



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 4(47) 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

№ 4(47) 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

№ 4(47) 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. Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації серія КВ №6904.

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтями присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал 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, BIHITI, 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, аппаратне 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’ективний 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:

Андроулідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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 вченугою радою ЗНТУ, протокол № 2 від 08.10.2018.

Журнал зверстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

Веб-сайт журнала: <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 КВ №6904).

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

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

Журнал входит в научометрическую базу Web of Science.

Журнал реферируется и индексируется в ведущих международных и национальных реферативных журналах и научометрических базах данных, а также размещается в цифровых архивах и библиотеках с бесплатным доступом on-line (в т.ч. DOAJ, DOI,

CrossRef, EBSCO, eLibrary.ru / РИНЦ, Google Scholar, Index Copernicus, INSPEC, ISSN, Ulrich's Periodicals Directory, WorldCat, ВИНИТИ, Джэрэло), полный перечень которых представлен на сайте: <http://ric.zntu.edu.ua/about/editorialPolicies#custom-0>.

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Члены редколлегии:

Андроулидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Япония

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

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

Кулик А. С., д-р техн. наук, Украина

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

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

Лиснянский А., канд. техн. наук, Израиль

Марковска-Качмар У., д-р наук, Польша

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, PhD, Greece

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

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

O. O. Drobakhan, 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, PhD, Slovakia

A. Lissianski, PhD, Israel

U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland

V. A. Oleshchuk, PhD in Physics and Mathematics, Norway, Radio Electronics section editor

V. M. Onufrienko, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

M. Paprzycki, PhD, Poland

V. V. Pogosov, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine

O. V. Rubel, PhD, Canada

A. A. Sharpanskyykh, PhD, 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, PhD, 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 ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ.....	7
<i>Bazilo C. V.</i>	
PRINCIPLES AND METHODS OF THE CALCULATION OF TRANSFER CHARACTERISTICS OF DISK PIEZOELECTRIC TRANSFORMERS.....	7
<i>Тютюнник В. А., Дудуш А. С., Флоров А. Д., Трофимов И. Н.</i>	
АНАЛІЗ ДІАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С МАЛЫМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ.....	23
<i>Шмелєва Т. Р.</i>	
ВЕРІФІКАЦІЯ ПРОТОКОЛОВ ТРЕУГОЛЬНИХ КОММУНІКАЦІОННИХ РЕШЕТОК БЕСКОНЕЧНИМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ.....	31
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕлювання.....	42
<i>Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.</i>	
ON THE ANALYTICAL SOLUTION OF A VOLTERRA INTEGRAL EQUATION FOR INVESTIGATION OF FRACTAL PROCESSES.....	42
<i>Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V.</i>	
MODELS OF TRAINING PROCEDURES.....	51
<i>Тарасов В. Н.</i>	
АНАЛІЗ І СРАВНЕННЯ ДВУХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАННЯ С ГІПЕРЭРЛАНГОВСКІМИ ВХОДНИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ.....	61
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	71
<i>Bisikalo O. V., Kovtun V. V., Yuhimchuk M. S., Voytyuk I. F.</i>	
ANALYSIS OF THE AUTOMATED SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE OPERATION RESULTS.....	71
<i>Волошин О. Ф., Маляр М. М., Поліцук В. В., Шаркаді М. М.</i>	
ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕлювання НЕЧІТКІХ ЗНАНЬ.....	84
<i>Humeniuk M. O., Sashchuk I. M., Zhuravsky Yu. V.</i>	
THE CRITERION FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN MULTI ROBOT TEAMS CONTROL.....	96
<i>Kovalenko I. I., Shved A. V., Koval N. V.</i>	
A MODIFIED CASE-BASED REASONING METHOD BASED ON THE ROUGH SET THEORY.....	106
<i>Lymanov I. O., Subbotin S. A., Oliynyk A. A., Drokin I. V.</i>	
METHODS OF LARGE-SCALE SIGNALS TRANSFORMATION FOR DIAGNOSIS IN NEURAL NETWORK MODELS.....	113
<i>Мельников А. Ю., Комиссаров К. М.</i>	
ІССЛЕДОВАННЯ МЕТОДОВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗА БІБЛІОГРАФІЧНИХ ОПИСАНЬ І РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЇ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛІЗА СПИСКА ЛІТЕРАТУРЫ.....	121
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	135
<i>Великодний С. С., Тимофеєва О. С., Зайцева-Великодна С. С.</i>	
МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ОЦІНКИ ПРОЕКТУ ПРИ ВИКОНАННІ РЕІНЖІНІРІНГУ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ.....	135
<i>Berko A., Vysotska V., Lytvyn V., Naum O.</i>	
PLANNING THE ACTIVITIES OF INTELLECTUAL AGENTS IN THE ELECTRONIC COMMERCE SYSTEMS.....	143
<i>Kaidalov D. S., Kovalchuk L. V., Nastenko A. O., Rodinko M. Yu., Shevtsov O. V., Oliynykov R. V.</i>	
COMPARISON OF BLOCK EXPECTATION TIME FOR VARIOUS CONSENSUS ALGORITHMS.....	159
<i>Kotlyarov V. V., Shpylka A. A.</i>	
PRACTICAL CONSIDERATIONS OF GREEDY COMPRESSED SAMPLING METHODS APPLICATION FOR OFDM CHANNEL ESTIMATION.....	172
<i>Кошевий Н. Д., Костенко Е. М., Беляєва А. А.</i>	
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА.....	179
<i>Маштапір С. В., Столбовой М. И.</i>	
АДАПТИВНЫЕ МАТРИЧНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ПОТОКОВ ВИДЕО.....	188
<i>Minukhin S. V., Losev M. U., Sitnikov D. E.</i>	
ANALYSIS OF WAYS FOR EXCHANGING DATA IN NETWORKS WITH PACKAGE COMMUTATION.....	195
<i>Nosov P. S., Ben A. P., Matejchuk V. N., Safonov M. S.</i>	
IDENTIFICATION OF "HUMAN ERROR" NEGATIVE MANIFESTATION IN MARITIME TRANSPORT.....	204
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	214
<i>Каминская Ж. К., Кулинич Э. М., Сердюк С. Н.</i>	
МОДЕЛІРОВАННЯ І АНАЛІЗ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦІОНІРОВАННЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЇ СИСТЕМЫ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕССОМ ПРОІЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА.....	214
<i>Фрейман В. І.</i>	
МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ІНФОРМАЦІИ МЕЖДУ ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ УПРАВЛЕННЯ.....	226

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Bazilo C. V.</i>	
PRINCIPLES AND METHODS OF THE CALCULATION OF TRANSFER CHARACTERISTICS OF DISK PIEZOELECTRIC TRANSFORMERS.....	7
<i>Tiutiunnyk V. A., Dududsh A. S., Florov A. D., Trofymov I. N.</i>	
PATTERN ANALYSIS OF THE RECEIVING-TRANSMITTING CIRCULAR ARRAY WITH LOW SIDE LOBE LEVEL.....	23
<i>Shmeleva T.R.</i>	
VERIFICATION OF THE TRIANGULAR COMMUNICATION GRIDS PROTOCOLS BY INFINITE PETRI NETS.....	31
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING.....	42
<i>Gorev V. N., Gusev A. Yu., Korniienko V. I.</i>	
ON THE ANALYTICAL SOLUTION OF A VOLTERRA INTEGRAL EQUATION FOR INVESTIGATION OF FRACTAL PROCESSES.....	42
<i>Khodakov V. Ye., Sokolov A. Ye., Veselovskaya G. V.</i>	
MODELS OF TRAINING PROCEDURES.....	51
<i>Tarasov V. N.</i>	
ANALYSIS AND COMPARISON OF TWO QUEUEING SYSTEMS WITH HYPERERLANGIAN INPUT DISTRIBUTIONS.....	61
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	71
<i>Bisikalo O. V., Kovtun V. V., Yakhimchuk M. S. Voytyuk I. F.</i>	
ANALYSIS OF THE AUTOMATED SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE OPERATION RESULTS.....	71
<i>Voloshyn O. F., Malyar N. N., Polishchuk V. V., Sharkadi M. N.</i>	
INFORMATION MODELING FUZZY KNOWLEDGE.....	84
<i>Humeniuk M. O., Sashchuk I. M., Zhuravsky Yu. V.</i>	
THE CRITERION FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN MULTI ROBOT TEAMS CONTROL.....	96
<i>Kovalenko I. I., Shved A. V., Koval N. V.</i>	
A MODIFIED CASE-BASED REASONING METHOD BASED ON THE ROUGH SET THEORY.....	106
<i>Lymariev I. O., Subbotin S. A., Oliynyk A. A., Drokin I. V.</i>	
METHODS OF LARGE-SCALE SIGNALS TRANSFORMATION FOR DIAGNOSIS IN NEURAL NETWORK MODELS.....	113
<i>Melnikov O. Y., Komissarov K. M.</i>	
INVESTIGATION OF METHODS OF INTELLECTUAL ANALYSIS OF BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTIONS AND DEVELOPMENT OF PROGRAM SYSTEM FOR ANALYSIS OF LITERATURE LIST.....	121
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	135
<i>Velykodniy S., Tymofieieva O., Zaitseva-Velykodna S.</i>	
THE CALCULATION METHOD FOR INDICATORS PROJECT ESTIMATION IN THE IMPLEMENTATION OF SOFTWARE SYSTEMS RE-ENGINEERING.....	135
<i>Berko A., Vysotska V., Lytvyn V., Naum O.</i>	
PLANNING THE ACTIVITIES OF INTELLECTUAL AGENTS IN THE ELECTRONIC COMMERCE SYSTEMS.....	143
<i>Kaidalov D. S., Kovalchuk L. V., Nastenko A. O., Rodinko M. Yu., Shevtsov O. V., Oliynykov R. V.</i>	
COMPARISON OF BLOCK EXPECTATION TIME FOR VARIOUS CONSENSUS ALGORITHMS.....	159
<i>Kotlyarov V. V., Shpylka A. A.</i>	
PRACTICAL CONSIDERATIONS OF GREEDY COMPRESSED SAMPLING METHODS APPLICATION FOR OFDM CHANNEL ESTIMATION.....	172
<i>Koshevov N. D., Kostenko E. M., Beliaieva A. A.</i>	
COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS IN THE INVESTIGATION OF A WEIGH-MEASURING SYSTEM AND THERMOREGULATOR.....	179
<i>Mashtalir S. V., Stolbovyi M. I.</i>	
ADAPTIVE MATRIX MODELS IN THE VIDEO STREAMS CONTROL PROBLEM.....	188
<i>Minukhin S. V., Losev M. U., Sitnikov D. E.</i>	
ANALYSIS OF WAYS FOR EXCHANGING DATA IN NETWORKS WITH PACKAGE COMMUTATION.....	195
<i>Nosov P. S., Ben A. P., Matejchuk V. N., Safonov M. S.</i>	
IDENTIFICATION OF "HUMAN ERROR" NEGATIVE MANIFESTATION IN MARITIME TRANSPORT.....	204
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	214
<i>Kaminska Zh. K., Kulynych E. M., Serdiuk S. N.</i>	
THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OPERATING ANALYSIS AND MODELING FOR AERATED CONCRETE PRODUCTION.....	214
<i>Freyman V. I.</i>	
METHODS AND ALGORITHMS OF SOFT DECODING FOR SIGNALS WITHIN INFORMATION TRANSMISSION CHANNELS BETWEEN CONTROL SYSTEMS ELEMENTS.....	226

РАДІОЕЛЕКТРОНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

РАДІОЕЛЕКТРОНИКА І ТЕЛЕКОММУНИКАЦІИ

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS

UDC 621.373.826.032:534.232.082.73

PRINCIPLES AND METHODS OF THE CALCULATION OF TRANSFER CHARACTERISTICS OF DISK PIEZOELECTRIC TRANSFORMERS

Bazilo C. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Instrument Making, Mechatronics and Computerized Technologies, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Thanks to its unique properties piezoceramics has applications in various fields of engineering and technology. Disk piezoelectric devices are widely used in the elements of information systems. Research has shown that piezoelectric transformers can compete with traditional electromagnetic transformers on both efficiency and power density. The final goal of mathematical modeling of the vibrating piezoelectric elements physical condition is a qualitative and quantitative description of characteristics and parameters of existing electrical and elastic fields.

Objective. The purpose of this paper is to set out the principles of mathematical models construction that are sufficiently adequate to real devices and occurring physical processes using the simplest example of axially symmetric radial oscillations of the piezoelectric disk.

Method. Mathematical models of piezoelectric transformers working with axially symmetric radial oscillations of piezoceramic disks are constructed with a minimal number of assumptions simplifying the real situation. This allows us to state that the proposed construction scheme delivers mathematical models that are sufficiently adequate to the real objects and physical processes that exist in them.

Results. Main results of this work can be formulated as follows: mathematical model of piezoelectric transformer with ring electrode in the primary electrical circuit is constructed; high sensitivity of frequency characteristic of piezoelectric transformer to the values of the output impedance of the electrical signal source in the primary electrical circuit is demonstrated.

Conclusions. As a result of research of real device's mathematical model a set of geometrical, physical and mechanical and electrical parameters of a real object can be determined which provides realization of technical parameters of piezoelectric functional element specified in technical specifications. The cost of the saved resources is the commercial price of the mathematical model. Prospects for further research can be to build a mathematical model of a piezoelectric transformer with sector electrodes.

KEYWORDS: piezoelectric transformer, axially symmetric oscillations, physical processes, mathematical model.

NOMENCLATURE

U_1 is an amplitude value of electric potential difference;

$i = \sqrt{-1}$ is an imaginary unit;

ω is an angular frequency;

t is a time;

x_k are coordinates of the point, in which it is determined the displacement of the piezoelectric material particles from the equilibrium position;

Π is a set of geometrical and physical and mechanical properties of the piezoelectric transformer;

Z_1 is an electrical impedance of the input electrode 1;

I_1 is an amplitude value of the electric current in the conductor, which connects an input electrode 1 with a source of the electrical signals;

$2d_1$ is a width of the input ring electrode;

\vec{H} , \vec{E} are vectors of the conjugate magnetic and electric fields;

\vec{B} , \vec{D} are vectors of the magnetic and electric induction of the electromagnetic field components;

u_r, u_z are amplitude values of the radial and axial components of the material particles displacement vector of dynamically deformable piezoelectric disk.

INTRODUCTION

Thanks to its unique properties piezoceramics has applications in various fields of engineering and

technology. The relevance of the use of various functional elements of piezoelectronics in radio electronics, information and power systems is explained by their high reliability and small dimensions, which solves the problem of miniaturization of such systems. Piezoelectric disks with surfaces partially covered electrodes are often used to create various functional piezoelectric devices. Disk piezoelectric devices are widely used in the elements of information systems. In disk piezoelectric elements with surfaces partially covered by electrodes we can simultaneously excite oscillations of compression-tension and transverse bending vibrations. Manipulating the geometric parameters of electrodes and their location relative to each other, you can have a significant effect on the energy of oscillatory motion particular type of material particles of piezoelectric disk volume. It should be especially noted that this piezoelectric element has compatibility with microsystem technology, so it can be made as microelectromechanical structures (MEMS) [1]. One of the main elements of functional piezoelectronics is piezoelectric transformer (PT). Research has shown that PTs can compete with traditional electromagnetic transformers on both efficiency and power density [2–4]. PTs are therefore an interesting field of research [5]. The favorable attributes of the PT are low weight and size and potentially low cost. One additional important characteristic is the high voltage isolation of the ceramic materials used to build PTs [6]. In addition, a piezoelectric transformer is more suitable for mass production than traditional, coil-based transformers [7].

1 PROBLEM STATEMENT

The operation principle of piezoelectric transformers is generally known [8].

When applying an electrical potential difference $U_1 e^{i\omega t}$ to pair of electrodes that are partially cover the front and bottom surfaces of the piezoelectric plate, harmonic oscillations of material particles are excited in a volume of the plate, which, in general, can be described by the displacement vector of material particles $\bar{u}(x_k) e^{i\omega t}$. Fluctuations of material particles are accompanied by dynamic deformations $\varepsilon_{mn}(x_k) e^{i\omega t}$ of infinitely small elements of a piezoelectric volume. Due to the direct piezoelectric effect the harmonically varying in time according to $e^{i\omega t}$ polarization charges with a surface density $q_m(x_k) e^{i\omega t}$ arise in a deformable piezoelectric. Some of these charges are collected by the second pair of electrodes, which like the first pair, partially covers the surface of the piezoelectric plate. The polarization charge on the second pair of electrodes causes an electric current $i(t) = I e^{i\omega t}$ in the conductor, which connects one of the electrodes of the second pair to the load impedance Z_n . The voltage drop $U_2 e^{i\omega t} = Z_n I e^{i\omega t}$ is an output signal of the piezoelectric

transformer. Obviously, the transformation ratio $K(\omega, \Pi)$ is equal to the ratio of the output signal to the input one, i.e.

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_n I}{U_1},$$

and is a mathematical model of a piezoelectric transformer [9].

The practical value of the analytical structure $K(\omega, \Pi)$ that adequately describes the physical processes in the real object is evident.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Many publications have been devoted to the construction and research of mathematical models of piezoelectric transformers. Starting with the monograph [8], the basics of the calculation of piezoelectric transformers' transfer characteristics were considered, for example, in [10–13].

However, in many papers only processes occurring in a piezoelectric disk with a surface, fully covered by electrodes, are described. There are also a number of works of a disparate character devoted to the solution of the problem of electromechanical oscillations of piezoelectric elements with separated electrodes (transformer type). The constructions of piezoelectric transformer of a planar transverse-longitudinal and rod type are considered in [10] and [11], respectively. In [12] the analysis of the dependence of transformation coefficient of disk piezoelectric transformer on the location of secondary electrode, on the width of secondary electrode, and on the value of electrical load applied to secondary electrode was made. In [13] the radial axisymmetric oscillations of thin piezoceramic disk with a surface, partially covered by electrodes, are considered.

