛАТУРА

A^z – константа запасу стійкості САР;
 $\mathcal{F}(t)$ – коефіцієнт масштабування в режимі пуску;
 $e(t)$ – помилка регулювання САР;
 $e_l(t)$ – помилка регулювання контуру самоналагодження $k_m(t)$;
 $e_z(t)$ – помилка регулювання контуру масштабування $k_m(t)$;
 $f_k(t)$ – координатні неконтрольовані збурення;
 $f_p(t)$ – параметричні неконтрольовані збурення;
 $f_n(t)$ – широкопasmові шуми;
 I_1, I_3 – показники точності роботи САРС;
 $k_o(t)$ – коефіцієнт передачі ОР;
 $k_m(t)$ – коефіцієнт передачі моделі ОР;
 $k_{mf}(t)$ – значення коефіцієнта передачі моделі ОР на виході погоджувального фільтра;
 k_m^z – початкове задане значення коефіцієнта передачі моделі ОР;

k_r – коефіцієнт передачі регулятора САР;
 k_{pr} – коефіцієнт передачі регулятора контуру самоналагодження $k_m(t)$;
 L – логічний оператор;
 s – оператор диференціювання;
 t_{mod} – час моделювання;
 t_p – час пуску ОР;
 T_d – постійна часу диференціатора;
 T_{oe} – постійна часу усереднюючого фільтра;
 T_{mf} – постійна часу погоджувального фільтра;
 T_{zs} – постійна часу задатчика;
 $u(t)$ – керуючий вплив регулятора САР;
 $u_{f_k}(t)$ – складова $u(t)$, викликана $f_k(t)$;
 $u_{y^{zs}}(t)$ – складова $u(t)$, викликана $y^{zs}(t)$;
 $u_L(t)$ – керуючий вплив блока перевірки синфазності змінних;
 $u_{sd}(t)$ – керуючий вплив регулятора σ_1 ;
 $W^d(s)$ – передатний оператор диференціатора;
 $W^o(s)$ – передатний оператор ОР;
 $W^r(s)$ – передатний оператор регулятора САР;
 $W^{fj}(s)$ – передатний оператор ФНЧ для зменшення впливу $f_n(t)$;
 $W^m(s)$ – передатний оператор моделі ОР;
 $W^{bf}(s)$ – передатний оператор смугових фільтрів;

$W^{eo}(s, t)$ – передатний оператор усереднюючих фільтрів;

$W^{mj}(s, t)$ – передатний оператор погоджувального фільтра;

$W^{pr}(s, t)$ – передатний оператор регулятора k_m ;

$W^{sd}(s)$ – передатний оператор регулятора σ_1 ;

$W^e(s)$ – передатний оператор задатчика;

$y_o(t)$ – регульована змінна ОР;

$y(t)$ – регульована змінна ОР на виході ФНЧ;

y^z – задане значення регульованої змінної;

$y^{zs}(t)$ – задана змінна на виході задатчика;

$y^{zd}(t)$ – змінна на виході диференціатора;

y_{reg} – регламентне значення регульованої змінної;

$y_m(t)$ – змінна на виході моделі ОР;

$\tilde{y}_a(t)$, $\tilde{y}_{ma}(t)$ – змінні на виходах смугових фільтрів;

$\tilde{y}_k(t)$, $\tilde{y}_{mk}(t)$ – змінні на виходах ключів з пам'яттю;

$\hat{\sigma}_{\tilde{y}_a}(t, t_{oc})$, $\hat{\sigma}_{\tilde{y}_{ma}}(t, t_{oc})$ – оцінки середньоквадратичних відхилень змінних на виходах обчислювачів оцінок;

$\sigma_1(t)$, $\sigma_2(t)$ – масштабовані значення оцінок;

σ^z – задане значення середньоквадратичного відхилення.

ВСТУП

Об'єкти технологічного типу досить часто характеризуються суттєво нелінійною статичною характеристикою. Коефіцієнт передачі по каналу регулювання у них може змінюватися більше, ніж в десять раз [1, 2, 3]. При цьому типові системи регулювання з незмінними параметрами регулятора втрачають стійкість і переходять у позиційний режим роботи. Зберегти компроміс між показниками якості і стійкістю процесів у системі з такими об'єктами дозволяють САР із самоналагодженням параметрів регулятора [4, 5]. Їх алгоритми повинні забезпечували ефективне функціонування системи не лише в сталих, але і в перехідних по каналу завдання режимах, коли об'єкт переводиться із початкового стану, частіше з «холостого ходу», в стан номінального навантаження. Регульована змінна ОР в пускових режимах не повинна порушувати регламентні значення технологічного процесу, бо це може призвести до виникнення аварійних ситуацій. Складність вирішення цієї задачі обумовлена апіорною невизначеністю початкового значення коефіцієнта передачі об'єкта на момент замикання зворотного зв'язку в САРС.

Об'єкт дослідження в даній статті – самоналагоджувальна система автоматичного регулювання об'єктом технологічного типу.

Предмет дослідження – алгоритми самоналагодження коефіцієнта передачі регулятора САР для сталих режимів і їх модифікація для пускових режимів об'єкта.

Мета досліджень – вдосконалити алгоритми САРС для пускових режимів об'єкту, забезпечивши за час пус-

ку завершення процедури самоналагодження і зниження ймовірності виникнення аварійних ситуацій.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Математична модель САРС описується двома взаємозалежними системами диференціальних рівнянь, представлених в операторній формі запису, і алгебраїчними рівняннями: (1) – для САР і (2) – для блоку самоналагодження [5]:

$$\begin{cases} y_o(t) = W^o(s) \cdot (u(t) + f_k(t)) \cdot k_o(t) + f_n(t) \\ y(t) = W^{lf}(s) \cdot y_o(t), \quad y(t=0) \\ u(t) = W^r(s) \cdot (y^z - y(t)) \cdot k_r(t), \quad u(t=0) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} y_m(t) = W^m(s) \cdot u(t) \\ \tilde{y}_a(t) = W^{bf}(s) \cdot y(t) \\ \tilde{y}_{ma}(t) = W^{bf}(s) \cdot y_m(t) \\ u_L(t) = L(\tilde{y}_a(t), \tilde{y}_{ma}(t)) \\ \tilde{y}_k(t) = \begin{cases} \tilde{y}_a(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_a(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases} \\ \tilde{y}_{mk}(t) = \begin{cases} \tilde{y}_{ma}(t), u_L(t) = 1 \\ \tilde{y}_{ma}(t = t_k), u_L(t) = 0 \end{cases} \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_k^2(t)} \\ \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) = \sqrt{W^{eo}(s) \cdot \tilde{y}_{mk}^2(t)} \\ \sigma_1(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_k}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t) \\ \sigma_2(t) = \hat{\sigma}_{\tilde{y}_{mk}}(t, t_{oc}) \cdot u_{sd}(t) \cdot k_m(t) \\ k_m(t) = W^{pr}(s) \cdot (\sigma_1(t) - \sigma_2(t)), \quad k_m(t=0) \\ u_{sd}(t) = W^{sd}(s) \cdot (\sigma^z - \sigma_1(t)), \quad u_{sd}(t=0) \\ k_r(t) = A^z / k_m(t), \end{cases} \quad (2)$$

де $y(t=0)$, $u(t=0)$, $k_m(t=0)$, $u_{sd}(t=0)$ – початкові значення відповідних змінних в момент пуску системи при $t=0$.

Точність альтернативних структур САРС визначається за показниками:

$$I_1 = \frac{1}{t_{mod}} \int_0^{t_{mod}} e^2(t) dt, \quad I_3 = \frac{1}{t_{mod}} \int_0^{t_{mod}} (k_o(t) - k_m(t))^2 dt \quad (3)$$

При пусковій об'єкта за час t_p керована змінна $y(t)$ не повинна вийти за регламентні допуски y_{reg} , тобто:

$$y(t) \leq y_{reg} \quad \text{при } t \in (0, t_p). \quad (4)$$

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

У статтях [4, 5] розглядалася робота САРС при впливі на об'єкт регулювання (ОР) технологічного типу координатних збурень $f_k(t)$ і шумів $f_n(t)$ випадкового характеру, а також параметричних збурень $f_p(t)$, які проявлялися в змінах його коефіцієнта передачі $k_o(t)$. При цьому передбачалося, що регульована змінна $y(t)$ уже вийшла в околицю заданого значення $y^z \equiv \text{const}$ і перехідні складові в $y(t)$, викликані зміною $y^z(t)$, відсутні.

У даній статті розглядається робота САРС у зворотній ситуації, коли задане значення $y^r(t)$ регульованої змінної $y(t)$ змінюється. Одним з найбільш складних для ефективного управління є зміна $y^r(t)$ від значення, що відповідає вихідному стану об'єкта (частіше «холостому ходу»), до значення його номінального стану, тобто керування пусковими режимами ОР. Це стандартна (типова) задача керування [6, 7, 8], алгоритми якої реалізують «безударний» пуск. Його особливості – узгодження початкових значень заданої і регульованої змінних, тобто забезпечення рівності $y^r(t=0)=y(t=0)$ і формування за допомогою задатчика «плавної», наприклад, експонентної траєкторії зміни $y^{zs}(t)$, що виводить ОР на номінальний режим роботи.

Вимоги до САРС у пусковому режимі – за час перехідного процесу, тобто дуже швидко, забезпечити самоналагодження коефіцієнта передачі головного регулятора на апіорі невідоме значення коефіцієнта передачі об'єкта керування; забезпечити безударний, плавний перехід у роботі системи від пускового до сталого режиму; мінімізувати ризики порушень регулюваною змінною регламентних значень.

Передумови для вирішення задачі наступні. У пускових режимах ОР проявляються два типи специфічних факторів: а) «сприятливих» – які сприяють скороченню часу самоналагодження; б) «несприятливих» – які підвищують ризики виникнення аварійних ситуацій через більші відхилення регульованої змінної $y(t)$ від траєкторії змін $y^{zs}(t)$ заданого значення.

До сприятливих факторів можна віднести наступні три. Перший – у пускових режимах впливом координатних збурень $f_k(t)$ на регульовану змінну $y(t)$ можна знехтувати, тому що: а) у момент замикання контуру регулювання, тобто при $t=0$, алгоритми «безударного» пуску компенсують наслідки впливу $f_k(t=0)$ на регульовану змінну $y(t)$; б) спектральний склад $f_k(t)$ у порівнянні зі спектральним складом керуючого впливу $u(t)$ більш низькочастотний і на інтервалі часу зміни $y^{zs}(t)$ значні зміни $f_k(t)$ неможливі. Другий – у пускових режимах складова керуючого впливу $u_{f_k}(t)$, яка викликана впливом $f_k(t)$ на ОР, набагато менша за абсолютним значенням складової $u_{y^{zs}}(t)$, викликаної зміною $y^{zs}(t)$. Для таких умов можна прийняти $u(t) \approx u_{y^{zs}}(t)$. Третій – складова керуючого впливу $u_{y^{zs}}(t)$ одночасно впливає на ОР і на його модель, тому фази коливань змінних $y(t)$ і $y_m(t)$ практично збігаються.

Несприятливий фактор один. Він пов'язаний з апіорною невизначеністю фактичних властивостей ОР, точніше – значенням його коефіцієнта передачі $k_o(t=0)$ на момент замикання контуру регулювання САРС. У таких умовах формальний підхід до вибору коефіцієнта передачі моделі ОР $k_m(t=0)$ може привести до того, що розраховане по суттєво заниженому значенню $k_m(t=0)$ початкове значення коефіцієнта передачі $k_r(t=0)$ головного регулятора виявиться не виправдано високим. Це, при наявності істотного запізнення в контурі регулювання, приведе до перехід-

них процесів зі значними динамічними відхиленнями $y(t)$ від $y^{zs}(t \rightarrow \infty) = y^r$, що спровокує виникнення аварійних ситуацій.