In many papers [14–19] the described methods of piezoelectric transformers models constructing are mostly based on the use of equivalent electrical circuits and it does not allow analyzing of stress-strain state of solids with the piezoelectric effects.

Based on the above, it can be argued that currently there are no reliable and valid methods of constructing of mathematical models of piezoelectric transformers, which could be used as a theoretical basis for characteristics and parameters calculating of this class of functional elements of modern piezoelectronics.

The purpose of this paper is to set out the principles of mathematical models construction that are sufficiently adequate to real devices and occurring physical processes using the simplest example of axially symmetric radial oscillations of the piezoelectric disk.

3 MATERIALS AND METHODS

Let us consider the disk with the radius R and the thickness α (Fig. 1) made of piezoelectric ceramics PZT with thickness polarization during its manufacture i.e. along the coordinate axis z of the cylindrical coordinate

system (ρ, φ, z) . Electric polarization direction defines the properties and the matrices construction of piezoceramic disk's material constants.

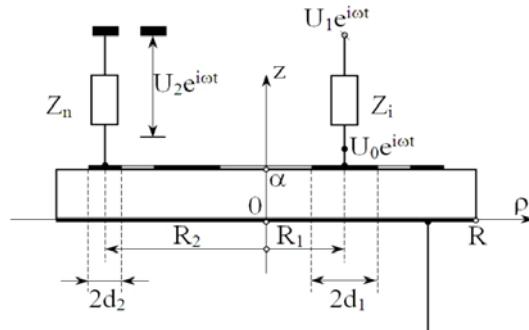


Figure 1 – Diagram of the piezoelectric disk transformer that operates on radial vibrations

The matrix of elastic moduli of piezoceramic disk polarized across the thickness looks like

$$\left| c_{\lambda\beta}^E \right| = \begin{vmatrix} c_{11}^E & c_{12}^E & c_{13}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{21}^E & c_{22}^E & c_{23}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{31}^E & c_{32}^E & c_{33}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{41}^E & c_{42}^E & c_{43}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{51}^E & c_{52}^E & c_{53}^E & 0 & 0 & 0 \\ c_{61}^E & c_{62}^E & c_{63}^E & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

where $\lambda, \beta = 1; \dots; 6$ are Voigt indices; $c_{11}^E = c_{22}^E \neq c_{33}^E$; $c_{12}^E = c_{13}^E = c_{23}^E$; $c_{44}^E = c_{55}^E$; $c_{66}^E = (c_{11}^E - c_{12}^E)/2$.

The matrix of piezomoduli $e_{k\beta}$ ($k = 1; 2; 3$; $\beta = 1; 2; \dots; 6$) can be written as follows [10]

$$\left| e_{k\beta} \right| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & e_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e_{24} & 0 & 0 \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}, \quad (2)$$

where $e_{31} = e_{32} \neq e_{33}$; $e_{15} = e_{24} = (e_{33} - e_{31})/2$.

The matrix of the dielectric permittivity tensor χ_{mn}^ε has diagonal structure and

$$\left| \chi_{mn}^\varepsilon \right| = \begin{vmatrix} \chi_{11}^\varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \chi_{22}^\varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \chi_{33}^\varepsilon \end{vmatrix}, \quad (3)$$

where $\chi_{11}^\varepsilon = \chi_{22}^\varepsilon \neq \chi_{33}^\varepsilon$.

Let us assume that the thickness of the electrodes is negligible in comparison with the disk thickness.

On the ring electrode 1 (its width is equal to $2d_1$ (Fig. 1)) the electrical potential difference $U_1 e^{i\omega t}$ from a source of electrical signals with the output impedance Z_i is applied. Obviously, on the electrode 1 we will have another value of the electrical potential $U_0 e^{i\omega t}$, where $|U_0| < |U_1|$, that can be written as follows

$$U_0 = \frac{U_1 Z_1}{Z_i + Z_1}. \quad (4)$$

Electrical impedance Z_1 can be determined from Ohm's law for electrical circuit section

$$Z_1 = U_0 / I_1. \quad (5)$$

If on the surface of the electrode 1 we have harmonically time varying electric charge $q(t) = Q_1 e^{i\omega t}$, the electric current amplitude value is determined as follows [20]

$$I_1 = -i\omega Q_1. \quad (6)$$

The amplitude value of the electric charge Q_1 is determined by the axial component $D_z(\rho, \alpha)$ of the electric induction vector

$$Q_1 = 2\pi \int_{R_1-d_1}^{R_1+d_1} \rho D_z(\rho, \alpha) d\rho. \quad (7)$$

Electrical condition of any material object is determined by Maxwell's equations

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (9)$$

where $\vec{J} = r \vec{E}$ is a surface density of the conduction current; r is a specific electric conductivity of the material. Since the piezoelectric ceramic is a fairly good isolator it can be considered that $r \geq 0$. In this case, Maxwell's equation (8) for harmonically varying fields takes the following form

$$\text{rot } \vec{H} = i\omega \vec{D}. \quad (10)$$

Calculating the divergence of the left and right side of (10), we can come to the following conclusion

$$\operatorname{div} \vec{D} = 0 . \quad (11)$$

Equation (11) has the meaning of the condition of absence of free carriers of electricity in a volume of the ideal dielectric.

In [21] it is shown that at a frequency range up to 10 MHz, the magnetic component of the electromagnetic field in a deformable piezoelectric ceramics by several orders less than electrical component. It gives the basis for (9)

$$\operatorname{rot} \vec{E} \cong 0 . \quad (12)$$

Equation (12) suggests that the electric field in a volume of the deformed piezoceramics is irrotational, i.e. potential and it can be described by a scalar electric potential, and

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \Phi . \quad (13)$$

With the definition (13), known [20, 21] expression for calculating of the m -th electric induction vector component in a volume of a deformable piezoelectric can be written as follows

$$D_m = e_{mkj} \varepsilon_{kj} - \chi_{mn}^e (\operatorname{grad} \Phi)_n , \quad (14)$$

where $e_{mkj} \Leftrightarrow e_{m\beta}$ (β is a Voigt index, by which it is changed a couple of symmetrical tensor indices k, j) is an element of the matrix of piezoelectric constants; ε_{kj} is a component of infinitesimal deformations tensor; χ_{mn}^e is a component of the dielectric permittivity tensor; $(\operatorname{grad} \Phi)_n$ is the n -th component of scalar potential gradient vector. When writing the equation (14) in a cylindrical coordinate system we should consider the following correspondence between the symbols (ρ, φ, z) of the coordinate axes of the cylindrical coordinate system and the numbers $k = 1, 2, 3$ of the coordinate axes x_k of the Cartesian coordinate system: $1 \Leftrightarrow \rho$; $2 \Leftrightarrow \varphi$; $3 \Leftrightarrow z$.

From the general expression (14) the next follows

$$D_\rho = 2e_{15}\varepsilon_{\rho z} - \chi_{11}^e \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial \rho} , \quad (15)$$

$$\begin{aligned} D_z &= e_{31}\varepsilon_{\rho\rho} + e_{32}\varepsilon_{\varphi\varphi} + e_{33}\varepsilon_{zz} - \chi_{33}^e \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} = \\ &= e_{31}(\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + e_{33}\varepsilon_{zz} - \chi_{33}^e \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z} , \end{aligned} \quad (16)$$

where $D_\varphi \equiv 0$ because of the axial symmetry of the problem under consideration;

$\varepsilon_{\rho z} = (\partial u_\rho / \partial z + \partial u_z / \partial \rho) / 2$ is a shear deformation. In (16) piezoelectric moduli of the same value e_{31} and e_{32} (see comment to the matrix (2)) are written, as is usual in solid mechanics, by the same symbol e_{31} . Components $\varepsilon_{\rho\rho} = \partial u_\rho / \partial \rho$, $\varepsilon_{\varphi\varphi} = u_\rho / \rho$ and $\varepsilon_{zz} = \partial u_z / \partial z$ determine compression and expansion deformations along the coordinate lines of a cylindrical coordinate system.

$\Phi^{(1)}$ is an electrical potential in the ring area $\{R_l - d_l \leq \rho \leq R_l + d_l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$ under the electrode 1.

Expressions (15) and (16) substituting into condition (11) gives a second order differential equation in partial derivatives relative to the required scalar potential $\Phi^{(1)}(\rho, z)$ of the electric field in a deformable piezoelectric.

In the particular case of a sufficiently thin disk when $a/R < 1$, it can be argued that in the frequency range in which the length of the elastic wave is larger than the thickness of the piezoelectric disk, electrical and elastic fields in its volume is almost independent of the axial coordinate values z , i.e., practically do not change their values according to thickness of the disk.

If the disk is gently fixed along the surface $\{\rho = R; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$, the shear deformation becomes zero on this surface and on surfaces $z = 0$ and $z = \alpha$. In addition, on the surface covered by the electrode $z = 0$ the radial component $D_\rho = 0$. The radial component $D_\rho = 0$ on the side surface of the piezoceramic disk [21], on the surface of ring electrode 1 and on the disc symmetry axis, i.e. on the axis Oz . The combination of these facts suggests that in thin piezoceramic disk, in a first approximation, it can be considered that $D_\rho = 0 \forall (\rho, \varphi, z) \in V$, where V is a volume of the disk. In this case, the vector of electric induction is completely determined by only one non-zero axial component D_z , and the condition (11) takes the form

$$\partial D_z^{(1)} / \partial z = 0 , \quad (17)$$

where $D_z^{(1)}$ further underlines the fact that we are talking about electric induction vector at the ring area $\{R_l - d_l \leq \rho \leq R_l + d_l; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$ under the electrode 1.

From condition (17) it implies that the axial component $D_z^{(1)}$ is a function of the radial coordinate ρ and is independent of the axial coordinate values z ,

which is in full agreement with the above mentioned adopted suggestion about a weak dependence of the physical characteristics of the fields on the axial coordinate values in the frequency range in which the following inequality holds $\lambda \gg \alpha$ (λ is an elastic wave length).

Because of

$$\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi} = \partial u_\rho / \partial \rho + u_\rho / \rho = [\partial(\rho u_\rho) / \partial \rho] / \rho,$$

definition (16) can be written as follows

$$D_z^{(1)}(\rho) = \frac{e_{31}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_\rho^{(1)}] + e_{33} \frac{\partial u_z^{(1)}}{\partial z} - \chi_{33}^\varepsilon \frac{\partial \Phi^{(1)}}{\partial z}, \quad (18)$$

where $u_\rho^{(1)}(\rho, z)$ and $u_z^{(1)}(\rho, z)$ are amplitude values of the components of the material particles displacement vector in the ring area

$$\{R_l - d_1 \leq \rho \leq R_l + d_1; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}.$$

Integrating with respect to z the left and right side of (18), and taking into account the condition (17), we obtain the following result

$$\begin{aligned} \alpha D_z^{(1)}(\rho) &= \frac{e_{31}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left[\rho \int_0^\alpha u_\rho^{(1)}(\rho, z) dz \right] + \\ &+ e_{33} \left[u_z^{(1)}(\rho, \alpha) - u_z^{(1)}(\rho, 0) \right] - \chi_{33}^\varepsilon \left[\Phi^{(1)}(\alpha) - \Phi^{(1)}(0) \right]. \end{aligned} \quad (19)$$

Let

$$u_\rho^{(1)}(\rho) = \frac{1}{\alpha} \int_0^\alpha u_\rho^{(1)}(\rho, z) dz, \quad (20)$$

and $u_\rho^{(1)}(\rho)$ is an averaged over the thickness of the disk radial component of the material particles displacement vector in the ring area under the electrode 1. Since $\Phi^{(1)}(\alpha) - \Phi^{(1)}(0) \equiv U_0$, then (19) takes the form

$$\begin{aligned} D_z^{(1)}(\rho) &= \frac{e_{31}}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} [\rho u_\rho^{(1)}(\rho)] + \\ &+ \frac{e_{33}}{\alpha} \left[u_z^{(1)}(\rho, \alpha) - u_z^{(1)}(\rho, 0) \right] - \chi_{33}^\varepsilon \frac{U_0}{\alpha}. \end{aligned} \quad (21)$$

Substituting (21) into definition (7) of the amplitude value of electric charge, we can obtain

$$\begin{aligned} Q_1 &= 2\pi \left\{ e_{31} \left[\rho u_\rho^{(1)}(\rho) \right] \Big|_{R_l - d_1}^{R_l + d_1} + \right. \\ &+ \frac{e_{33}}{\alpha} \int_{R_l - d_1}^{R_l + d_1} \rho \left[u_z^{(1)}(\rho, \alpha) - u_z^{(1)}(\rho, 0) \right] d\rho - \\ &\left. - \frac{\chi_{33}^\varepsilon}{2\alpha} \left[(R_l + d_1)^2 - (R_l - d_1)^2 \right] U_0 \right\}. \end{aligned} \quad (22)$$

We set

$$u_z^{(1)}(z) = \frac{1}{2d_1R_l} \int_{R_l - d_1}^{R_l + d_1} \rho u_z^{(1)}(\rho, z) d\rho, \quad (23)$$

where $u_z^{(1)}(z)$ is an averaged over the area of the ring $\{R_l - d_1 \leq \rho \leq R_l + d_1; 0 \leq \varphi \leq 2\pi\}$ axial component of the material particles $\vec{u}(\rho, z)$ displacement vector in the ring area under the electrode 1. With the definition (23) relation (22) can be written as follows

$$\begin{aligned} Q_1 &= 2\pi e_{31} \left[(R_l + d_1) u_\rho^{(1)}(R_l + d_1) - \right. \\ &\left. - (R_l - d_1) u_\rho^{(1)}(R_l - d_1) \right] + \\ &+ 4\pi d_1 R_l \frac{e_{33}}{\alpha} \left[u_z^{(1)}(\alpha) - u_z^{(1)}(0) \right] - C_1^\varepsilon U_0, \end{aligned} \quad (24)$$

where $C_1^\varepsilon = 4\pi d_1 R_l \chi_{33}^\varepsilon / \alpha$ is a static electric capacity of the piezoceramic volume under the ring electrode No. 1.

Since by definition the piezoelectric transformer is a linear physical system, the averaged components of the material particles displacement vector can always be represented as follows

$$u_\rho^{(1)}(\rho) = U_0 F_\rho^{(1)}(\rho), \quad u_z^{(1)}(z) = U_0 F_z^{(1)}(z), \quad (25)$$

where functions $F_\rho^{(1)}(\rho)$ and $F_z^{(1)}(z)$ differ from the averaged components $u_\rho^{(1)}(\rho)$ and $u_z^{(1)}(z)$ of the material particles displacement vector only by a constant factor U_0 , and have the meaning of displacements sensitivity in the ring area $\{R_l - d_1 \leq \rho \leq R_l + d_1; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$ to the amplitude values of electrical potential difference on the ring electrode 1. The dimension of $F_\rho^{(1)}(\rho)$ and $F_z^{(1)}(z)$ is m/V. Functions $F_\rho^{(1)}(\rho)$ and $F_z^{(1)}(z)$ numerically equal to the material particles averaged displacements of the ring area under the electrode 1 when the electric potential difference with the amplitude value of $U_0 = 1$ V is applied to this electrode.

Following suggestions (25), the expression (24) for the electric charge Q_1 calculation can be written as follows

$$Q_1 = U_0 C_1^\varepsilon F_1(\omega, \Pi_1), \quad (26)$$

where dimensionless function $F_1(\omega, \Pi_1)$ is defined as follows

$$F_1(\omega, \Pi_1) = \frac{e_{31}\alpha}{2\chi_{33}^{\varepsilon}d_1} \left[\left(1 + \frac{d_1}{R_1}\right) F_{\rho}^{(1)}(R_1 + d_1) - \left(1 - \frac{d_1}{R_1}\right) F_{\rho}^{(1)}(R_1 - d_1) \right] + \frac{e_{33}}{\chi_{33}^{\varepsilon}} \left[F_z^{(1)}(\alpha) - F_z^{(1)}(0) \right] - 1. \quad (27)$$

Substituting (26) into the definition (6) of the electric current amplitude, and the obtained result into Ohm's law (5) for the circuit section, we can get the estimated ratio for the electrical impedance Z_1 :

$$Z_1 = -\frac{1}{i\omega C_1^{\varepsilon} F_1(\omega, \Pi_1)}. \quad (28)$$

If the dielectric under the ring electrode 1 does not have piezoelectric properties, i.e. $e_{31} = e_{33} = 0$, the function $F_1(\omega, \Pi_1) = -1$ and the expression (28) becomes as well-known formula for capacitor reactive resistance calculation with capacitance C_1^{ε} , i.e. $Z_1 = 1/(i\omega C_1^{\varepsilon})$.

Substituting (28) into the formula (4), we obtain

$$U_0 = \frac{U_1}{1 - i\omega C_1^{\varepsilon} F_1(\omega, \Pi_1) Z_i}. \quad (29)$$

It should be emphasized that the potential difference U_0 is determined by components averaged values of the material particles displacement vector of the ring area $\{R_1 - d_1 \leq \rho \leq R_1 + d_1; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$. This fact is of fundamental importance, since there is the possibility of equations joint solutions of a deformable piezoelectric motion.

In the case when a strong inequality $\alpha/R \ll 1$ takes place, i.e. when the disk can be considered as infinitely thin, the situation is considerably simplified, since the deformation ε_{zz} becomes linearly dependent on the sum of deformations $\varepsilon_{\rho\rho}$ and $\varepsilon_{\varphi\varphi}$.