Проілюструвати перераховані фактори зручно на прикладі результатів моделювання САРС із розімкнутим контуром самоналагодження, коли $k_o(t)=1,2 \cdot k_m(t)$ (див. рис. 1).

Аналіз процесів в такій САРС показує наступне: за час зміни $y^{zs}(t)$ низькочастотні координатні збурення $f_k(t)$ суттєво не міняються (сприятливий фактор 1). Керуючий вплив $u(t)$, хоча й складається із двох складових, але очевидно, що внеском $u_{f_k}(t)$ у порівнянні $u_{y^{zs}}(t)$ у пусковому режимі можна знехтувати (сприятливий фактор 2). Зміни змінних $y(t)$ і $y_m(t)$ під впливом складової $u_{y^{zs}}(t)$ відбуваються практично синфазно (сприятливий фактор 3). Але навіть при відносно невеликій невідповідності коефіцієнтів передачі $k_o(t)$ і $k_m(t)$ динамічні відхилення регульованої змінної $y(t)$ відносно $y^{zs}(t)$ у пусковому режимі досить великі (більше 10), що може привести до виникнення аварійних ситуацій (несприятливий фактор).

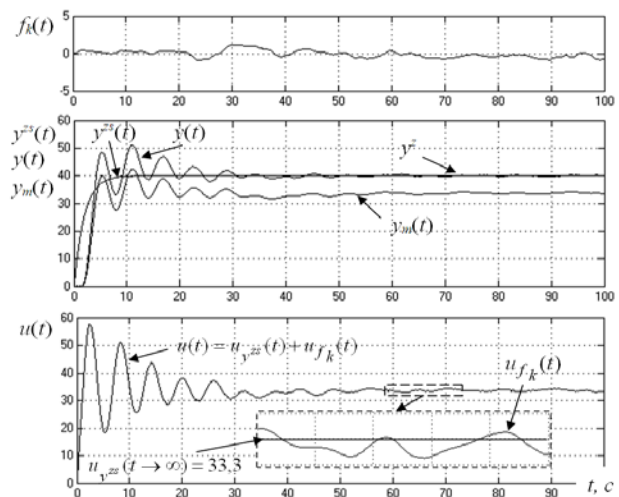


Рисунок 1 – Фрагменти змін змінних САРС з розімкнутим контуром самоналагодження в пусковому режимі при $k_o(t)=1,2 \cdot k_m(t)$

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Вимоги до процесу самоналагодження САРС у пускових режимах вимагають коректування алгоритмів, які були розроблені для сталих режимів. Аналіз об'єктивних факторів, проведений вище, визначив наступні раціональні шляхи коректування:

а) збільшення швидкодії контуру самоналагодження для його завершення за час пускового режиму – досягається за рахунок збільшення коефіцієнта передачі регулятора $k_m(t)$ контуру самоналагодження і зменшення інерційності усереднюючих фільтрів;

б) безударне перемикання контуру самоналагодження з пускового на сталий режим – досягається за рахунок плавної зміни коефіцієнта передачі регулятора k_m контуру самоналагодження і інерційності усере-

дноючих фільтрів, наприклад, пропорційно $dy^{zs}(t)/dt$;

в) мінімізація ризиків порушень регульованою змінною регламентних значень – досягається за рахунок встановлення таких початкових значень коефіцієнта передачі $k_m(t=0)$ моделі ОР, при яких перехідні процеси в контурі регулювання САРС навіть при несприятливих фактичних значеннях $k_o(t) \rightarrow k_o^{\max}$, будуть мати мінімальні значення максимальних динамічних відхилень $y(t)$ від y^z .

Структурна схема САРС, яка відображає реалізацію запропонованих шляхів коректування, представлена на рис. 2. На цій схемі, у порівнянні з її варіантом в [5], додаткові або видозмінені елементи структури САРС виділені тонуванням.

Математичний опис виділених елементів структури САРС для максимально простого варіанта їх реалізації представлений нижче.

Задатчик визначає траєкторію виходу регульованої змінної $y(t)$ на задане значення y^z по наступному рівнянню руху, представленому в операторній формі:

$$y^{zs}(t) = W^z(s) \cdot y^z, \quad y^{zs}(t=0) = y(t=0). \quad (5)$$

Одним з найбільш простих варіантів задатчика є його реалізація у вигляді інерційної ланки першого порядку, коли $W^z(s) = 1/(T_{zs}s + 1)$. Встановлення початкових умов $y^{zs}(t=0) = y(t=0)$ забезпечує безударність замикання контуру регулювання.

Рациональна структура обчислювача коефіцієнта масштабування $d^z(t)$, яка обґрунтована в ході комп'ютерних експериментів, має вигляд:

$$d^z(t) = \begin{cases} 1 + y^{zd}(t), & \text{при } 1 + y^{zd}(t) < d^{z\max} \\ d^{z\max}, & \text{при } 1 + y^{zd}(t) \geq d^{z\max} \end{cases}, \quad (6)$$

$$y^{zd}(t) = W^d(s) \cdot y^{zs}(t) = (T_d s / (0,2 \cdot T_d s + 1)) \cdot y^{zs}(t). \quad (7)$$

Константа $d^{z\max}$ обмежує зміни $k_{pr}(t)$, $T_{oe}(t)$, $T_m(t)$ і тому впливає на стійкість контуру самоналагодження.

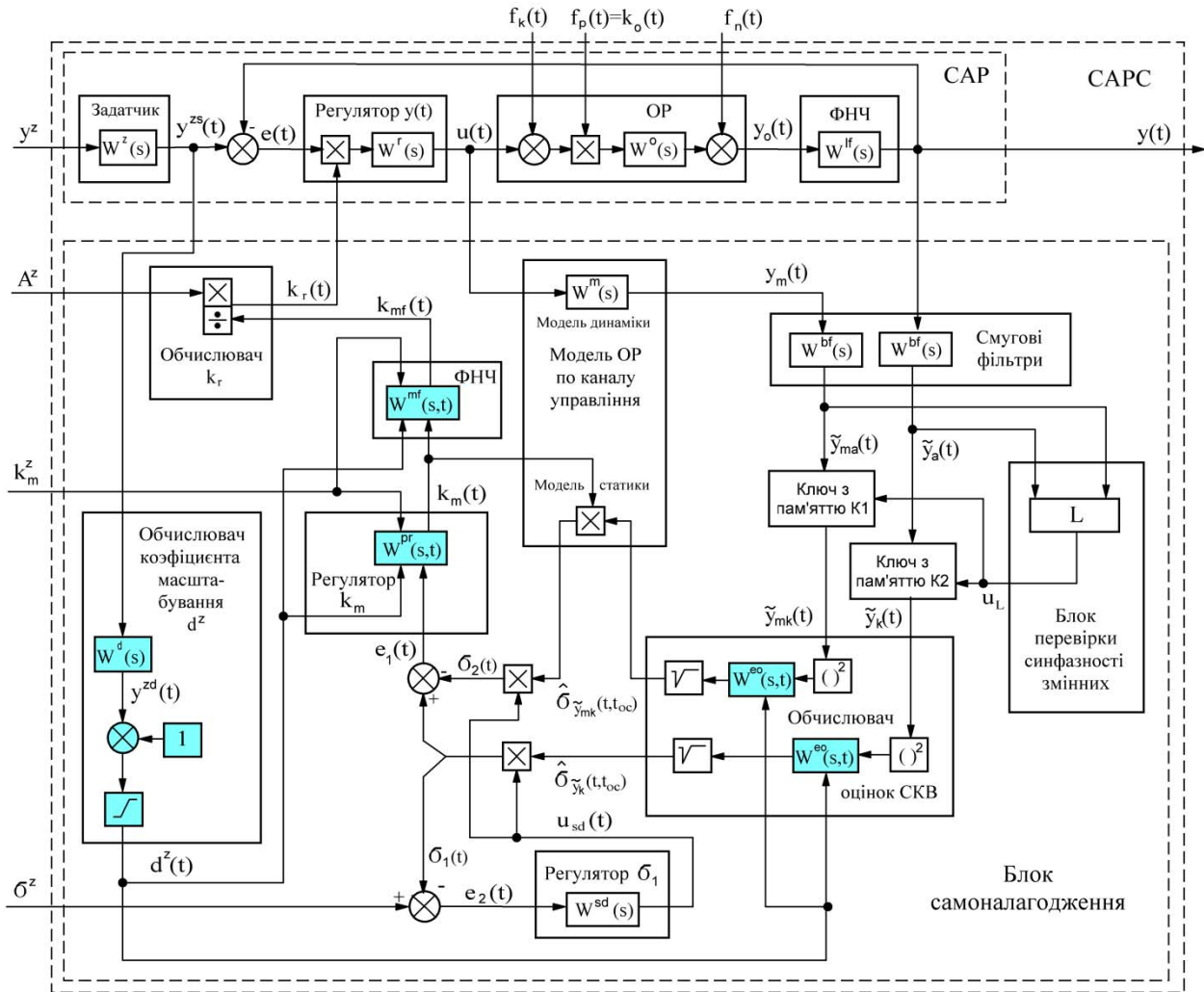


Рисунок 2 – Структурна схема САРС

В [5] були визначені оптимальні параметри k_{pr}^* , T_{oe}^* , T_{mf}^* для сталого режиму функціонування САРС. В режимі пуску їх масштабування ведеться по співвідношеннях:

$$k_{pr}(t) = k_{pr}^* \cdot d^z(t), \quad T_{oe}(t) = T_{oe}^* / d^z(t), \\ T_{mf}(t) = T_{mf}^* / d^z(t). \quad (8)$$

Надалі дане коректування алгоритмів самоналагодження САРС будемо скорочено називати масштабуванням ПКС.

Безударний перехід між пусковим і сталим режимом роботи контуру самоналагодження САРС забезпечується характером зміни змінної $d^z(t)$ у фінальній стадії пускового режиму. Вона зменшується прямопропорційно швидкості зміни $y^{zs}(t)$, прагнучи до одиниці. При цьому поточні значення параметрів $k_{pr}(t)$, $T_{oe}(t)$, $T_{mf}(t)$ відповідно до (8) змінюються, прагнучи до своїх оптимальних для сталого режиму значень k_{pr}^* , T_{oe}^* , T_{mf}^* .

Важливим ресурсом мінімізації ризиків порушень керованою змінною регламентних обмежень у пусковому режимі є вибір початкових значень коефіцієнта передачі моделі ОР $k_m(t=0) = k_m^z$ і $k_{mf}(t=0) = k_m^z$, які із часом будуть перераховуватися регулятором $W^{pr}(s,t)$ і згладжуватися фільтром низької частоти $W^{mf}(s,t)$. Встановлення цих початкових значень здійснюється за рахунок встановлення відповідних (однакових) початкових умов інтеграторів регулятора і фільтра. У ситуації, коли фактичне значення коефіцієнта передачі $k_o(t=0)$ ОР невідоме, доцільно прийняти в якості $k_m(t=0)$ і $k_{mf}(t=0)$ значення $k_m^z = k_o^{\max}$. Це знизить первісне значення $k_r(t=0)$ коефіцієнта передачі головного регулятора, яке обчислюється в обчислювачі k_r по залежності $k_r(t) = A^z / k_{mf}(t)$. У результаті вплив несприятливого фактора буде мінімізований.

Системи рівнянь (1–2) з доповненнями (5–8) аналітично вирішені бути не можуть. Конструктивна альтернатива такому рішення – імітаційне моделювання САРС в середовищі Simulink/Matlab [9, 10].

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Метою комп'ютерних експериментів було проілюструвати можливості впливу на показники якості процесів регулювання і самоналагодження в САРС деяких основних параметрів налагодження. Задача параметричної оптимізації САРС у пускових режимах не ставилася по декільком обставинам:

а) при керуванні об'єктами технологічного типу перехідні процеси в режимі пуску становлять малу частку часу в порівнянні із сталими процесами, що, зокрема, робить неактуальною мінімізацію часу перехідного процесу;

б) у пускових режимах при зміні регульованої змінної $y(t)$ у самому широкому діапазоні необхідно

враховувати нелінійність властивостей ОР, а у формальній постановці зробити це практично неможливо.