From the generalized Hooke's law [20] for the elastic media with piezoelectric properties

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl}^E \varepsilon_{kl} + e_{kij} \frac{\partial \Phi}{\partial x_k},$$

where σ_{ij} is a component of the resulting mechanical stresses tensor, follows that in a polarized across the thickness piezoceramic disk normal stresses $\sigma_{\rho\rho}$, $\sigma_{\varphi\varphi}$

and σ_{zz} correspond to compression and expansion deformations $\varepsilon_{\rho\rho}$, $\varepsilon_{\varphi\varphi}$ and ε_{zz} and can be defined by the following expressions:

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12}^E (\varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}) + e_{31} \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (30)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12}^E \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11}^E \varepsilon_{\varphi\varphi} + c_{12}^E \varepsilon_{zz} + e_{31} \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (31)$$

$$\sigma_{zz} = c_{12}^E (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) + c_{33}^E \varepsilon_{zz} + e_{33} \frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (32)$$

In expressions (30)–(32) material constants of the same value (the elements of matrices (1) and (2)) are written by the same symbols.

On the bottom ($z = 0$) and top ($z = \alpha$) surfaces of the piezoceramic disk free from mechanical contacts with other material objects in accordance with Newton's third law the following conditions should take place:

$$\sigma_{\rho\rho}|_{z=0;\alpha} = \sigma_{zz}|_{z=0;\alpha} = 0. \quad (33)$$

Since the disk is very thin, it can be argued that the quantitative characteristics of its stress-strain state does not depend on the axial coordinate values z , i.e. $\partial \sigma_{ij}/\partial z \equiv 0$. It follows that the condition (33) must be satisfied at any point of the volume V of a thin piezoceramic disk. Substituting into the left side of (32) a zero, we obtain the following definition for the compression and expansion deformations in the axial direction:

$$\varepsilon_{zz} = -\frac{c_{12}^E}{c_{33}^E} (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) - \frac{e_{33}}{c_{33}^E} \frac{\partial \Phi}{\partial z}. \quad (34)$$

Substituting expression (34) into (30), (31) and (16), it produces the following results:

$$\sigma_{\rho\rho} = c_{11} \varepsilon_{\rho\rho} + c_{12} \varepsilon_{\varphi\varphi} + e_{31}^* \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (35)$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = c_{12} \varepsilon_{\rho\rho} + c_{11} \varepsilon_{\varphi\varphi} + e_{31}^* \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (36)$$

$$D_z = e_{31}^* (\varepsilon_{\rho\rho} + \varepsilon_{\varphi\varphi}) - \chi_{33}^{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial z}, \quad (37)$$

where $c_{11} = c_{11}^E - (c_{12}^E)^2/c_{33}^E$; $c_{12} = c_{12}^E (1 - c_{12}^E/c_{33}^E)$;

$e_{31}^* = e_{31} - e_{33} c_{12}^E/c_{33}^E$ are material constants for planar stress-strain state of the polarized across the thickness piezoceramic element; $\chi_{33}^{\sigma} = \chi_{33}^{\varepsilon} + e_{33}^2/c_{33}^E$ is a dielectric permittivity of the polarized across the thickness piezoceramic disk for constancy mode (equality

to zero) of the normal mechanical stresses σ_{zz} . Equations (35) and (36) in combination with $\sigma_{zp} = \sigma_{zz} = 0 \forall (\rho, z) \in V$ suggest that $u_z \equiv 0$ in the entire oscillating disk.

The expression (29) takes the form

$$U_0 = \frac{U_1}{1 - i\omega C_1^\sigma F_1^{(0)}(\omega, \Pi_1) Z_i}, \quad (38)$$

where $C_1^\sigma = 4\pi d_1 R_1 \chi_{33}^\sigma / \alpha$ is a static electrical capacitance of the ring area of infinitely thin disk under the electrode 1;

$$F_1^{(0)}(\omega, \Pi_1) = \frac{e_{31}^* \alpha}{2\chi_{33}^\sigma d_1} \left[\left(1 + \frac{d_1}{R_1} \right) F_\rho^{(1)}(R_1 + d_1) - \left(1 - \frac{d_1}{R_1} \right) F_\rho^{(1)}(R_1 - d_1) \right] - 1. \quad (39)$$

Now let us consider the processes that occur in an area of the ring electrode 2, i.e. output electrode of the piezoelectric transformer.

Obviously, in the ring area 2 $\{R_2 - d_2 \leq \rho \leq R_2 + d_2; 0 \leq \varphi \leq 2\pi; 0 \leq z \leq \alpha\}$ the amplitude values $u_\rho^{(2)}(\rho, z)$ and $u_z^{(2)}(\rho, z)$ of the harmonically time varying components of the material particles displacement vector of the oscillating piezoelectric disk can be represented as follows:

$$\begin{aligned} u_\rho^{(2)}(\rho, z) &= U_0 F_\rho^{(2)}(\rho, z), \\ u_z^{(2)}(\rho, z) &= U_0 F_z^{(2)}(\rho, z), \end{aligned} \quad (40)$$

where U_0 is an electric potential difference on the exciting ring electrode 1 (Fig. 1); $F_\rho^{(2)}(\rho, z)$ and $F_z^{(2)}(\rho, z)$ are displacements sensitivities in the ring area 2.

The amplitude value U_2 of the voltage drop on electrical load Z_n , i.e. on the input impedance of the electronic circuit which is directly connected to the ring electrode 2, is defined as follows

$$U_2 = Z_n I_2, \quad (41)$$

where $I_2 = -i\omega Q_2$ is an amplitude of the electric current in the conductor, which connects the electrode 2 and the electrical load Z_n ; Q_2 is an amplitude value of the electric charge on the ring electrode 2.

Acting in the same manner as in the determination of the electrical impedance Z_1 , we can obtain the following definition of the charge Q_2 :

$$Q_2 = C_2^\varepsilon U_0 F_2(\omega, \Pi_2) - C_2^\varepsilon U_2, \quad (42)$$

where $C_2^\varepsilon = 4\pi d_2 R_2 \chi_{33}^\varepsilon / \alpha$ is a static electrical capacitance of the ring area 2;

$$F_2(\omega, \Pi_2) = \frac{e_{31} \alpha}{2\chi_{33}^\varepsilon d_2} \left[\left(1 + \frac{d_2}{R_2} \right) F_\rho^{(2)}(R_2 + d_2) - \left(1 - \frac{d_2}{R_2} \right) F_\rho^{(2)}(R_2 - d_2) \right] + \frac{e_{33}}{\chi_{33}^\varepsilon} [F_z^{(2)}(\alpha) - F_z^{(2)}(0)];$$

$F_\rho^{(2)}(\rho)$ and $F_z^{(2)}(z)$ are averaged sensitivities.

Substituting (42) into current definition I_2 , and obtained result into (41), we can come to the conclusion that

$$U_2 = f_n(\omega) U_0 F_2(\omega, \Pi_2), \quad (43)$$

where $f_n(\omega) = -i\omega C_2^\varepsilon Z_n / (1 - i\omega C_2^\varepsilon Z_n)$ is a switching on function or load characteristic of the output ring electrode of the piezoelectric transformer.

In the short-circuit mode ($Z_n = 0$) function $f_n(\omega) = 0$ and $U_2 = 0$. This fact is very clear and does not require any mathematical calculations to prove its validity. In idle mode, when $Z_n \rightarrow \infty$, switching on function $f_n(\omega)$ if $\omega = 0$ is equal to zero, and at an arbitrarily small $\omega > 0$ $f_n(\omega) = 1$, i.e. in this mode switching on function is a function of Heaviside. It follows that the piezoelectric receiver of elastic vibrations is not capable to register the static pressures and deformations. This statement is not so obvious to practitioners actually cancels a large group of devices of piezoelectronics, which are presented in [22].

The rate of change of the switching on function $f_n(\omega)$ is determined by the time constant $\tau_n = C_2^\varepsilon Z_n$ of the circuit that connects the receiver electrode to an electrical load. The function module values $f_n(\omega)$, depending on the value of the dimensionless quantity $\Omega_n = \omega \tau_n$ are shown in Fig. 2.

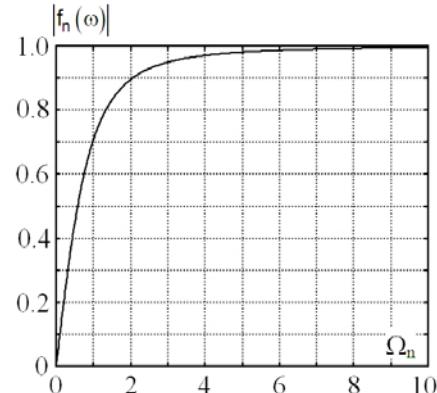


Figure 2 – Changing of switching on function module of the acoustic waves piezoelectric receiver

After substituting (29) into (43), we can write the following definition of the transformation $K(\omega, \Pi)$ of the piezoelectric transformer

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{f_n(\omega) F_2(\omega, \Pi_2)}{1 - i\omega C_1^e F_1(\omega, \Pi_1) Z_i}. \quad (44)$$

In the case of very thin piezoceramic disk, when a strong inequality $\alpha/R \ll 1$ takes place an expression (44) can be written as follows

$$K^{(0)}(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{f_n^{(0)}(\omega) F_2^{(0)}(\omega, \Pi_2)}{1 - i\omega C_1^e F_1^{(0)}(\omega, \Pi_1) Z_i}. \quad (45)$$

where $f_n^{(0)}(\omega) = -i\omega C_2^\sigma Z_n / (1 - i\omega C_2^\sigma Z_n)$;
 $C_2^\sigma = 4\pi d_2 R_2 \chi_{33}^\sigma / \alpha$;
 $F_2^{(0)}(\omega, \Pi_2) = \frac{e_{31}^* \alpha}{2\chi_{33}^\sigma d_2} \left[\left(1 + \frac{d_2}{R_2}\right) F_p^{(2)}(R_2 + d_2) - \left(1 - \frac{d_2}{R_2}\right) F_p^{(2)}(R_2 - d_2) \right]$; $F_1^{(0)}(\omega, \Pi_1)$ is defined by (39).

Expressions (44) and (45), which have a sense of mathematical models of piezoelectric transformers operating on axially symmetric radial oscillations of piezoceramic disks, are built with a minimal number of simplifying assumptions.

To fill the definition (44) or (45) by a specific physical meaning, it is necessary to determine the components of the material particles displacement vector of the oscillating piezoceramic disk. This procedure is the subject of a separate investigation.

4 EXPERIMENTS

Let us consider a disk piezoelectric transformer (Fig. 3), primary electrical circuit of which consists of electric potential difference generator $U_1 e^{i\omega t}$ (where U_1 is an amplitude value of electric potential difference) with output electrical impedance Z_g and ring electrode (position 1 in Fig. 3). The secondary electrical circuit consists of an electrode in the form of a circle (position 2) with connected electronic circuit to it with input electrical impedance Z_n , on which an electric potential difference $U_2 e^{i\omega t}$ is formed. The primary and secondary circuits of piezoelectric transformer do not have a galvanic connection. The energy exchange between the primary and secondary circuits is carried out by means of axisymmetric radial vibrations of the piezoceramics material particles in the volume of thickness polarized disk (position 3 in Fig. 3).

$U_2 e^{i\omega t}$ is formed. The primary and secondary circuits of piezoelectric transformer do not have a galvanic connection. The energy exchange between the primary and secondary circuits is carried out by means of axisymmetric radial vibrations of the piezoceramics material particles in the volume of thickness polarized disk (position 3 in Fig. 3).

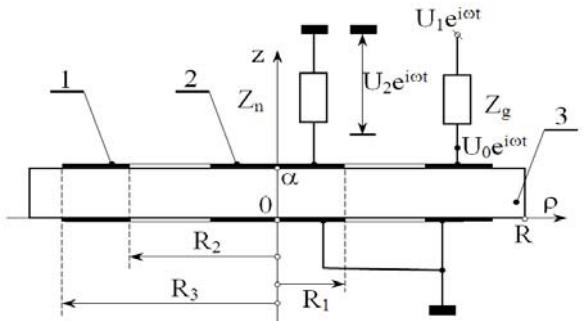


Figure 3 – Calculation scheme of disk piezoelectric transformer

It is obvious that the work of function piezoelectric element, which is schematically shown in Fig. 3, is fully described by transformation ratio $K(\omega, \Pi) = U_2/U_1$, which is a mathematical model of the device under consideration. Scheme of construction of piezoelectric transformer's mathematical model is outlined in [23].

The elastic stresses and displacements of material particles of piezoelectric ceramics in the areas under the electrodes, and in the areas where there are no electrodes are determined in [24]. Following the method which is described in [24] we can write that

$$\sigma_{pp}^{(1)}(\rho) = c_{11} \frac{\partial u_p^{(1)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12} \frac{u_p^{(1)}(\rho)}{\rho} + e_{31}^* \frac{U_2}{\alpha}, \quad (46)$$

$$\sigma_{pp}^{(2)}(\rho) = c_{11}^D \frac{\partial u_p^{(2)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12}^D \frac{u_p^{(2)}(\rho)}{\rho}, \quad (47)$$

$$\sigma_{pp}^{(3)}(\rho) = c_{11} \frac{\partial u_p^{(3)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12} \frac{u_p^{(3)}(\rho)}{\rho} + e_{31}^* \frac{U_0}{\alpha}, \quad (48)$$

$$\sigma_{pp}^{(4)}(\rho) = c_{11}^D \frac{\partial u_p^{(4)}(\rho)}{\partial \rho} + c_{12}^D \frac{u_p^{(4)}(\rho)}{\rho}, \quad (49)$$

where $c_{11} = c_{11}^E - (c_{12}^E)^2/c_{33}^E$; $c_{12} = c_{12}^E (1 - c_{12}^E/c_{33}^E)$; $c_{11}^D = c_{11} + (e_{31}^*)^2/\chi_{33}^\sigma$; $c_{12}^D = c_{12} + (e_{31}^*)^2/\chi_{33}^\sigma$ are moduli of elasticity for the mode of axially symmetric radial oscillations of the piezoceramic disk material particles in the areas under the electrodes (area No.1, where $\rho \in [0, R_1]$, and area No.3, where $\rho \in [R_2, R_3]$) and in the areas where there are no electrodes (area No.2, where $\rho \in [R_1, R_2]$, and area No.4, where $\rho \in [R_3, R]$).

The amplitude values of the radial components of the material particles displacement vectors in the areas No.1, ..., No.4, are defined as follows:

$$u_p^{(1)}(\rho) = A_1 J_1(\gamma \rho), \quad (50)$$

$$u_p^{(2)}(\rho) = A_2 J_1(\gamma_1 \rho) + A_3 N_1(\gamma_1 \rho), \quad (51)$$

$$u_{\rho}^{(3)}(\rho) = A_4 J_1(\gamma \rho) + A_5 N_1(\gamma \rho), \quad (52)$$

$$u_{\rho}^{(4)}(\rho) = A_6 J_1(\gamma_1 \rho) + A_7 N_1(\gamma_1 \rho), \quad (53)$$

where A_1, \dots, A_7 are frequency-dependent constants of the radial displacements of material particles in various areas; $J_1(z)$, $N_1(z)$ ($z = \gamma \rho$; $z = \gamma_1 \rho$) are Bessel and Neumann functions [25] of the first order; $\gamma = \omega / \sqrt{c_{11}/\rho_0}$ and $\gamma_1 = \omega / \sqrt{c_{11}^D/\rho_0}$ are wave numbers of the radial oscillations in the areas under the electrodes, and in the areas where there are no electrodes; ρ_0 is a piezoceramics density.