Особливості експериментів:

а) їхньою основою стали ті ж моделі, на яких проводилися дослідження роботи САРС у сталому режимі [5]. При цьому додатково введені моделі задатчика і обчислювача коефіцієнта масштабування d^z , скоректовані моделі регулятора k_m , усереднюючих та погоджувального фільтрів;

б) інтервал моделювання обраний рівним $t_{mod}=50$ с. За цей час для всіх розглянутих варіантів САРС перехідний процес пускового режиму практично закінчувався;

в) показники ефективності САРС (3) аналогічні [5], але межі інтегрування включають тільки інтервал пускового режиму.

г) значення постійних часу задатчика T_z , по черзі, встановлювалися рівними: $T_z=2$ с, $T_z=5$ с, $T_z=10$ с;

д) модель обчислювача коефіцієнта масштабування $d^z(t)$ відповідає виразам (6), (7), значення параметрів яких на основі попередніх експериментів прийняті наступними: $d^{z\max} = 20$, $T_d=5$ с.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Моделювання містило в собі декілька груп експериментів, результати двох з них представлені на рис. 3, 4. На рис. 3 – результати моделювання САРС за структурою [5] без масштабування ПКС для двох різних фактичних значень коефіцієнта передачі $k_o(t)=5$ і $k_o(t)=0,45$ об'єкта з найбільш імовірним початковим значенням коефіцієнта передачі $k_m(t=0)=1$ моделі ОР. На рис. 4 – результати моделювання САРС із масштабуванням ПКС при встановленні початкових умов $k_m(t=0)$ на рівень $k_m(t=0) = k_m^z = k_o^{\max}$.

Аналіз результатів експериментів:

а) з рис. 3 для САРС без масштабування ПКС впливає, що у всіх випадках самоналагодження $k_m(t)$ до значення $k_o(t)$ відбувається раніше, ніж закінчуються перехідні процеси $y(t)$ пускового режиму. Якщо фактичне значення коефіцієнта передачі $k_o(t)=5$ ОР перевищує початкове значення коефіцієнта передачі $k_m(t=0)=1$ його моделі, то при значеннях постійної часу задатчика $T_z=2$ с, $T_z=5$ с регульована змінна $y(t)$ порушує регламентні значення $y_{reg}=60$ (див. рис. 3а, 3б). При $T_z=10$ с перехідний процес $y(t)$ пускового режиму сильно коливальний.

Якщо $k_o(t)=0,45$, що менше, ніж $k_m(t=0)=1$, то перехідні процеси $y(t)$, $k_m(t)$ пускового режиму мають аперіодичний характер, порушень $y(t)$ регламентних значень не спостерігається;

б) з рис. 4 для САРС із масштабуванням ПКС впливає, що час самоналагодження $k_m(t)$ до значення $k_o(t)=5$ у порівнянні з рис. 3 скоротився. Інтенсифікація самоналагодження знайшла своє відбиття і у значеннях показників I_1 і I_3 , які на рис. 4 менші, ніж на рис. 3. Перехідні процеси $y(t)$, $k_m(t)$ пускового режиму набули аперіодичний характер. Вихід керованої змінної $y(t)$ на задане значення y^z відбувається без порушень регламентних значень $y_{reg}=60$ навіть тоді, коли

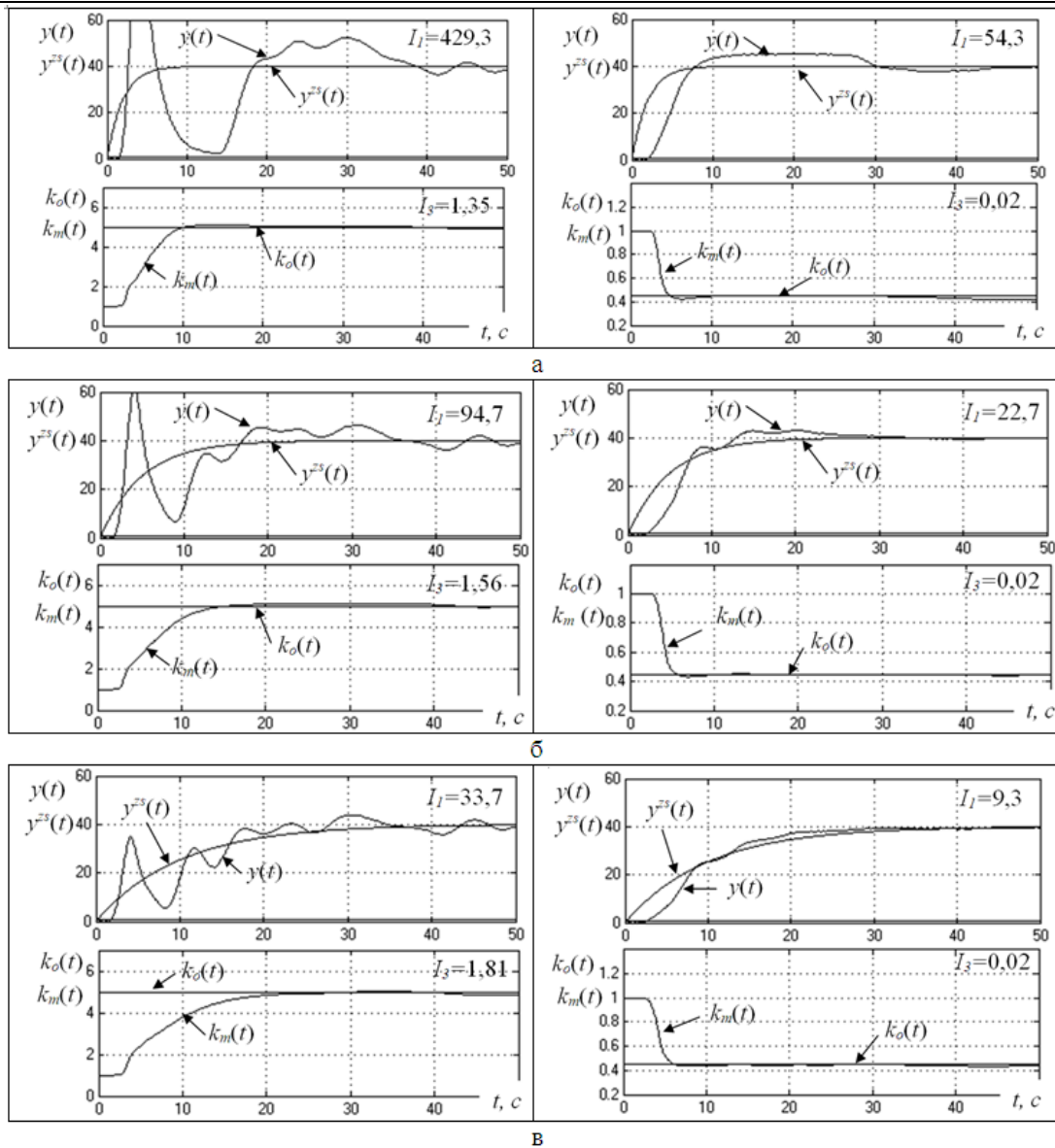


Рисунок 3 – Фрагменти змін змінних САРС без масштабування ПКС у пускових режимах з різними постійними часу T_z задатчика:
а – $T_z=2$ с; б – $T_z=5$ с; в – $T_z=10$ с при $k_m(t=0)=1$ і різних значеннях $k_o(t)$

траєкторія $y^{zs}(t)$, яка задається задатчиком, швидка ($T_z=2$ с, див. рис. 4а). Правда, для випадку $k_o(t)=0,45$ спостерігається деяке погіршення показників якості I_1 і I_3 у порівнянні з рис. 3. Але, враховуючи, що час пускового режиму незрівнянно менший часу роботи ОР технологічного типу у сталому режимі, то даними погіршеннями можна знехтувати.

Графіки, представлені на рис. 4, також показують, що за рахунок плавного зменшення значень змінної $d^f(t)$ у фінальній стадії пускового режиму змінна $k_m(t)$ також змінюється плавно, безударно при переході до її значень у сталому режимі роботи САРС.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Результати, отримані при дослідженні САРС під час пускових режимів, додатково підтверджують правомірність концепції самоналагодження регулятора в замкнутій САР на основі пасивної ідентифікації

об'єкта регулювання з виділенням із загального руху регульованих змінних об'єкта і його моделі складових їхнього власного руху. Під час пуску складова власного руху регульованої змінної суттєво превалює над її вимушеною складовою, що створює сприятливі умови для інтенсифікації процесу самоналагодження.

При керуванні об'єктами неперервних технологій слід відмітити, що для них перехідні процеси в режимі пуску становлять, як правило, малу частку часу в порівнянні зі сталими процесами. Тому задача мінімізації часу переходного (пускового) процесу для таких об'єктів неактуальна. Для об'єктів з періодичними технологіями задачу пошуку оптимальних значень параметрів САРС для пускового режиму вже доцільно вирішувати. Очевидно, вона повинна зводитися до