In the conditional separation boundaries the amplitudes of displacements and stresses should satisfy the conditions of dynamic and kinematic coupling, which can be written as follows:

$$\sigma_{\rho\rho}^{(1)}(R_1) - \sigma_{\rho\rho}^{(2)}(R_1) = 0, \quad (54)$$

$$u_{\rho}^{(1)}(R_1) - u_{\rho}^{(2)}(R_1) = 0, \quad (55)$$

$$\sigma_{\rho\rho}^{(2)}(R_2) - \sigma_{\rho\rho}^{(3)}(R_2) = 0, \quad (56)$$

$$u_{\rho}^{(2)}(R_2) - u_{\rho}^{(3)}(R_2) = 0, \quad (57)$$

$$\sigma_{\rho\rho}^{(3)}(R_3) - \sigma_{\rho\rho}^{(4)}(R_3) = 0, \quad (58)$$

$$u_{\rho}^{(3)}(R_3) - u_{\rho}^{(4)}(R_3) = 0. \quad (59)$$

If boundary $\rho = R$ of the piezoceramic disk is free from mechanical contacts with other material objects, then on the contour $\rho = R$ next condition should be satisfied

$$\sigma_{\rho\rho}^{(4)}(R) = 0. \quad (60)$$

Substituting expressions (46)–(53) into conditions (54)–(60), we obtain an inhomogeneous system of linear algebraic equations, which consists of seven equations, that contain seven sought constants A_1, \dots, A_7 . It is obvious that this system of equations is solved in one way. In general terms, mentioned system of equations can be written as follows:

$$\sum_{k=1}^7 m_{ik} A_k = P_j, \quad (j, k = 1, 2, \dots, 7). \quad (61)$$

The coefficients m_{jk} and right-hand parts P_j of equations (61) have the following form:

$$m_{11} = J_0(\gamma R_1) - (1 - k) J_1(\gamma R_1) / (\gamma R_1); \quad k = c_{12}/c_{11};$$

$$m_{12} = \xi \left[J_0(\gamma_1 R_1) - (1 - k_1) J_1(\gamma_1 R_1) / (\gamma_1 R_1) \right];$$

$$\xi = \sqrt{1 + K_{31}^2}; \quad K_{31}^2 = \left(e_{31}^* \right)^2 / \left(\chi_{33}^{\sigma} c_{11} \right); \quad k_1 = c_{12}^D / c_{11}^D;$$

$$m_{13} = \xi \left[N_0(\gamma_1 R_1) - (1 - k_1) N_1(\gamma_1 R_1) / (\gamma_1 R_1) \right];$$

$$m_{14} = m_{15} = m_{16} = m_{17} = 0; \quad P_1 = -q U_2 / \Omega;$$

$$q = e_{31}^* R / (c_{11} \alpha); \quad \Omega = \gamma R; \quad m_{21} = J_1(\gamma R_1);$$

$$m_{22} = J_1(\gamma_1 R_1); \quad m_{31} = 0; \quad m_{23} = N_1(\gamma_1 R_1);$$

$$m_{24} = m_{25} = m_{26} = m_{27} = 0; \quad P_2 = 0;$$

$$m_{32} = \xi \left[J_0(\gamma_1 R_2) - (1 - k_1) J_1(\gamma_1 R_2) / (\gamma_1 R_2) \right];$$

$$m_{33} = \xi \left[N_0(\gamma_1 R_2) - (1 - k_1) N_1(\gamma_1 R_2) / (\gamma_1 R_2) \right];$$

$$m_{34} = J_0(\gamma R_2) - (1 - k) J_1(\gamma R_2) / (\gamma R_2);$$

$$m_{35} = N_0(\gamma R_2) - (1 - k) N_1(\gamma R_2) / (\gamma R_2);$$

$$m_{36} = m_{37} = 0; \quad P_3 = q U_0 / \Omega; \quad m_{41} = 0; \quad m_{42} = J_1(\gamma_1 R_2);$$

$$m_{43} = N_1(\gamma_1 R_2); \quad m_{44} = J_1(\gamma R_2); \quad m_{45} = N_1(\gamma R_2);$$

$$m_{46} = m_{47} = 0; \quad P_4 = 0; \quad m_{51} = m_{52} = m_{53} = 0;$$

$$m_{54} = J_0(\gamma R_3) - (1 - k) J_1(\gamma R_3) / (\gamma R_3);$$

$$m_{55} = N_0(\gamma R_3) - (1 - k) N_1(\gamma R_3) / (\gamma R_3);$$

$$m_{56} = \xi \left[J_0(\gamma_1 R_3) - (1 - k_1) J_1(\gamma_1 R_3) / (\gamma_1 R_3) \right];$$

$$m_{57} = \xi \left[N_0(\gamma_1 R_3) - (1 - k_1) N_1(\gamma_1 R_3) / (\gamma_1 R_3) \right];$$

$$P_5 = -q U_0 / \Omega; \quad m_{61} = m_{62} = m_{63} = 0; \quad m_{64} = J_1(\gamma R_3);$$

$$m_{65} = N_1(\gamma R_2); \quad m_{66} = J_1(\gamma_1 R_3); \quad m_{67} = N_1(\gamma_1 R_3);$$

$$P_6 = 0; \quad m_{71} = m_{72} = m_{73} = m_{74} = m_{75} = 0;$$

$$m_{76} = J_0(\gamma_1 R) - (1 - k_1) J_1(\gamma_1 R) / (\gamma_1 R);$$

$$m_{77} = N_0(\gamma_1 R) - (1 - k_1) N_1(\gamma_1 R) / (\gamma_1 R); \quad P_7 = 0.$$

Solutions for constants A_1 , A_4 and A_5 , that define the radial displacements of disk material particles under the electrodes of primary and secondary electrical circuits of piezoelectric transformer are as follows:

$$A_1 = -\frac{q}{\Omega} (U_2 A_{11} + U_0 A_{12}); \quad A_{11} = \frac{B_{11}}{D_0}; \quad A_{12} = \frac{B_{12}}{D_0}; \quad (62)$$

$$A_4 = \frac{q}{\Omega} (U_2 A_{41} + U_0 A_{42}); \quad A_{41} = \frac{B_{41}}{D_0}; \quad A_{42} = \frac{B_{42}}{D_0}; \quad (63)$$

$$A_5 = -\frac{q}{\Omega} (U_2 A_{51} + U_0 A_{52}); \quad A_{51} = \frac{B_{51}}{D_0}; \quad A_{52} = \frac{B_{52}}{D_0}; \quad (64)$$

where D_0 is a determinant of the system of equations (61), and B_{11}, \dots, B_{52} are determinants of the following matrices:

$$\begin{aligned}
 B_{11} &= \begin{vmatrix} -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{32} & m_{33} & -m_{34} & -m_{35} & 0 & 0 \\ m_{42} & m_{43} & -m_{44} & -m_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{54} & m_{55} & -m_{56} & -m_{57} \\ 0 & 0 & m_{64} & m_{65} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}; \\
 B_{12} &= \begin{vmatrix} -m_{12} & -m_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ m_{32} & m_{33} & -m_{34} + m_{54} & -m_{35} + m_{55} & -m_{56} & -m_{57} \\ m_{42} & m_{43} & -m_{44} & -m_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_{64} & m_{65} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}; \\
 B_{41} &= \begin{vmatrix} m_{21} & -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & -m_{35} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & m_{43} & -m_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{55} & -m_{56} & -m_{57} \\ 0 & 0 & 0 & m_{65} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}; \\
 B_{42} &= \begin{vmatrix} m_{11} & -m_{12} & -m_{13} & 0 & 0 & 0 \\ m_{21} & -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & -m_{35} + m_{55} & -m_{56} & -m_{57} \\ 0 & m_{42} & m_{43} & -m_{45} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{65} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}; \\
 B_{51} &= \begin{vmatrix} m_{21} & -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & -m_{34} & 0 & 0 \\ 0 & m_{42} & m_{43} & -m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{54} & -m_{56} & -m_{57} \\ 0 & 0 & 0 & m_{64} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}; \\
 B_{52} &= \begin{vmatrix} m_{11} & -m_{12} & -m_{13} & 0 & 0 & 0 \\ m_{21} & -m_{22} & -m_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m_{32} & m_{33} & -m_{34} + m_{54} & -m_{56} & -m_{57} \\ 0 & m_{42} & m_{43} & -m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{64} & -m_{66} & -m_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{76} & m_{77} \end{vmatrix}.
 \end{aligned}$$

Substituting definition (62) of the constant A_l into the equation (50), and obtained result into the formula for potential calculating U_2 we can come to the conclusion that

$$U_2 = 2f_e(\omega) \frac{e_{31}^* \alpha q}{\chi_{33}^\sigma R_l \Omega} (U_2 A_{11} + U_0 A_{12}) J_1(\gamma R_l),$$

which implies that

$$U_2 = U_0 K_2(\Omega, \Pi); \quad (65)$$

$$K_2(\Omega, \Pi) = \frac{2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{12} [J_1(\Omega R_l / R) / (\Omega R_l / R)]}{1 - 2f_e(\omega) K_{31}^2 A_{11} [J_1(\Omega R_l / R) / (\Omega R_l / R)]};$$

where $K_{31}^2 = (e_{31}^*)^2 / (c_{11} \chi_{33}^\sigma)$ is a squared electromechanical coupling coefficient for the mode of

radial oscillations of thickness polarized piezoceramic disk material particles.

Let us define the amplitude value U_0 of electric potential difference on the electrode of the piezoelectric transformer's primary electric circuit.

It is obvious that

$$U_0 = \frac{U_1 Z_3}{Z_g + Z_3}, \quad (66)$$

where Z_3 is an electric impedance of the area No.3 under the ring electrode of the piezoelectric transformer's primary electric circuit. In accordance with Ohm's law for the electrical circuit section $Z_3 = U_0/I_3$, where I_3 is an amplitude of the alternating current in the conductor, which connects the generator of electrical potential difference with the ring electrode. As before, we assume that $I_3 = -i\omega Q_3$, where Q_3 is an amplitude value of polarization charge under the ring electrode, which is defined as follows:

$$\begin{aligned} Q_3 &= 2\pi \int_{R_2}^{R_3} \rho D_z^{(3)}(\rho) d\rho = \\ &= C_3^\sigma U_0 \left\{ \frac{2\alpha e_{31}^*}{R_3 \chi_{33}^\sigma (1 - \beta^2) U_0} \left[u_\rho^{(3)}(R_3) - u_\rho^{(3)}(R_2) \right] - 1 \right\}, \end{aligned} \quad (67)$$

where $C_3^\sigma = \pi \chi_{33}^\sigma (R_3^2 - R_2^2)/\alpha$ is a static electrical capacitance of the ring electrode; $\beta = R_2/R_3$ is a geometrical parameter of the ring.

Substituting (63) and (64) for the calculation of constants A_4 and A_5 into definition (52), and taking into account the expression (65), we obtain the following formula for the calculation of displacements $u_\rho^{(3)}(\rho)$:

$$\begin{aligned} u_\rho^{(3)}(\rho) &= \frac{U_0 \operatorname{Re}_{31}^*}{\Omega c_{11} \alpha} \left\{ \left[K_2(\Omega, \Pi) A_{41} + A_{42} \right] J_1(\Omega \rho / R) + \right. \\ &\quad \left. + \left[K_2(\Omega, \Pi) A_{51} + A_{52} \right] N_1(\Omega \rho / R) \right\}. \end{aligned} \quad (68)$$

After calculating the values $u_\rho^{(3)}(R_2)$ and $u_\rho^{(3)}(R_3)$ according to the formula (68) it can be written that $Q_3 = C_3^\sigma U_0 K_3(\Omega, \Pi)$, where

$$\begin{aligned} K_3(\Omega, \Pi) &= \frac{2K_{31}^2}{1 - \beta^2} \left\{ \left[K_2(\Omega, \Pi) A_{41} + A_{42} \right] J(\Omega) + \right. \\ &\quad \left. + \left[K_2(\Omega, \Pi) A_{51} + A_{52} \right] N(\Omega) \right\} - 1; \end{aligned}$$

$$J(\Omega) = [J_1(\Omega R_3 / R) - \beta J_1(\beta \Omega R_3 / R)] / (\Omega R_3 / R);$$

$$N(\Omega) = [N_1(\Omega R_3 / R) - \beta N_1(\beta \Omega R_3 / R)] / (\Omega R_3 / R).$$

After charge determining Q_3 the electrical impedance Z_3 is determined by the expression $Z_3 = -1/\left[i\omega C_3^\sigma K_3(\Omega, \Pi)\right]$, from which the definition of potential difference on the ring electrode follows

$$U_0 = \frac{U_1}{1 - i\omega C_0^\sigma Z_g K_3(\Omega, \Pi)}. \quad (69)$$

Substituting (69) into (65) we can come to the conclusion that

$$U_2 = U_1 \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_0^\sigma Z_g K_3(\Omega, \Pi)},$$

from which the formula for the transfer ratio calculation follows

$$K(\omega, \Pi) = \frac{U_2}{U_1} = \frac{K_2(\Omega, \Pi)}{1 - i\omega C_0^\sigma Z_g K_3(\Omega, \Pi)}. \quad (70)$$

Analytical structure (70) is a mathematical model of piezoelectric ring-dot transformer with ring electrode in the primary circuit.

5 RESULTS

Expression (70), which determines the transfer ratio of piezoelectric device, has a structure which is typical for electronic devices with negative feedback. It is clearly seen that the depth of feedback is directly proportional to the value of the signal source output impedance Z_g . If the value of $Z_g = 0$ the feedback disappears and transfer ratio is completely determined by a frequency dependent function $K_2(\Omega, \Pi)$.

Feedback physical content which exists in piezoelectric transformers is practically obvious. Displacements levels of piezoelectric disk material particles increases significantly at a frequency of electromechanical resonance of radial oscillations. This is accompanied by an increase of deformations and as a consequence, by an increase of levels of polarization charges on the electrodes of the primary electrical circuit. Because of this the amplitude of the electric current in the primary circuit increases, which is accompanied by an increase of voltage drop on the resistance Z_g and, accordingly, by a decrease of potential difference U_0 (see. Fig. 3).

The transfer ratio modeling of piezoelectric transformer according to (70) have been conducted, the results of which are shown in Fig. 4. As follows from the results shown in Fig. 4, the parameter change Z_g is accompanied by significant changes in the frequency characteristic of piezoceramic disk transformer.

Fig. 5 illustrates an influence of mechanical Q_i -factor of disk material on a change of transformation ratio in a narrow band near the first electro-mechanical resonance of the radial oscillations of free (not fixed) piezoceramic disk. The numerical values of quality factor are indicated near the corresponding curves.

All calculations were performed for piezoceramic disk with radius $R = 33 \cdot 10^{-3} m$ and thickness $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} m$, made of thickness polarized PZT type piezoceramics with following parameters: $\rho_0 = 7400 kg/m^3$; $c_{11}^E = 112 GPa$; $c_{12}^E = 62 GPa$; $c_{33}^E = 100 GPa$; $e_{33} = 20 C/m^2$; $e_{31} = -9 C/m^2$; $\chi_{33}^E = 1800 \chi_0$; $\chi_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} F/m$ is a dielectric constant; $Q_i = 100$ is a quality factor of piezoceramics; $Z_n = 10 kOhms$ is an electrical load value; $\Omega = \omega\tau_0$ is a dimensionless quantity, where $\tau_0 = R/\sqrt{c_{11}/\rho_0}$ is a piezoceramic disk time constant. The frequency $f = 15206 Hz$ corresponds to the value $\Omega = 1$. The value of the electrical impedance module of the electrical signal source is shown in the figures field.

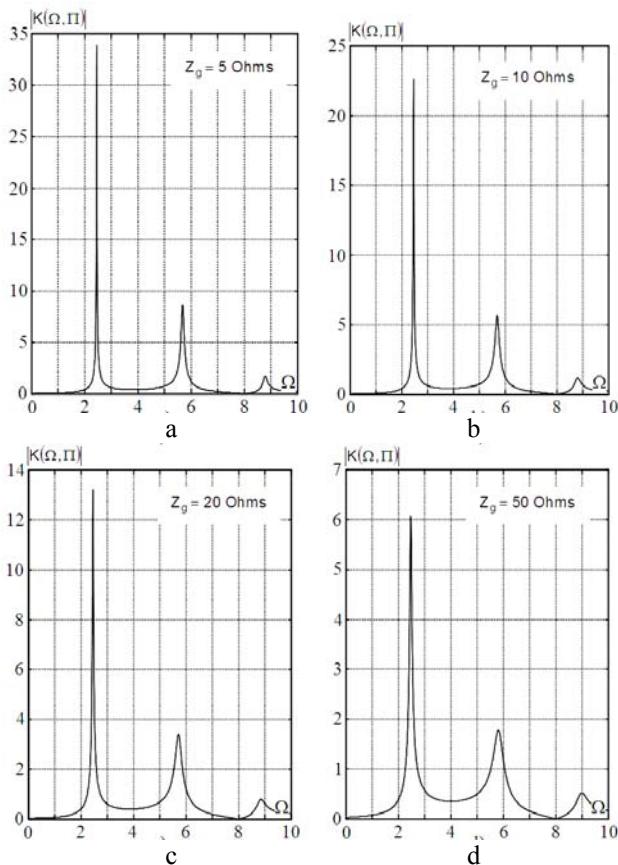


Figure 4 – Influence of the signal source output impedance Z_g on a frequency-dependent change of the transfer ratio module, when $R_1/R = 12/25$, $R_2/R = 15/25$ and $R_3/R = 0.999$:

a – $Z_g = 5 \text{ Ohms}$; b – $Z_g = 10 \text{ Ohms}$;
 c – $Z_g = 20 \text{ Ohms}$; d – $Z_g = 50 \text{ Ohms}$

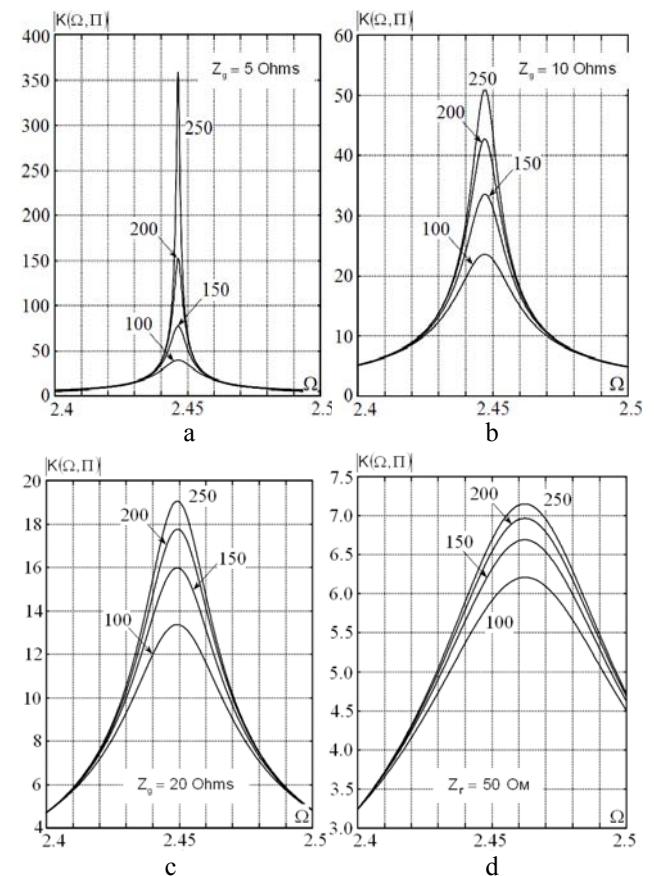


Figure 5 – Influence of the signal source output impedance Z_g on a frequency-dependent change of the transfer ratio module, when $R_1/R = 12/25$, $R_2/R = 15/25$ and $R_3/R = 0.999$:
 a – $Z_g = 5 \text{ Ohms}$; b – $Z_g = 10 \text{ Ohms}$;
 c – $Z_g = 20 \text{ Ohms}$; d – $Z_g = 50 \text{ Ohms}$

From the results shown in Fig. 4, 5 it can be concluded that each set of physical and mechanical piezoelectric parameters, each primary and secondary circuit electrodes configuration and fixed electrical load of piezoelectric transformer is corresponded to a fixed value of electrical signal source output impedance Z_g , with which the maximum transfer ratio is realized in a specified frequency range.