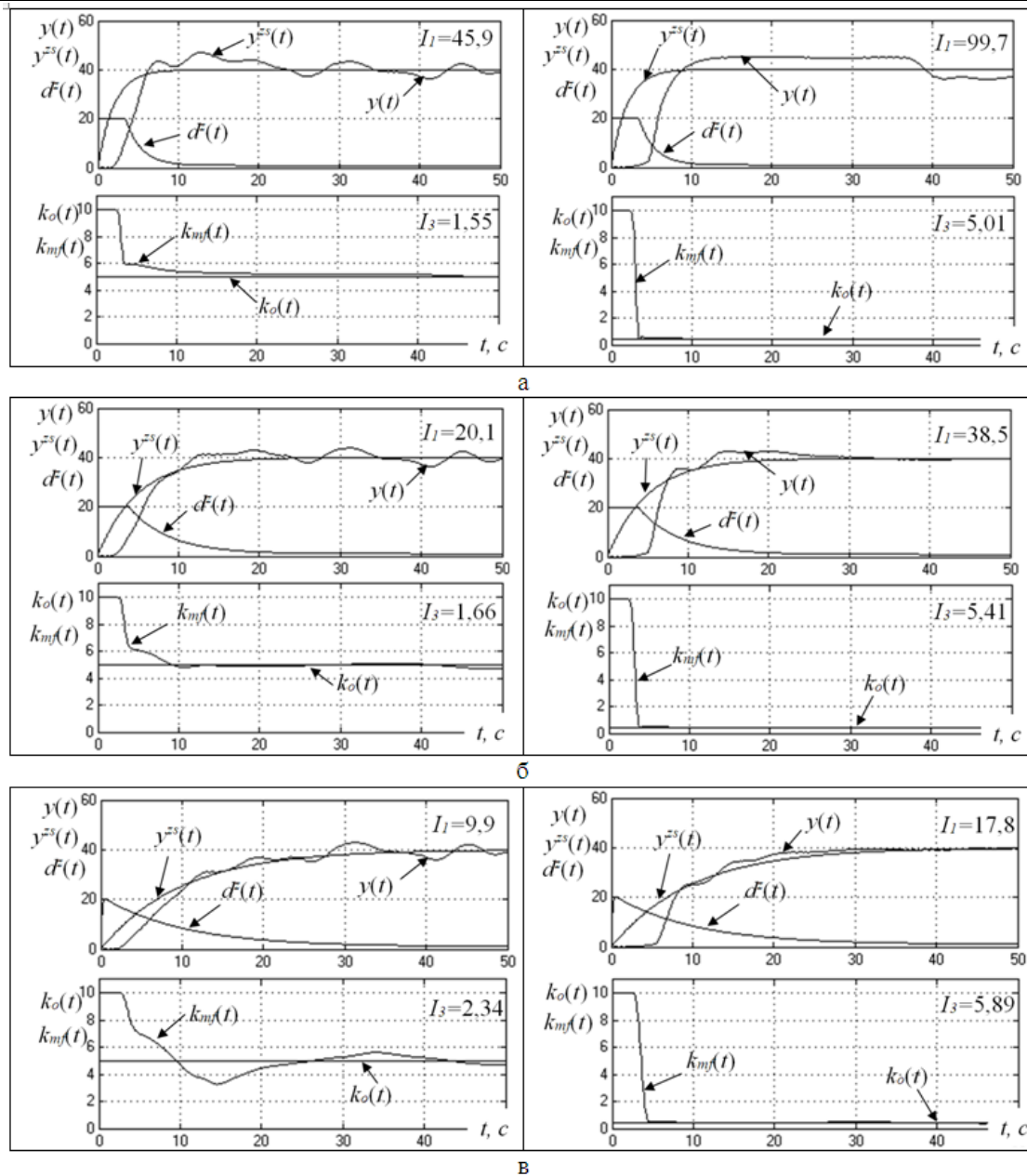


Рисунок 4 – Фрагменти змін змінних CAPS із масштабуванням ПКС у пускових режимах для різних постійних часу T_z задатчика:

а – $T_z=2$ с; б – $T_z=5$ с; в – $T_z=10$ с при $k_m(t=0)=k_o^{\max}=10$ і різних значеннях $k_o(t)$

пошуку компромісу між часом перехідного процесу і ризиками порушень регульованою змінною регламентних значень.

ВИСНОВКИ

1. CAPS, розроблена в [5], параметри якої оптимізовані для сталих режимів роботи, може бути використана для керування ОР технологічного типу і у пускових режимах. При цьому, щоб знизити ризик порушень регульованою змінною своїх регламентних значень, необхідно вибрати траєкторію зміни заданого значення, яка повільно змінюється, і раціональне початкове значення коефіцієнта передачі моделі ОР. Наприклад, встановити постійну часу аперіодичного задатчика більшу, ніж 7...10 часів запізнення об'єкта

регулювання, і початкове значення коефіцієнта передачі моделі близьким до максимально можливого значення коефіцієнта передачі ОР.

2. Прискорити процес виходу регульованої змінної на задане значення і при цьому мінімізувати ризики порушень регламентних значень можна за рахунок:

а) масштабування параметрів контуру самоналагодження, а саме – збільшення коефіцієнта передачі регулятора в контурі самоналагодження і зменшення інерційності усереднюючих та погоджувального фільтрів пропорційно швидкості зміни заданого значення;

б) встановлення початкових значень коефіцієнта передачі моделі об'єкта керування на рівні максимально можливих значень його коефіцієнта передачі, які встановлюються у вигляді початкових умов на інтег-

раторі регулятора і погоджувального фільтра контуру самоналагодження.

3. Розглянутий приклад масштабування параметрів контуру самоналагодження забезпечує його безударне перемикання з пускового режиму на сталий режим роботи.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках наукової школи «Моделювання і оптимальне керування технологічними процесами зберігання та переробки сільськогосподарської продукції» кафедри «Автоматизація технологічних процесів і робототехнічних систем» Одеської національної академії харчових технологій за підтримки компанії «С-Інжиніринг» м. Одеса.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURE

1. Landau I. D. Adaptive Control / I. D. Landau. – London : Springer-Verlag London Limited, 2011. – 234 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1_1
2. Isermann R. Digital Control Systems / R. Isermann. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991. – 325 p. DOI: 10.1007/978-3-642-86420-9
3. Astrom K. The Future of PID Control / K. Astrom, T. Hagglund // IFAC Proceedings Volumes. – 2000. – Volume 33, Issue 4. – P. 19–30. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38216-2
4. Хобин В. А. Оптимизация фильтров собственного движения самонастраивающейся САУ объектом технологического типа / В. А. Хобин, М. В. Левинский // Радіо-

електроніка, інформатика, управління. – 2016. – № 4. – С. 120–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-15

5. Хобин В. А. Принципы, алгоритмы и результаты повышения эффективности самоналагодживающейся системы керування об'єктом технологічного типу / В. А. Хобин, М. В. Левінський // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – №2. – С. 172–181. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-19
6. Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications / [I. D. Landau, R. Lozano, M. M'Saad, A. Karimi]. – New York : Springer London Dordrecht Heidelberg, 2011. – 610 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1
7. Maggio M. The PID+p controller structure and its contextual model-based tuning / M. Maggio, A. Leva // IFAC Proceedings Volumes. – January 2011. – Volume 44, Issue 1. – P. 4101–4106. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01029
8. Kolaj W. PLC-PIDTuner: Application for PID Tuning with SIMATIC S7 PLC Controllers / W. Kolaj, J. Mozaryn, M. Syfert // IFAC Proceedings Volumes. – 2010. – Volume 43, Issue 2. – P. 343–348. DOI: 10.3182/20100607-3-CZ-4010.00061.
9. Xue D. Linear feedback control: analysis and design with MATLAB / D. Xue, Y. Chen, D. Atherton. – Philadelphia: Siam, 2007. – 356 p. DOI: 10.1137/1.9780898718621
10. Higham D. MATLAB Guide, Third Edition / D. Higham, N. Higham. – Philadelphia: Siam, 2016. – 462 p. DOI: 10.1137/1.9781611974669

Стаття надійшла до редакції 15.07.2018.

Після доробки 21.08.2018.

УДК 681.52:62-503.57

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ САМОНАСТРАИВАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ

Хобин В. А. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

Левинский В. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

Левинский М. В. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры автоматизации технологических процессов и робототехнических систем Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Целый ряд объектов технологического типа отличаются существенно нелинейной статической характеристикой, когда коэффициент передачи по каналу регулирования меняется в десять и больше раз. При этом типичные системы регулирования с неизменными параметрами регулятора теряют устойчивость и переходят в позиционный режим работы. Сохранить компромисс между показателями качества и устойчивостью процессов в системе с такими объектами позволяют САР с самонастройкой параметров регулятора. Их алгоритмы должны обеспечивать эффективное функционирование системы не только в установившихся, но и в переходных по каналу задания режимах, когда объект переводится из начального состояния, чаще с «холостого хода», в состояние номинальной нагрузки. Регулированная переменная в пусковых режимах не должна нарушать регламентные значения технологического процесса, потому что это может привести к возникновению аварийных ситуаций.

Цель. Усовершенствовать алгоритмы САР с самонастройкой для пусковых режимов объекта, обеспечив за время пуска завершение процедуры самонастройки и снижение вероятности возникновения аварийных ситуаций.

Метод. За счет анализа благоприятных и неблагоприятных факторов для самонастройки эвристическим методом предложена корректировка алгоритмов, полученных для установившегося режима, на период пуска объекта. Проверка эффективности корректировки алгоритмов проводится путем имитационного моделирования системы в среде Simulink пакета программ Matlab.

Результаты. Спланированы и проведены компьютерные эксперименты с моделями альтернативных структур самонастраивающейся системы. Получены графики и числовые показатели, которые характеризуют эффективность её работы в пусковых режимах.

Выводы. Для завершения процедуры самонастройки на протяжении периода пуска и для предотвращения недопустимых динамических ошибок регулирования необходимо: а) увеличить коэффициент передачи регулятора и уменьшить инерционность фильтров в контуре самонастройки на период пуска; б) установить начальное значение коэффициента передачи модели объекта регулирования на уровне максимально возможных значений его коэффициента передачи.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: САР с самонастройкой, коэффициент передачи, составляющая собственного движения, пусковой режим.

SELF-TUNING CONTROL SYSTEM ALGORITHMS IMPROVEMENT FOR PROVIDING EFFICIENCY OF ITS STARTING REGIMES

Khobin V. A. – 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.

Levinskyi V. M. – PhD., Associate Professor of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

Levinskyi M. V. – PhD., Senior teacher of Automation of Technological Processes and Robot-Technical Systems Department of the Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. A whole series of technological type control objects have substantially nonlinear static characteristic, when gain through control channel changes in ten or more times. At the same time typical control systems with unchanged controller parameters lose their stability and switch to the position mode of operation. Automatic control systems (ACS) with self-tuning of the controller parameters allow to save a compromise between quality indicators and processes stability in the systems with such objects. Their algorithms should provide effective system functioning not only in steady-state, but also in transient modes, when set point changes, when control object is being transferred from the initial state, more often from idling, to the state of nominal load. The controlled variable in the start-up modes must not violate the procedural limits of the technological process, since it can lead to emergency situations.

Objective. To improve the ACS algorithms with self-tuning for the start-up conditions of the control object, ensuring the completion of the self-tuning procedure during the start-up period and lowering the possibility of emergency situations.

Method. Utilizing analysis of the advantageous and disadvantageous factors for the self-tuning procedure, using heuristic method, correction for the algorithms, which were developed earlier for steady-states, was proposed for the start-up period. Algorithms correction efficiency is verified by simulation of the system in the Simulink environment of the MatLab software package.

Results. Computer experiments with models of alternative structures of the self-tuning system were planned and conducted. Obtained figures and numerical values characterize the efficiency of its operation in the start-up modes.

Conclusions. To complete the self-tuning procedure during the start-up period and to prevent unacceptable dynamic control errors, it is necessary to: a) increase the controller gain and decrease the persistence of the filters in the self-tuning loop during the start-up period; b) set the initial value of the control object model gain at the maximum possible level.

KEYWORDS: ACS with self-tuning, gain, own motion component, start-up period.

REFERENCES

1. Landau I. D. Adaptive Control. London, Springer-Verlag London Limited, 2011, 234 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1_1
2. Isermann R. Digital Control Systems. Berlin, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991, 325 p. DOI: 10.1007/978-3-642-86420-9
3. Astrom K., Hagglund T. The Future of PID Control, *IFAC Proceedings Volumes*, April 2000, Volume 33, Issue 4, pp. 19–30. DOI: 10.1016/S1474-6670(17)38216-2
4. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Optimizacija fil'trov sobstvennogo dvizhenija samonastrai-vajushhejsja SAU objektom tehnologicheskogo tipa, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, No. 4, pp. 120–129. DOI: 10.15588/1607-3274-2016-4-15
5. Khobin V. A., Levinskyi M. V. Principi, algoritmi i rezul'tati pidvishhennja efektyvnosti samonalagodzhuvaj'noji sistemi keruvannja ob'ektom tehnologichnogo tipu, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2, pp. 172–181. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-19
6. Landau I. D., Lozano R., M'Saad M., Karimi A. Adaptive Control. Algorithms, Analysis and Applications. New York, Springer London Dordrecht Heidelberg, 2011, 610 p. DOI: 10.1007/978-0-85729-664-1
7. Maggio M., Leva A. The PID+p controller structure and its contextual model-based tuning, *IFAC Proceedings Volumes*, January 2011, Volume 44, Issue 1, pp. 4101–4106. DOI: 10.3182/20110828-6-IT-1002.01029
8. Kolaj W., Syfert M. PLC-PIDTuner: Application for PID Tuning with SIMATIC S7 PLC Controllers, *IFAC Proceedings Volumes*, 2010, Volume 43, Issue 2, pp. 343–348. DOI: 10.3182/20100607-3-CZ-4010.00061
9. Xue D., Chen Y., Atherton D. Linear feedback control: analysis and design with MATLAB, Philadelphia, Siam, 2007, 356 p. DOI: 10.1137/1.9780898718621
10. Higham D., Higham N. MATLAB Guide, Third Edition. Philadelphia, Siam, 2016, 462 p. DOI: 10.1137/1.9781611974669

Наукове видання

**Радіoeлектроніка,
інформатика,
управління**

№ 3/2018

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
Редактор англійських текстів

С. В. Зуб
С. О. Субботін

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі ЗНТУ

Свідоцтво про державну реєстрацію
КВ № 6904 від 29.01.2003.

*Підписано до друку 25.09.2018. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 23,25.
Тираж 300 прим. Зам. № 993.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.