In Fig. 6 it is shown the calculated (solid line) and the experimentally obtained (dashed line) curves of the frequency dependence of the modulus of piezoceramic ring-dot disk transformer's transformation coefficient. The calculation is based on the same parameters as in the calculation of the curves $|K(\Omega, \Pi)|$ shown in Fig. 4. Naturally, the dimensions of the disk transformer in the calculation and experiment are chosen to be the same, i.e., the radius $R = 33 \cdot 10^{-3} m$, the thickness $\alpha = 3 \cdot 10^{-3} m$ and $R_1/R = 12/25$, $R_2/R = 15/25$, $R_3/R = 0.999$. The values of the modulus of transformation coefficient of the piezoceramic disk transformer are plotted along the ordinate axis, and the frequency f (dimensionless value Ω) – on the abscissa axis. The frequency $f = 15206 Hz$ corresponds to the value $\Omega = 1$.

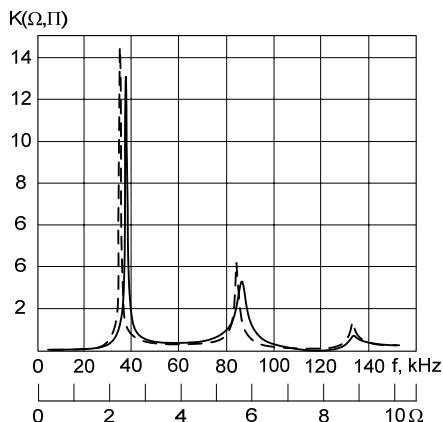


Figure 6 – Calculated (solid line) and experimentally obtained (dashed line) curves of the frequency dependence of the modulus of piezoceramic ring-dot disk transformer's transformation coefficient

6 DISCUSSION

When building the model, it was assumed that the thickness of the electrodes located on the surfaces of the disk is very small in comparison with the thickness of the disk α . In other words, the thickness of the electrodes, which, as a rule, does not exceed 15 μm , was not taken into account for constructing a mathematical model of piezoelectric transformer based on piezoceramic thin disk ($\alpha/R \ll 1$). It should also be noted that mathematical model (70) was built for ring-dot piezoelectric transformer (see Fig. 3) with surfaces partially covered by electrodes (area 1, $\rho \in [0, R_1]$, and area 3, where $\rho \in [R_2, R_3]$) and in the areas where there are no electrodes (area 2, where $\rho \in [R_1, R_2]$, and area 4, where $\rho \in [R_3, R]$).

As expected, the absolute values of the frequencies of resonances in calculation and experiment differ from each other. So, following the calculation, the frequencies of the first second and third electromechanical resonances are respectively equal to $f_{r1} = 37193 \text{ Hz}$, $f_{r2} = 88194 \text{ Hz}$ and $f_{r3} = 135330 \text{ Hz}$; the frequency ratio

$$\zeta = \frac{f_{r2}}{f_{r1}} = 2.371.$$

The experimental values of the same quantities are, respectively, $f_{r1} = 34491 \text{ Hz}$, $f_{r2} = 83728 \text{ Hz}$,

$$f_{r3} = 132325 \text{ Hz} \quad \text{and} \quad \zeta = \frac{f_{r2}}{f_{r1}} = 2.428. \quad \text{If the}$$

experimental data are assumed to be true, the error in determining the frequency ratio is $\Delta\zeta = 2.3\%$. The obtained results are explained very simply. The numerical values of the frequencies of resonances are determined by the dimensions and physicomechanical parameters of the material of disk element. The ratio of the resonances frequencies of the same disk is determined practically only by its dimensions. For this reason, a very satisfactory match between the theoretically and experimentally

determined resonance frequency ratios is observed. The discrepancy between the absolute values of the resonance frequencies is explained by the discrepancy between the physicomechanical parameters of the piezoceramics, which were incorporated into the calculation and which are inherent in the experimentally investigated object. Comparing the curves, we can conclude that the quality factor of the material of the experimentally investigated sample is at least 1.2 times larger than included in the quality factor calculation.

Thus, it can be asserted that the character of the variation of both curves, shown in Fig. 6, in a fairly wide frequency range coincides with accuracy to details. This means that the qualitative content of the expression (70) is adequate to the processes that occur in real object. In other words, expression (70) is a mathematical model of piezoelectric ring-dot transformer with ring electrode in primary electrical circuit and sufficiently adequate to the real object and the processes occurring in it. The latter allows us to assume that the mathematical description of the stress-strain state of the disk transformer also corresponds quite well to the real state of things.

CONCLUSIONS

Physical processes in piezoelectric transformers, which operate using axially symmetric radial oscillations of the piezoceramic disk, are considered. The scheme of mathematical models constructing of the ring-dot piezoelectric transformer that is sufficiently adequate to real objects and occurring physical processes is proposed.

Main results of this work can be formulated as follows:

- mathematical model of piezoelectric transformer with ring electrode in the primary electrical circuit is constructed;
- high sensitivity of frequency characteristic of piezoelectric transformer to the values of the output impedance of the electrical signal source in the primary electrical circuit is demonstrated.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was made within the framework of a state budgetary research topic "Development of highly efficient intellectual complex for creation and research of piezoelectric components for instrumentation, medicine and robotics" of Cherkasy State Technological University (No. 0117U000936).

REFERENCES

1. Varadan V., Vinoy K. and Dzhoze K. VCh MEMS i ikh primenenie. Moscow, Tekhnosfera, 2004, 528 p.
2. Bove T., Wolny W., Ringgaard E., and Breboel K. New type of piezoelectric transformer with very high power density. Applications of Ferroelectrics, 2000, Vol. 1, pp. 321–324. DOI: 10.1109/ISAF.2000.941564
3. Flynn A. M. and Sanders S. R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, Vol. 17, pp. 8–14. DOI: 10.1109/63.988662

4. Shao W., Chen L., Pan C., Liu Y., and Feng Z. Power density of piezoelectric transformers improved using a contact heat transfer structure, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2012, Vol. 59, pp. 73–81. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2157
5. Andersen T., Andersen M. A. E., Thomsen O. C. Simulation of Piezoelectric Transformers with COMSOL. Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan. URL: https://www.comsol.dk/paper/download/151765/andersen_p_aper.pdf
6. Ivensky G., Shvartsas M., and Ben-Yaakov S. Analysis and Modeling of a Piezoelectric Transformer in High Output Voltage Applications. URL: http://cbucc.com/lecture_file/2002060132032.pdf DOI: 10.1109/APEC.2000.822822
7. Huang Y.-T., Wu W.-J., Wang Y.-C., Lee C.-K. Multilayer Modal Actuator-Based Piezoelectric Transformers, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 2007, Vol. 54, No. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.249
8. Lavrinenko V. V. P'ezoe'lektricheskie transformatory. Moscow, E'nergiya, 1975, 112 p.
9. Matematicheskaya e'nciklopediya. Tom 2: D – Koo. – Moscow, Sovetskaya e'nciklopediya, 1979, pp. 951–952.
10. Karlash V. L. Longitudinal and lateral vibrations of a plate piezoceramic transformer. Ukr. J. Phys., 2006, Vol. 51, No. 10, pp. 986–992.
11. Karlash V. L. Vynuzhdennye e'lektromechanicheskie kolebaniya pryamougol'nyx p'ezokeramicheskix sterzhnej s razdelemnymi e'lektrodami, *Prikladnaya mehanika*, 2013, Tom 49, No. 3, pp. 125–134.
12. Bogdan A. V., Petrishhev O. N., Yakimenko Yu. I., Yanovskaya Yu. Yu. Issledovanie xarakteristik p'ezoe'lektricheskogo transformatora na osnove radial'nyx kolebanij v tonkix p'ezokeramicheskix diskax, *E'lektronika i svyaz', Tematicheskij vypusk «E'lektronika i nanotekhnologii»*, 2009, P. 1, pp. 269–274.
13. Bogdan A. V., Petrishhev O. N., Yakimenko Yu. I., Yanovskaya Yu. Yu. Matematicheskoe modelirovaniye kolebanij tonkix p'ezokeramicheskix diskov dlya sozdaniya funkcional'nyx e'lementov p'ezoe'lektroniki, *E'lektronika i svyaz', Tematicheskij vypusk «E'lektronika i nanotekhnologii»*, 2009, part. 2, pp. 35–42.
14. Buchacz A., Placzek M., Wrobel A. Modelling of passive vibration damping using piezoelectric transducers – the mathematical model, *Maintenance and reliability*, 2014, Vol. 16, No. 2, pp. 301–306.
15. Livingston D., Kiran Kumar P., Venugopal. N. Modeling and simulation of multiple piezoelectric transformer converters, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2013, Vol. 3, No. 8, pp. 237–245.
16. Paerand Yu., Kryvoshei D. Secondary power supplies with piezoelectric transformers. *Electronics and Nanotechnology*. Kyiv, 2011, pp. 55.
17. Buchacz A., Wrobel A. Piezoelectric layer modelling by equivalent circuit and graph method, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, Vol. 20, No. 1–2, pp. 299–302.
18. Cheng K. W. E., Ho Y. L., Ho S. L., Kwok K. W., Wang X. X., Chan H., Xue X. D. Modeling and analysis of piezoelectric transformer using multi-mesh loop matrix circuit under square-wave excitation conditions. IAS, 2005, pp. 2207–2211.
19. Huang Y., Ling Z. Progress in research on piezoelectric transformers, *Electronic Components & Materials*, 2004, Vol. 23, No. 1, pp. 7–10.
20. Petrishhev O. N. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskix e'lementov. Chast' 1. Garmonicheskie kolebaniya p'ezokeramicheskix e'lementov v vakuumie i metod rezonansa – antirezonansa. Kiev, Avers, 2012, 300 p.
21. Grinchenko V.T., Ulitko A.F., Shul'ga N.A. Mexanika svyazannyx polej v e'lementax konstrukcij, Vol. 5. E'lektroprugost'. Kiev, Naukova dumka, 1989, 280 p.
22. Dzhagupov R. G., Erofeev A. A. P'ezoe'lektronnye ustrojstva vychislitel'noj texniki, sistem kontrolya i upravleniya: Spravochnik. SPb, Politexnika, 1994, 608 p.
23. Tixonov A. N. Matematicheskaya model'. V kn. Matematicheskaya e'nciklopediya. Moscow, Sovetskaya e'nciklopediya, 1982, Vol. 3, Koo – Od., pp. 574–575.
24. Petrishhev O. N., Bazilo K. V. Principy i metody rascheta peredatochnyx xarakteristik diskovyx p'ezoe'lektricheskix transformatorov. Chast' 2. Metodika rascheta parametrov i xarakteristik prostejshego diskovogo p'ezoe'lektricheskogo transformatora. Visnik Cherkas'kogo derzhavnogo texnologichnogo universitetu, 2015, No. 4, pp. 10–23.
25. Spravochnik po special'nym funkciyam s formulami, grafikami i matematicheskimi tablicami. Ed. M. Abramovic and I. Stigan. Moscow, Nauka, 1979, 832 p.

Received 24.04.2018.
Accepted 10.09.2018.

УДК 621.373.826.032:534.232.082.73

ПРИНЦИПИ ТА МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПЕРЕДАТОЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКОВИХ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Базіло К. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри приладобудування, мехатроніки та комп'ютеризованих технологій Черкаського державного технологічного університету, Черкаси, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Завдяки своїм унікальним властивостям п'єзокераміка знаходить застосування в різних областях техніки і технології. Дискові п'єзоелектричні пристрой широко використовуються в елементах інформаційних систем. Дослідження показали, що п'єзоелектричні трансформатори можуть конкурувати з традиційними електромагнітними трансформаторами як за ефективністю, так і за щільністю потужності. Кінцевою метою математичного моделювання фізичного стану коливальних п'єзокерамічних елементів є якісний і кількісний опис характеристик і параметрів існуючих в них електрических та еластичних полів.

Мета роботи – запропонувати принципи побудови математичних моделей, які в достатній мірі адекватні реальним пристроям і фізичним процесам, що відбувається в них.

Метод. Математичні моделі п'єзоелектрических трансформаторів, що працюють з використанням віссесиметрических радіальних коливань п'єзокерамічних дисків, побудовані з мінімальним числом припущен, що спрощують реальну

© Bazilo C. V., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-1

ситуацію. Це дозволяє стверджувати, що запропонована схема побудови доставляє математичні моделі, які в достатній мірі адекватно відповідають реальним об'єктам і фізичним процесам, які в них існують.

Результати. Основні результати цієї роботи можна сформулювати наступним чином: побудована математична модель п'зоелектричного трансформатора з кільцевим електродом в первинному електричному колі; показана висока чутливість частотної характеристики п'зоелектричного трансформатора до змін значень вихідного опору джерела електричного сигналу в первинному електричному колі.

Висновки. В результаті дослідження математичної моделі реального пристрою можна визначити той набір геометричних, фізико-механічних та електричних параметрів реального об'єкта, який забезпечує реалізацію технічних показників функціонального елемента п'зоелектроніки, обумовлених в технічному завданні. Вартість збережених ресурсів становить комерційну ціну математичної моделі. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в побудові математичної моделі п'зоелектричного трансформатора з секторними електродами.

Ключові слова: п'зоелектричний трансформатор, осесиметричні коливання, фізичні процеси, математична модель.

УДК 621.373.826.032:534.232.082.73

ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПЕРЕДАТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКОВЫХ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Базило К. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры приборостроения, мехатроники и компьютеризованных технологий Черкасского государственного технологического университета, Черкассы, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Благодаря своим уникальным свойствам пьезокерамика находит применение в различных областях техники и технологии. Дисковые пьезоэлектрические устройства широко используются в элементах информационных систем. Исследования показали, что пьезоэлектрические трансформаторы могут конкурировать с традиционными электромагнитными трансформаторами как по эффективности, так и по плотности мощности. Конечной целью математического моделирования физического состояния колеблющихся пьезокерамических элементов является качественное и количественное описание характеристик и параметров существующих в них электрических и упругих полей.

Цель работы – предложить принципы построения математических моделей, которые в достаточной мере адекватны реальным устройствам и происходящим в них физическим процессам.

Метод. Математические модели пьезоэлектрических трансформаторов, работающих с использованием осесимметричных радиальных колебаний пьезокерамических дисков, построены с минимальным числом упрощающих реальную ситуацию предположений. Это позволяет утверждать, что предложенная схема построения доставляет математические модели, которые в достаточной мере адекватны реальным объектам и физическим процессам, которые в них существуют.

Результаты. Основные результаты настоящей работы можно сформулировать следующим образом: построена математическая модель пьезоэлектрического трансформатора с кольцевым электродом в первичной электрической цепи; показана высокая чувствительность частотной характеристики пьезоэлектрического трансформатора к изменениям значений выходного сопротивления источника электрического сигнала в первичной электрической цепи.

Выводы. В результате исследования математической модели реального устройства можно определить тот набор геометрических, физико-механических и электрических параметров реального объекта, который обеспечивает реализацию технических показателей функционального элемента пьезоэлектроники, оговоренных в техническом задании. Стоимость сохраненных ресурсов составляет коммерческую цену математической модели. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в построении математической модели пьезоэлектрического трансформатора с секторными электродами.

Ключевые слова: пьезоэлектрический трансформатор, осесимметричные колебания, физические процессы, математическая модель.

ЛИТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Варадан В. ВЧ МЭМС и их применение / В. Варадан, К. Виной, К. Джозе. – М. : Техносфера, 2004. – 528 с.
2. New type of piezoelectric transformer with very high power density / [Bove T., Wolny W., Ringgaard E., and Breboel K.] // Applications of Ferroelectrics. – 2000. – Vol. 1. – P. 321–324. DOI: 10.1109/ISAF.2000.941564
3. Flynn A. M. and Sanders S. R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers // A. M. Flynn and S. R. Sanders // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2002. – Vol. 17. – P. 8–14. DOI: 10.1109/63.988662
4. Shao W., Chen L., Pan C., Liu Y., and Feng Z. Power density of piezoelectric transformers improved using a contact heat transfer structure / [W.Shao, L.Chen, C. Pan et al] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. – 2012. – Vol. 59. – P. 73–81. DOI: 10.1109/TUFFC.2012.2157
5. Andersen T. Simulation of Piezoelectric Transformers with COMSOL / Andersen T., Andersen M. A. E., Thomsen O. C. // Proceedings of the 2012 COMSOL Conference in Milan. URL: https://www.comsol.dk/paper/download/151765/andersen_paper.pdf
6. Ivensky G., Shvartsas M., and Ben-Yaakov S. Analysis and Modeling of a Piezoelectric Transformer in High Output Voltage Applications. URL: http://cbucc.com/glecture_file/2002060132032.pdf DOI: 10.1109/APEC.2000.822822
7. Multilayer Modal Actuator-Based Piezoelectric Transformers / [Y.-T. Huang, W.-J. Wu, Y.-C. Wang, C.-K. Lee] // IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics,

- and Frequency Control. – 2007. – Vol. 54, No. 2. DOI: 10.1109/TUFFC.2007.249
8. Лавриненко В. В. Пьезоэлектрические трансформаторы / В.В. Лавриненко. – М. : Энергия, 1975. – 112 с.
9. Математическая энциклопедия. Том 2: Д – Кoo. – М. : Советская энциклопедия, 1979. – С. 951–952.
10. Karlash V. L. Longitudinal and lateral vibrations of a plate piezoceramic transformer / V. L. Karlash // Ukr. J. Phys. – 2006. – Vol. 51, No. 10. – P. 986–992.
11. Карлаш В. Л. Вынужденные электромеханические колебания прямоугольных пьезокерамических стержней с разделенными электродами / В. Л. Карлаш // Прикладная механика. – 2013. – Том 49, № 3. – С. 125–134.
12. Богдан А. В. Исследование характеристик пьезоэлектрического трансформатора на основе радиальных колебаний в тонких пьезокерамических дисках / А. В. Богдан, О. Н. Петрищев, Ю. И. Якименко, Ю. Ю. Яновская // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 1. – С. 269–274.
13. Богдан А. В. Математическое моделирование колебаний тонких пьезокерамических дисков для создания функциональных элементов пьезоэлектроники / А. В. Богдан, О. Н. Петрищев, Ю. И. Якименко, Ю. Ю. Яновская // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2009. – Ч. 2. – С. 35–42.
14. Buchacz A. Modelling of passive vibration damping using piezoelectric transducers – the mathematical model / A. Buchacz, M. Placzek, A.Wrobel // Maintenance and reliability. – 2014. – Vol. 16, No. 2. – P. 301–306.
15. Livingston D., Kiran Kumar P., Venugopal. N. Modeling and simulation of multiple piezoelectric transformer converters / D. Livingston, P. Kiran Kumar, N. Venugopal // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. – 2013. – Vol. 3, No. 8. – P. 237–245.
16. Paerand Yu., Kryvoshei D. Secondary power supplies with piezoelectric transformers / Yu. Paerand, D. Kryvoshei // Electronics and Nanotechnology. – Kyiv, 2011. – P. 55.
17. Buchacz A., Wrobel A. Piezoelectric layer modelling by equivalent circuit and graph method / A. Buchacz, A. Wrobel // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. – 2007. – Vol. 20, No. 1–2. – P. 299–302.
18. Cheng K. W. E., Ho Y.L., Ho S. L., Kwok K.W., Wang X.X., Chan H., Xue X.D. Modeling and analysis of piezoelectric transformer using multi-mesh loop matrix circuit under square-wave excitation conditions / [K. W. E. Cheng, Y. L. Ho, S. L. Ho et al]. – IAS, 2005. – P. 2207–2211.
19. Huang Y., Ling Z. Progress in research on piezoelectric transformers / Y. Huang, Z. Ling // Electronic Components & Materials. – 2004. – Vol. 23, No. 1. – P. 7–10.
20. Петрищев О. Н. Гармонические колебания пьезокерамических элементов. Часть 1. Гармонические колебания пьезокерамических элементов в вакууме и метод резонанса – антирезонанса / О. Н. Петрищев. – К. : Аверс, 2012. – 300 с.
21. Гринченко В. Т. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т. 5. Электроупругость / В. Т. Гринченко, А. Ф. Улитко, Н. А. Шульга. – К. : Наукова думка, 1989. – 280 с.
22. Джагупов Р. Г. Пьезоэлектронные устройства вычислительной техники, систем контроля и управления: Справочник / Р. Г. Джагупов, А. А. Ерофеев. – СПб. : Политехника, 1994. – 608 с.
23. Тихонов А. Н. Математическая модель. – в кн. Математическая энциклопедия. – М. : Советская энциклопедия, 1982. – Т. 3, Кoo – Од., С. 574–575.
24. Петрищев О. Н. Принципы и методы расчета передаточных характеристик дисковых пьезоэлектрических трансформаторов. Часть 2. Методика расчета параметров и характеристик простейшего дискового пьезоэлектрического трансформатора / О. Н. Петрищев, К. В. Базило // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2015. – № 4. – С. 10–23.
25. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / Под ред. М. Абрамовича и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

АНАЛИЗ ДИАГРАММЫ НАПРАВЛЕННОСТИ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩЕЙ КОЛЬЦЕВОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С МАЛЫМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ

Тютюнник В. А. – канд. техн. наук, с.н.с., начальник отдела, научный центр Воздушных Сил, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина.

Дудуш А. С. – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных средств информационного обеспечения и управления зенитными ракетными комплексами и системами зенитных ракетных войск Харьковского национального университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина.

Флоров А. Д. – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры вооружения зенитных ракетных войск Харьковского национального университета Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина.

Трофимов И. Н. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела, научный центр Воздушных Сил, Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени Ивана Кожедуба, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Преимуществом кольцевых антенных решеток является возможность кругового электронного сканирования лучом без искажения характеристик диаграммы направленности за счет изменения распределения тока на ее элементах. Данная особенность, в сочетании с современными технологиями и цифровыми методами диаграммообразования открывает перспективу применения кольцевых антенных решеток в обзорных РЛС военного и гражданского назначения вместо антенных систем с механическим вращением.

Цель. Исследование возможностей уменьшения уровня боковых лепестков диаграммы направленности однокольцевой приемо-передающей антенной решетки при использовании известных амплитудных распределений, применяемых для линейных антенных решеток.

Метод. Для проведения исследования использован метод фазовых мод, при котором произвольная функция возбуждения кольцевой антенной решетки представляется в виде суммы компонент (мод) фазового возбуждения, а диаграмма направленности кольцевой антенной решетки является собой суперпозицию диаграмм направленности, создаваемых отдельными фазовыми модами возбуждения. Данный метод позволяет применять к кольцевым антенным решеткам методы, используемые для синтеза диаграмм направленности и уменьшения уровня боковых лепестков линейных антенных решеток за счет использования специальной трансформационной матрицы.

Результаты. Разработана имитационная математическая модель дискретной однокольцевой антенной решетки, которая обеспечивает возможность исследования эффективности использования амплитудных распределений, известных для линейных антенных решеток, для уменьшения ее уровня боковых лепестков.

Выводы. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили возможность применения метода фазовых мод для формирования диаграммы направленности с малым уровнем боковых лепестков в приемо-передающих кольцевых антенных решетках. Показан вариант практического применения амплитудного распределения Дольфа-Чебышева для формирования диаграммы направленности кольцевой решетки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кольцевая антenna решетка, теория фазового возбуждения, уровень боковых лепестков, диаграмма направленности Дольфа-Чебышева.

АББРЕВИАТУРЫ

ДН – диаграмма направленности;
КАР – кольцевая антenna решетка;
ЛАР – линейная антenna решетка;
УБЛ – уровень боковых лепестков.

НОМЕНКЛАТУРА

$\mathbf{b}()$ – вектор амплитуд $y_1 \dots y_M$ фазовых мод поля эквивалентной ЛАР в дальней зоне;

$D()$ – ДН дискретной КАР в азимутальной плоскости;

$D_{az}()$ – ДН непрерывной КАР в азимутальной плоскости;

$D_n()$ – поле n -го элемента КАР в направлении Φ_n ;

$D_{RX}()$ – ДН дискретной КАР в режиме приема;

$D_{TX}()$ – ДН дискретной КАР в режиме передачи;

$f_{EULA}()$ – множитель системы эквивалентной ЛАР;

$J_k[\bullet]$ – функция Бесселя 1-го рода k -го порядка;

k – волновое число в свободном пространстве;

M – максимальное число мод тока, используемых для возбуждения КАР;

n – порядковый номер элемента антенной решетки от 1 до N ;

R – радиус окружности КАР;

$\mathbf{s}_{UCA}()$ – комплексный вектор возбуждения КАР, сфокусированной в направлении Φ_0 , с элементами $x_1 \dots x_N$;

T – трансформационная матрица, описывающая взаимосвязь между векторами $\mathbf{s}_{UCA}()$ и $\mathbf{b}()$;

w – вектор амплитудных весовых множителей $w_1 \dots w_M$;

α – параметр, определяемый требуемый УБЛ для распределения Дольфа-Чебышева;

λ – рабочая длина волны;

Φ_n – угловое положение n -го элемента КАР;

$[\circ]$ – символ произведения Адамара.

ВВЕДЕНИЕ

Частным случаем конформных антенных решеток с осевой симметрией являются КАР, излучатели которых расположены вдоль одной (однокольцевые КАР) или нескольких концентрических окружностей. Порывом в вопросах анализа и синтеза КАР считается создание теории фазового возбуждения [1–5]. Это позволило применять к КАР известные методы синтеза ДН и УБЛ, разработанные для ЛАР.

Указанные преимущества в сочетании с современными методами и технологиями диаграммообразования [3, 6–8] позволяют реализовать быстрое круговое электронное сканирование лучом [9] и обеспечивают перспективу применения КАР в обзорных РЛС и системах связи. Наибольший интерес представляют однокольцевые КАР, позволяющие получить требуемые характеристики ДН при габаритных и весовых ограничениях.

Исследования алгоритмов диаграммообразования для однокольцевых КАР, основанных на применении положений теории фазового возбуждения, указывают на существующие различия в формировании ДН в режимах приема и передачи [1, 3, 4]. Применение одного и того же алгоритма приводит к различию параметров ДН КАР в различных режимах. При оценивании возможности создания совмещенных РЛС на основе КАР интерес представляет исследование взаимосвязи параметров КАР и характеристик ДН в режимах приема и передачи при использовании общего алгоритма. Критерием оптимальности в этом случае может быть наименьший УБЛ суммарной ДН приемо-передающей КАР.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим однокольцевую КАР (рис. 1), состоящую из N изотропных излучателей. Положение каждого n -го элемента задано в местной полярной системе координат радиусом окружности R и углом $\varphi_n = 2\pi(n-1)/N$, $n = \overline{1, N}$. Множитель системы такой КАР определяется соотношением [3]:

$$f_{UCA}(\varphi) = \sum_{n=1}^N \exp[-jkR \cos(\varphi - \varphi_n)], \quad (1)$$

где $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число в свободном пространстве; λ – длина волны.

Соотношение для расчета комплексного вектора возбуждения сфокусированной КАР имеет вид [3]:

$$\mathbf{s}_{UCA}(\varphi_0) = \sum_{n=1}^N \exp[-jkR \cos(\varphi_0 - \varphi_n)], \quad (2)$$

где φ_0 – направление главного максимума ДН КАР в горизонтальной плоскости.

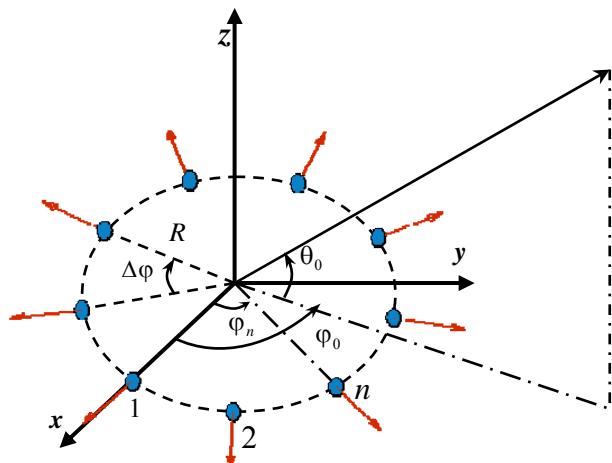


Рисунок 1 – Геометрия однокольцевой КАР

Формула для расчета сфокусированной ДН дискретной однокольцевой КАР в азимутальной плоскости может быть представлена в виде:

$$D(\varphi) = D_{el} \cdot f_{UCA}(\varphi) \cdot \mathbf{s}_{UCA}(\varphi_0) = \sum_{n=1}^N D_n(\varphi - \varphi_n) \times \exp[jkR(\cos(\varphi - \varphi_n) - \cos(\varphi_0 - \varphi_n))], \quad (3)$$

где $D_n(\varphi - \varphi_n)$ – поле n -го элемента решетки в направлении φ_n .

Потенциально возможная (идеальная) ДН КАР, состоящей из бесконечно большого числа изотропных элементов, в горизонтальной плоскости выражается формулой [1–3]:

$$D_{az}(\varphi_0) = J_0\left[2kR \sin \frac{\varphi_0}{2}\right],$$

где $J_0[\bullet]$ – функция Бесселя 1-го рода 0-го порядка.

Графики ДН непрерывной КАР и дискретной КАР при расстоянии между элементами $0,4\lambda$ и $0,6\lambda$ и прямом применении амплитудного распределения Дольфа-Чебышева¹ для требуемого УБЛ $\alpha = -20$ дБ представлены на рис. 2.

Полученные результаты позволяют выделить следующие особенности формирования ДН КАР в горизонтальной плоскости:

1) использование известных амплитудных распределений, применяемых в ЛАР, для уменьшения УБЛ ДН дискретной КАР не обеспечивает желаемый результат. УБЛ составляет только минус 8 дБ вместо ожидаемых минус 20 дБ;

3) незначительное уменьшение количества элементов КАР (увеличение расстояния между ними) приводит к значительному возрастанию УБЛ ДН дискретной КАР.

¹ Использовалась встроенная функция MATLAB *chebwin(N, alpha)*, где α – требуемый УБЛ для ЛАР

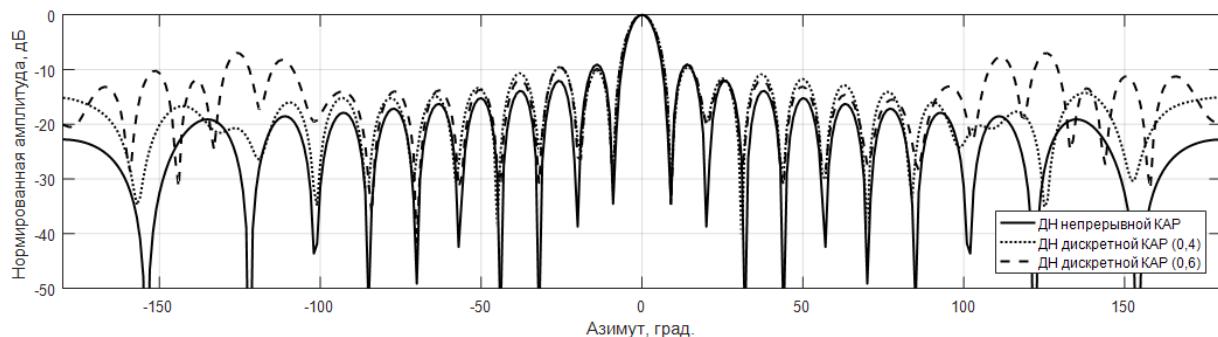


Рисунок 2 – Диаграммы направленности непрерывной и дискретной КАР

Задача заключается в поиске метода уменьшения УБЛ в КАР при использовании известных амплитудных распределений, применяемых в ЛАР.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В работе [5] Дейвисом впервые предложен метод фазовых мод, который обеспечивает возможность применения в приемных КАР все методы, используемые для синтеза ДН и уменьшения УБЛ ЛАР.

В работах [1, 3] получил дальнейшее развитие метод анализа и синтеза КАР, основанный на представлении ДН КАР в виде суммы фазовых мод (угловых гармоник). В основе метода лежит допущение о непрерывном распределении токов вдоль кольца. Поскольку распределение тока в кольце является периодической функцией угла с периодом 2π , то оно может быть разложено в обобщенный ряд Фурье по любой удобной системе ортогональных функций.

Каждый член ряда представляет собой гармонику (моду) тока с постоянной амплитудой и линейно изменяющейся по углу фазой. Каждой гармонике соответствует парциальная ДН (диаграмма, определяемая модой тока соответствующего порядка) с независящей от угла амплитудой и фазой, являющейся линейной функцией угла наблюдения. Парциальные диаграммы представляют собой Фурье-компоненты суммарной ДН КАР, являющейся периодической функцией угла в плоскости кольца.

Представление ДН КАР в виде суммы мод аналогично суммированию вкладов, вносимых в ДН ЛАР отдельными ее излучателями. Такой подход обеспечивает возможность описания работы кольцевой многомодовой решетки можно с помощью эквивалентной ЛАР.

В работах [1, 4] приведены результаты практических исследований дискретных однокольцевых КАР, которые доказали возможность одновременного возбуждения всех независимых мод (как положительных, так и отрицательных) от нуля до $N/2$ путем подключения КАР из N элементов к выходам матричной схемы и определен общий вид трансформационной матрицы.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Рассмотрим дискретную однокольцевую приемо-передающую КАР, элементы которой подключены к

разъемам матричной схемы (рис. 3). Для общности анализа допустим, что элементы КАР являются изотропными излучателями.

На рис. 3 показаны:

$\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0) = [x_1 \dots x_N]^T$ – комплексный вектор возбуждения КАР;

$\mathbf{b}(\phi_0) = [y_1 \dots y_M]^T$ – вектор амплитуд фазовых мод поля эквивалентной ЛАР в дальней зоне, где $M = 0, \pm 1, \dots, \pm(N-1)/2$ если N нечетное или $M = 0, \pm 1, \dots, \pm(N-2)/2, N/2$ если N четное;

$\mathbf{w} = [w_1 \dots w_M]^T$ – вектор амплитудных весовых множителей.

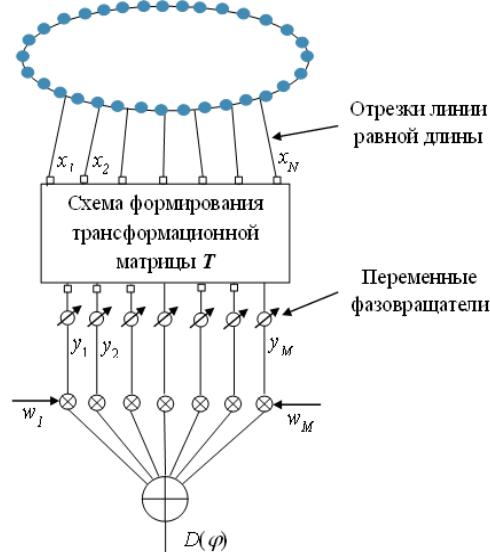


Рисунок 3 – Структура приемо-передающей КАР

Пусть комплексный вектор возбуждения КАР в режиме приема для узкополосного сигнала с частотой $f_0 = c/\lambda$ задан в азимутальной плоскости вектор-столбцом $\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0)$ размерности $N \times 1$. Тогда, в со-

ответствии с (1.2), n -й элемент вектора $\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0)$, $n = \overline{1, N}$, определяется следующим выражением:

$$[\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0)]_n = \exp[-jkR\cos(\phi_0 - \phi_n)].$$

Трансформационная матрица \mathbf{T} , описывающая взаимосвязь между комплексным вектором возбуждения КАР $\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0)$ и вектором амплитуд фазовых мод поля эквивалентной ЛАР в дальней зоне $\mathbf{b}(\phi_0)$, в общем виде определяется как [1, 3]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{D}. \quad (4)$$

Матрицы \mathbf{C} и \mathbf{D} размерностей $N \times N$ могут быть рассчитаны по следующим выражениям:

$$\mathbf{C} = \text{diag} \left\{ \left(j^{m-1-H} J_{m-1-H} \left[\frac{2\pi R}{\lambda} \right] \right)^{-1} \right\};$$

$$[\mathbf{D}]_{mn} = \exp \left[j^{\frac{(m-1-H) \cdot 2\pi(n-1)}{N}} \right],$$

где $m = \overline{1, N}$; $J_k[\bullet]$ – функция Бесселя 1-го рода k -го порядка; $H = (N-1)/2$ – если N нечетное или $H = N/2$ – если N четное.

Вектор амплитуд фазовых мод поля эквивалентной ЛАР в дальней зоне находится как:

$$\mathbf{b}(\phi_0) = \mathbf{T} \cdot \mathbf{s}_{UCA}(\phi_0). \quad (5)$$

Каждый m -й элемент вектора $\mathbf{b}(\phi_0)$ представляет собой гармонику (моду) тока с постоянной амплитудой и линейно изменяющейся в пределах 2π фазой.

Используя метод фазовых мод [1...5], проведем анализ возможности синтеза ДН КАР с заданным УБЛ путем использования известного для ЛАР амплитудного распределения Дольфа-Чебышева. При этом ДН КАР в режиме приема будет описываться матричным выражением вида:

$$\mathbf{D}_{RX}(\phi) = f_{EULA}(\phi) \cdot [\mathbf{b}(\phi_0) \circ \mathbf{w}], \quad (6)$$

где $f_{EULA}(\phi) = \sum_{m=1}^N \exp[-j(m-1-H)\phi]$ – множитель системы эквивалентной ЛАР; $[\circ]$ – символ произведения Адамара.

Свойства результирующей ДН (3) будут идентичны свойствам ЛАР, но теперь данная функция определена в диапазоне углов $0 \dots 360^\circ$ и пропорциональна переменной ϕ .

При синтезе ДН КАР в режиме передачи сначала необходимо найти распределение тока на входах матричной схемы. Для решения данной задачи целесообразно использовать известные методы синтеза ДН ЛАР. В этом случае необходимое распределение тока на входах матричной схемы может быть найдено как:

$$\mathbf{b}(\phi_0) = \mathbf{s}_{EULA}(\phi_0) \circ \mathbf{w},$$

где $\mathbf{s}_{EULA}(\phi_0) = \sum_{m=1}^N \exp[j(m-1-H)kR\sin\phi_0]$ – сканирующий вектор эквивалентной ЛАР; \mathbf{w} – вектор амплитудных весовых множителей, соответствующий оптимальной ДН ЛАР.

В соответствии с теорией фазового возбуждения, полученный вектор амплитудного распределения эквивалентной ЛАР представляет собой вектор амплитуд фазовых мод поля КАР в дальней зоне. Применение метода фазовых мод позволяет установить связь между полем КАР в дальней зоне и комплексным вектором возбуждения КАР. В соответствии с этим вектором, получаемый после прохождения сигналов через матричную схему, имеет вид:

$$\mathbf{s}_{UCA}(\phi_0) = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{b}(\phi_0).$$

Полученное распределение токов является комплексным вектором возбуждения сфокусированной КАР. При этом следует отметить, что использование всех M доступных мод тока для формирования вектора возбуждения дискретной КАР может привести к появлению различий от потенциальной ДН непрерывной КАР [4]. Особенно большие различия будут иметь место в области дальних лепестков. Поэтому для получения наиболее близкой к потенциальной ДН КАР в режиме передачи максимальное число используемых мод тока M должно выбираться из условия [3]:

$$M < 2kR + 1 < N.$$

Выражение для расчета сфокусированной ДН КАР в режиме передачи примет вид:

$$\mathbf{D}_{TX}(\phi) = f_{UCA}(\phi) \cdot \mathbf{s}_{UCA}(\phi_0).$$

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

На основе описанных процедур с использованием пакета Phased Array System Toolbox системы Matlab была разработана имитационная математическая модель дискретной однокольцевой антенной решетки, позволяющая проводить анализ эффективности применения метода фазовых мод для синтеза ДН КАР с малым УБЛ.

Анализ эффективности применения метода фазовых мод для синтеза ДН КАР с малым УБЛ при использовании амплитудных весовых множителей проводился для следующих исходных данных: рассмат-

ривалась решетка из $N = 32$ изотропных излучателей; расстояние между элементами составляло 0,4, 0,5 и 0,6λ; для расчета амплитудных весовых множителей применялось амплитудное распределение Дольфа-Чебышева с УБЛ $\alpha = -20, -30$ и -40 дБ ; для возбуждения элементов КАР использовались моды с номерами $M = 0, \pm 1, \dots, \pm(N-2)/2, N/2$.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты расчетов представлены в виде графиков ДН КАР в режимах приема (рис. 4–6, а), передачи (рис. 4–6, б), а также результирующей ДН приемо-передающей КАР (рис. 4 – 6, в), полученной путем перемножения ДН в режимах приема и передачи.

Полученные результаты позволили выявить следующие закономерности:

1) при расстоянии между элементами $2\pi R / N = 0,4\lambda$: ДН КАР как в режиме передачи (рис. 4, а), так и в режиме приема (рис. 4 б) имеют практически равномерный УБЛ, то есть максимально приближены к потенциальной ДН непрерывной КАР; реализуемый УБЛ в режиме передачи для всех заданных значений параметра α остается одинаковым и составляет порядка -20 дБ; УБЛ в режиме приема не превышает заданных значений параметра $\alpha = -20, -30$ и -40 дБ , соответственно; для

$\alpha = -20$ дБ ширина ДН соответствует потенциальной ДН непрерывной КАР (рис. 2), в то время как для значений $\alpha = -30$ и -40 дБ имеет место расширение ДН соответственно на 10% и 20% в режиме передачи и на 20% и 40% в режиме приема;

2) при расстоянии между элементами $2\pi R / N = 0,5\lambda$: по мере уменьшения значений параметра α уровень ближних боковых лепестков ДН КАР в режиме передачи (рис. 5, а) плавно меняется от равномерно спадающего ($-15\dots-30$ дБ для $\alpha = -20$ дБ) до равномерно возрастающего ($-39\dots-28$ дБ для $\alpha = -40$ дБ) в диапазоне углов $\phi = \pm 90^\circ$ относительно направления главного максимума; в области дальних лепестков наблюдается резкое возрастание УБЛ до значений $-15\dots-20$ дБ; имеет место незначительное искажение формы боковых лепестков в режиме приема (рис. 5, б), интенсивность которых усиливается по мере уменьшения значений параметра α ; при этом УБЛ ДН КАР в режиме приема остается в пределах заданных значений параметра $\alpha = -20$ и -30 дБ и лишь незначительно превышает заданное значение в области дальних лепестков для $\alpha = -40$ дБ ; характер изменения ширины ДН КАР остается такой же, как и при расстоянии между элементами $0,4\lambda$;

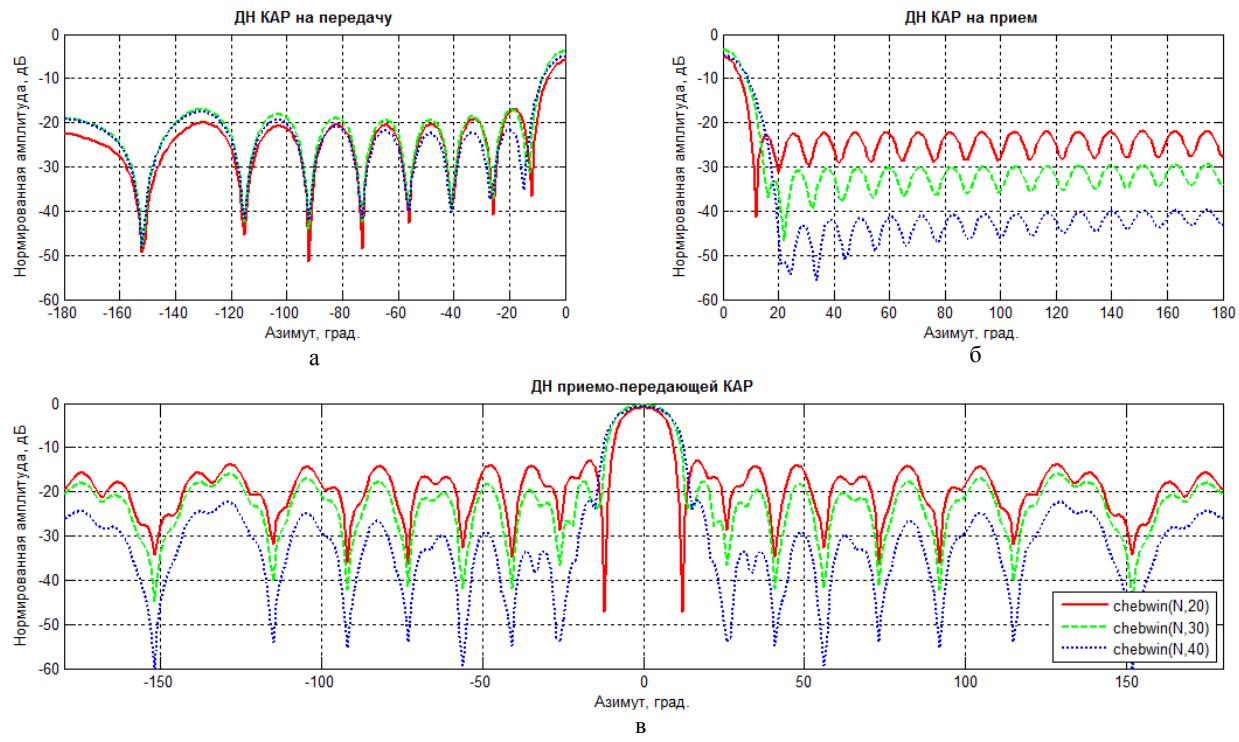


Рисунок 4 – Диаграммы направленности дискретной КАР ($N = 32$, $2\pi R / N = 0,4\lambda$)

3) при расстоянии между элементами $2\pi R / N = 0,6\lambda$: ДН КАР в режиме передачи (рис. 6, а) характеризуется равномерно спадающим УБЛ $-12\dots-14$ дБ, $-19\dots-23$ дБ и $-27\dots-37$ дБ для $\alpha = -20^\circ$, -30° и -40° дБ, соответственно, в диапазоне углов $\phi = \pm 80^\circ$ относительно направления главного максимума; в области дальних лепестков УБЛ в режиме передачи возрастает до $-10\dots-17$ дБ;

ДН КАР в режиме приема (рис. 6, б) характеризуется практически равномерным УБЛ со значениями выше, чем для случая синфазного возбуждения КАР (рис. 2); ширина ДН КАР в обеих режимах соответствует потенциальной ДН непрерывной КАР и лишь незначительно расширяется в режиме передачи ($\sim 10\%$) при $\alpha = -40^\circ$.

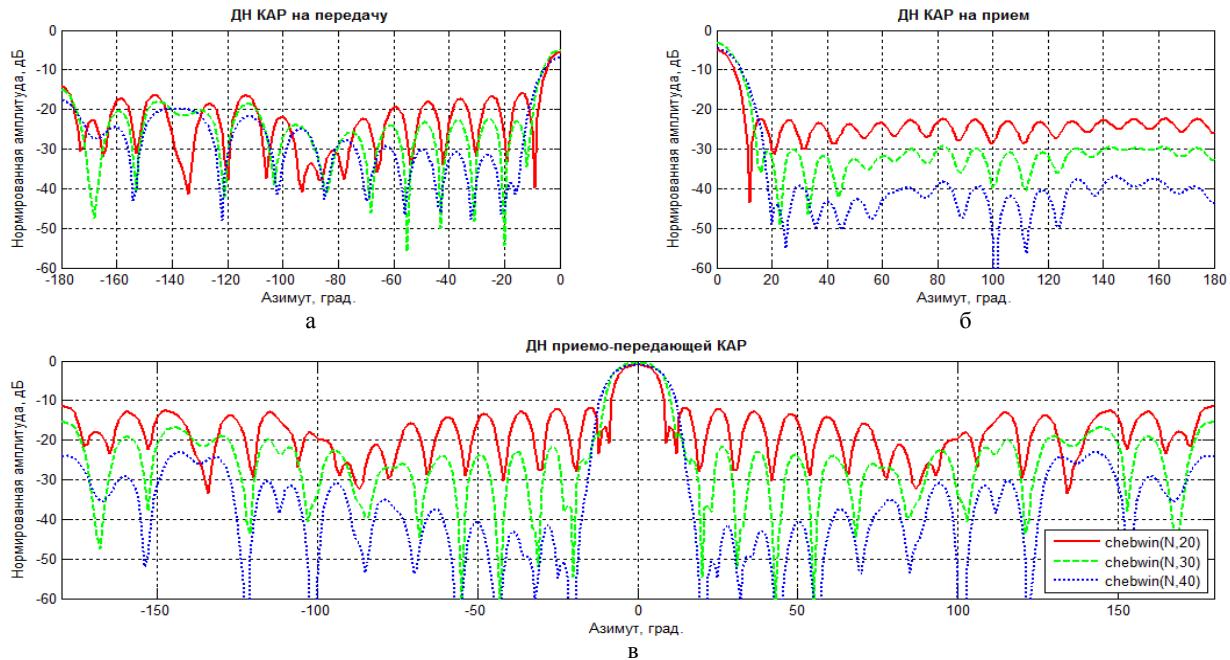


Рисунок 5 – Диаграммы направленности дискретной КАР ($N = 32$, $2\pi R / N = 0,5\lambda$)

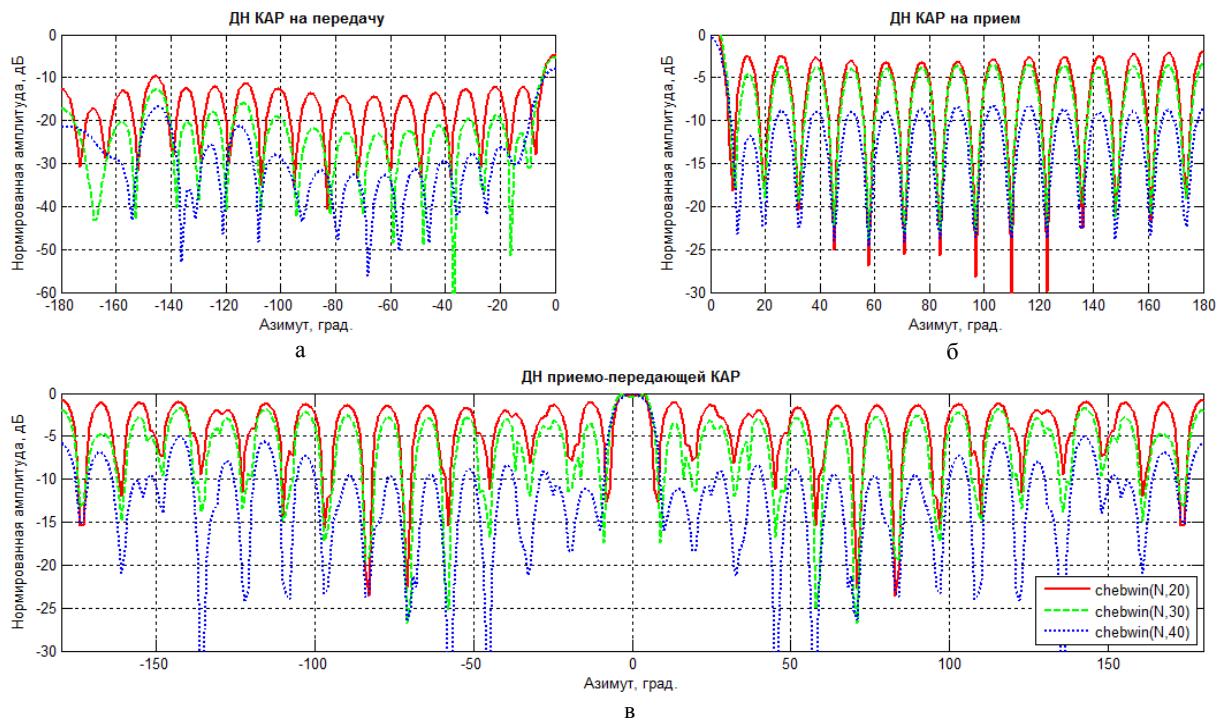


Рисунок 6 – Диаграммы направленности дискретной КАР ($N = 32$, $2\pi R / N = 0,6\lambda$)

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Графики диаграмм направленности кольцевой антенной решетки, представленные на рис. 4–6, показывают, что изменение расстояния между элементами дискретной КАР при использовании общего алгоритма формирования ДН оказывает различное влияние на параметры ДН КАР в режимах приема и передачи. Это, в свою очередь, дает возможность поиска рациональных соотношений между диаметром КАР и длиной волны, а также выбора вида амплитудного распределения, которое обеспечит требуемые параметры суммарной ДН приемо-передающей КАР.

Пути улучшения параметров суммарной ДН приемо-передающей КАР связанны с поиском алгоритмов, обеспечивающих обратимость преобразования, основанного на использовании метода фазовых мод.

ВЫВОДЫ

В статье методами имитационного математического моделирования проведено исследование характеристик направленности дискретной однокольцевой антенной решетки при использовании метода фазовых мод и общего алгоритма формирования диаграммы направленности в режимах приема и передачи. На примере амплитудного распределения Дольфа-Чебышева, используемого для линейных антенных решеток, показан подход к синтезу диаграммы направленности кольцевой антенной решетки в режимах приема и передачи, а также суммарной диаграммы направленности приемо-передающей решетки.

Научная новизна состоит в разработке имитационной модели дискретной однокольцевой антенной решетки, реализующей алгоритм формирования диаграммы направленности с малым уровнем боковых лепестков в режимах приема и передачи за счет использования метода фазовых мод и известных для линейных антенных решеток амплитудных распределений.

Практическая значимость определяется проведенными экспериментальными исследованиями эффективности использования амплитудного распределения Дольфа-Чебышева для синтеза диаграммы направленности кольцевых антенных решеток с заданным уровнем боковых лепестков. Получены графики ди-

УДК 621.396.677.4

АНАЛІЗ ДІАГРАМИ НАПРАВЛЕНОСТІ ПРИЙМАЛЬНО-ПЕРЕДАВАЛЬНОЇ КІЛЬЦЕВОЇ АНТЕННОЇ РЕШІТКИ З МАЛИМ РІВНЕМ БІЧНИХ ПЕЛЮСТОК

Тютюнник В. О. – канд. техн. наук, с.н.с., начальник відділу, науковий центр Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Дудуш А. С. – канд. техн. наук, старший викладач кафедри радіоелектронних засобів інформаційного забезпечення та управління зенітними ракетними комплексами і системами зенітних ракетних військ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Флоров О. Д. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри озброєння зенітних ракетних військ Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

Трофимов І. М. – канд. техн. наук, старший науковий співробітник відділу, науковий центр Повітряних Сил, Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Перевагою кільцевих антених решеток є можливість кругового електронного сканування променем без спотворення характеристик діаграми направленості за рахунок зміни розподілу струму на її елементах. Дано особливість, в поєднанні з сучасними технологіями і цифровими методами діаграмоутворення відкриває перспективу застосування кільцевих антених решеток в оглядових РЛС військового і цивільного призначення замість антених систем з механічним обертанням.

грамм направленности дискретной однокольцевой антенной решетки в режимах приема и передачи при различных параметрах решетки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Handbook of Antenna Design. / A. W. Rudge, K. Milne, A. D. Oliver, P. Knight. – London : Peter Peregrinus Ltd., 1983, Vol. 2. – 940 p.
2. Перунов Ю.М. Зарубежные РЭС : в 6 кн. / [Перунов Ю. М., Мацуевич В. В., Васильев А. А.; под ред. Ю. М. Перунова]. – М. : Радиотехника, 2010. – Кн. 3. Антенны, 2010. – 304 с.
3. Josefsson L. Conformal array antenna theory and design / Lars Josefsson, Patrik Persson. – New Jersey : John Wiley & Sons, 2006. – 472 p.
4. Sheleg. B. A Matrix-Fed Circular Array for Continuous Scanning / B. Sheleg // IEEE Trans. on Antennas and Propagation. – 1968. – Vol. AP-56, No. 11. – P. 2016–2027. – DOI: 10.1109/PROC.1968.6778.
5. A transformation between the phasing techniques required for linear and circular aerial arrays / Davies D.E.N // Proc. IEE. – 1965. – Vol. 112 (11). – P. 2041–2045. DOI: 10.1049/piee.1965.0340.
6. Сомов А.В. Антенные системы с кольцевой передающей решеткой: потенциальные возможности / А. В. Сомов, Д. М. Ваврик // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т.18, № 2. – С. 152–160. – Режим доступа: <http://journal.rian.kharkov.ua/index.php/ra/article/view/1131/768>.
7. Балабан М. В. Повышение направленности излучения кольцевой антенной решетки / М. В. Балабан, А. В. Сомов // Радиофизика и электроника. – 2014. – Т.5 (19), № 3. – С. 9–19. – Режим доступа: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/1061/01/02-Balaban.pdf?sequence=1>.
8. Sen B. L Band Multi-Channel Transmit/Receive Module For Circular Phased Array Radar / B. Sen, G. Cansiz, H. Boran // Proc. of IEEE International Radar Conference. – Arlington VA, USA. – 2015. – P. 1–4. – DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130960.
9. Trofimov I. N. Multi-Frequency Signals Forming for MIMO Radars with Fast Electronic Scanning / I. N. Trofimov, A. S. Dudush, A. F. Shevchenko // Telecommunications and radio engineering. – 2015. – Vol. 74, No. 5. – P. 409–422. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i5.40.

Статья поступила в редакцию 25.06.2018.
После доработки 28.08.2018.

Ціль. Дослідження можливостей зменшення рівня бічних пелюсток діаграми направленості однокільцевої приймально-передавальної антенної решітки при використанні відомих амплітудних розподілів, що застосовуються для лінійних антенних решіток.

Метод. Для проведення дослідження використано метод фазових мод, при якому довільна функція збудження кільцевої антенної решітки представляється у вигляді суми компонент (мод) фазового збудження, а діаграма направленості кільцевої антенної решітки являє собою суперпозицію діаграм направленості, що створюються окремими фазовими модами збудження. Даний метод дозволяє застосовувати до кільцевих антенних решіток методи, що використовуються для синтезу діаграм направленості і зменшення рівня бічних пелюсток лінійних антенних решіток за рахунок використання спеціальної трансформаційної матриці.

Результати. Розроблено імітаційну математичну модель дискретної однокільцевої антенної решітки, яка забезпечує можливість дослідження ефективності використання амплітудних розподілів, відомих для лінійних антенних решіток, для зменшення її рівня бічних пелюсток.

Висновки. Проведені обчислювальні експерименти підтвердили можливість застосування методу фазових мод для формування діаграми направленості з малим рівнем бічних пелюсток в приймально-передавальних кільцевих антенних решітках. Показаний варіант практичного застосування амплітудного розподілу Дольфа-Чебишева для формування діаграми направленості кільцевої решітки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: кільцева антenna решітка, теорія фазового збудження, рівень бічних пелюсток, діаграма направленості Дольфа-Чебишева.

UDC 621.396.677.4

PATTERN ANALYSIS OF THE RECEIVING-TRANSMITTING CIRCULAR ARRAY WITH LOW SIDE LOBE LEVEL

Tiutiunnyk V. A. – PhD, Senior Researcher, Head of Research Department of the Air Force science Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

Dudush A. S. – PhD, Senior Instructor of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

Florov A. D. – PhD, Associate Professor, Professor of the Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

Trofymov I. N. – PhD, Senior Researcher of the Air Force science Center, Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. A particular advantage of uniform circular arrays is the possibility of scanning the beam within 360° in azimuth without distorting the characteristics of the directivity pattern only by changing the amplitude-phase distribution of the current on its elements. This feature, combined with modern beamforming techniques and digital methods of beamforming opens the prospect of using circular arrays in surveillance radars for military and civil purposes instead of antenna systems with mechanical rotation.

Objective. Investigation of the possibility of reducing the sidelobe level of a uniform circular transmit-receive array using known amplitude distributions used for linear arrays.

Methods. For the study, a phase-mode excitation technique is used in which an arbitrary excitation function of a uniform circular array is represented as a sum of phase excitation components (modes), and the circular array antenna pattern is a superposition of patterns produced by individual phase excitation modes. This technique makes it possible to apply for circular arrays the methods used to pattern synthesis and reduce the side lobe level in linear arrays due to the use of a special transformation matrix.

Results. An imitation mathematical model of a discrete uniform circular array has been developed that provides an opportunity to study the efficiency of using amplitude distributions, known for linear arrays, to reduce its side lobe level.

Conclusions. The computational experiments have confirmed the possibility of using the phase-mode excitation technique for a pattern synthesis with low sidelobe level in the uniform circular transmits-receive array. A variant of the practical application of the Dolph-Chebyshev amplitude distribution for the synthesis of a circular array pattern is shown.

KEYWORDS: uniform circular array (UCA), phase mode excitation theory, side lobe level (SLL), Dolph-Chebyshev array pattern.

REFERENCES

1. Rudge A. W., K. Milne, A. D. Olver, P Knight The Handbook of Antenna Design. London, Peter Peregrinus Ltd., 1983. Vol. 2, 940 p.
2. Perunov Ju. M., Macukovich V. V., Vasil'ev A. A.; pod red. Perunova Ju. M. Zarubezhnye RES, v 6 kn. Moscow, Radio-technika, 2010, Kn. 3, Antenny, 2010, 304 p.
3. Josefsson L. Conformal array antenna theory and design / Lars Josefsson, Patrik Persson. New Jersey, John Wiley & Sons, 2006, 472 p.
4. Sheleg B. A Matrix-Fed Circular Array for Continuous Scanning, *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, 1968, Vol. AP-56, No. 11, pp. 2016–2027. DOI: 10.1109/PROC.1968.6778.
5. Davies D. E. N. A transformation between the phasing techniques required for linear and circular aerial arrays, *Proc. IEE*, 1965, 112 (11), pp. 2041–2045. DOI: 10.1049/piee.1965.0340.
6. Somov A. V., Vavriv D. M. Antenna Systems with Circular Transmit Array: Potentialities, *Radio Physics and Radio Astronomy*, Vol.18, No. 2 (2013), pp. 152–160.
7. Balaban M. V., Somov A. V. Povyshenie napravленности излучения колцевой антенной решетки, *Radiofizika i Elektronika*, 2014, Vol. 5(19), No. 3, pp. 9–19.
8. Sen B., Cansız G., Boran H. L Band Multi-Channel Transmit/Receive Module For Circular Phased Array Radar, *Proc. of IEEE International Radar Conference. – Arlington VA, USA*, 2015, pp. 1–4. DOI: 10.1109/RADAR.2015.7130960.
9. Trofimov I. N., Dudush A. S., Shevchenko A. F. Multi-Frequency Signals Forming for MIMO Radars with Fast Electronic Scanning, *Telecommunications and radio engineering*, 2015, Vol. 74, No. 5, pp. 409–422. DOI: 10.1615/TelecomRadEng.v74.i5.40.

ВЕРИФИКАЦІЯ ПРОТОКОЛОВ ТРЕУГОЛЬНИХ КОММУНІКАЦІОННИХ РЕШЕТОК БЕСКОНЕЧНИМИ СЕТЯМИ ПЕТРИ

Шмелева Т. Р. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры коммутационных систем Одесской национальной академии связи им. А. С. Попова, Одесса, Украина.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. Вичислительные и коммуникационные решетки являются мощным средством повышения производительности и качества обслуживания современных сетей. В двумерных решетках основными формами ячейки являются треугольник, четырехугольник и шестиугольник. Треугольные решетки применяются при решении краевых задач с треугольными конечными элементами в системах радиовещания и телевидения. Наиболее простые и эффективные способы реализации решеток могут обладать скрытыми дефектами и уязвимостями с точки зрения безопасного обмена информации. Таким образом, верификация решеток является актуальной задачей.

Цель роботи – построение моделей треугольных коммуникационных решеток в форме бесконечных сетей Петри и исследование их свойств для доказательства корректности (верификации) протоколов.

Методы исследований базируются на основных положениях теории графов, линейной алгебры, теоретических основах сетей Петри, математического и имитационного моделирования.

Результаты. Построено параметрическое описание треугольной коммуникационной решетки на плоскости в прямой и двойственной форме. Узел коммутации реализует полнодуплексный режим работы и буферизацию пакетов с ограниченным размером внутреннего буфера. Получены аналитические выражения для оценки числа компонентов модели. Решение бесконечных системы линейных уравнений в параметрической форме позволило доказать инвариантность модели произвольного размера. Инвариантность является одним из основных свойств модели идеального протокола, определяющих безопасность работы сети. Практическая значимость полученных результатов заключается в построении схем безопасных решеток для дальнейшей программной и аппаратной реализации, что официально подтверждено включением моделей треугольных решеток в архив моделей сетей Петри Лаборатории Информатики университета Париж 6.

Выводы. Впервые построена математическая модель треугольных коммуникационных решеток с регулярной структурой произвольного размера в форме бесконечных сетей Петри для верификации протоколов передачи информации в решетках. Применение методики для верификации треугольных коммуникационных структур позволяет выполнить дальнейшее развитие теории бесконечных сетей Петри для построения и исследования моделей произвольных решеток с регулярной структурой.

Ключевые слова: вичислительные решетки, треугольная коммуникационная структура, бесконечная сеть Петри, параметрическое представление, лінейний інваріант, верифікація протоколів.

НОМЕНКЛАТУРА

- i – номер уровня (строки) в треугольной решетке;
 j – номер столбца в i -м уровне треугольной решетки;
 k – размер треугольной решетки;
 N_{arc} – количество дуг в треугольной решетке размера k ;
 N_{max} – максимальное количество фишок в любой маркировке;
 N_p – количество позиций в треугольной решетке размера k ;
 N_t – количество переходов в треугольной решетке размера k ;
 p_{max} – максимальное количество фишок в буфере коммутатора;
 $R^{i,j}$ – узел треугольной решетки;
 S_k – общее число ячеек в решетке с уровнями;
 S_{k1} – общее число основных ячеек в решетке с уровнями;
 S_{k2} – общее число дополнительных ячеек в решетке с уровнями;
 u – номер текущего порта узла;
 v – номер порта назначения для передачи пакетов в сети;

W_i – число ячеек на уровне i ;

W_{i1} – число основных ячеек на уровне i ;

W_{i2} – число дополнительных ячеек на уровне i .

ВВЕДЕНИЕ

Конечные сети Петри являются традиционным средством верификации телекоммуникационных протоколов. Общие вопросы спецификации протоколов изучены в [1]; основные методы верификации, основанные на пространстве состояний и линейных инвариантах сети Петри, представлены в [2]. Решетчатые структуры, организация которых исследована в [3], требуют верификации сети произвольного размера с неограниченным числом взаимодействующих узлов. Для решения таких задач был предложен формализм бесконечных сетей Петри. Параметризация структуры решетки и решение бесконечных систем уравнений в параметрической форме позволяют находить свойства решеток произвольного размера. В работах [5, 7] исследованы свойства прямоугольных решеток на плоскости и в многомерных пространствах. Практическое использование треугольных решеток в системах связи делает актуальной задачу построения и верификации моделей треугольных решеток, решению которой посвящена настоящая работа.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть рассматриваются методы верификации телекоммуникационных протоколов бесконечными сетями Петри. Модель идеального телекоммуникационного протокола должна обладать свойствами ограниченности и консервативности, безопасности, живости и стационарной повторяемости. Исследуем треугольные коммуникационные решетки произвольного размера с регулярной структурой.

Тогда задача доказательства корректности протоколов треугольных коммуникационных решеток заключается в нахождении инвариантов позиций и переходов (для анализа ограниченности и живости соответственно) моделей треугольных коммуникационных решеток, представленных в форме бесконечных сетей Петри. Построение моделей базируется на правилах композиции треугольной решетки произвольного размера. Для расчета инвариантов сети Петри используем прямое и двойственное параметрические представления.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Телекоммуникационные системы и сети, общая организация которых изучена в [1], занимают ведущее место в современном информационном пространстве. Надежность, скорость и достоверность передаваемой информации обеспечивается сложнейшими аппаратными и программными средствами. Безопасность используемых средств подтверждается специальными процедурами проверки корректности телекоммуникационных протоколов [2] и оборудования. Новый этап развития телевидения и радиовещания [4], повсеместное использование, внедрение и разработка очередных поколений мобильной связи [6], вычисления на решетках [3] требуют развития методов верификации протоколов сложных телекоммуникационных систем с неограниченным количеством взаимодействующих узлов [5].

В общем случае коммуникационную сеть можно представить в виде решетки [3] с коммутирующим (вычислительным) узлом [5, 7]. Вопросы построения и верификации моделей протоколов в форме сетей Петри [9] исследовано для современных сетевых протоколов в [2] и для структур решеток в [7] с различными граничными условиями [8]. Ранее были изучены четырехугольные решетки [7] на плоскости и n-мерном пространстве с помощью бесконечных сетей Петри. Для построения моделей указанного размера в формате моделирующей системы Tina [10] были предложены генераторы [11] моделей сетей Петри, используемые для проверки параметрических решений.

В настоящей работе построено прямое и двойственное параметрическое описание модели треугольной коммуникационной решетки, которое позволяет автоматизировать генерацию [12] модели решетки произвольного размера и в дальнейшем провести исследование [10, 13] структурных и поведенческих свойств [9] модели.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Статья развивает новую методологию верификации протоколов бесконечными сетями Петри, которая является решением научной проблемы верификации протоколов с неограниченным количеством взаимодействующих систем. В статье показано практическое применение методологии для верификации треугольных решеток и указана связь таких структур с действующими и перспективными сетевыми решениями.

Для решения поставленных задач введены правила композиции треугольной коммуникационной решетки произвольного размера, определены типы узлов и их количество на разных уровнях решетки. Построены прямое и двойственное параметрические представления треугольной коммуникационной решетки.

Рассмотрим композицию треугольной решетки в соответствии с рис. 1а; для композиции использованы две разновидности устройств, изображенных на рис. 1б и 1в, отличающиеся нумерацией портов и графическим расположением, что в дальнейшем влияет лишь на порядок соединения портов.

Выполним композицию треугольной решетки. Занумеруем ячейки (узлы) сверху вниз и слева направо. Для композиции решетки необходимо ввести обозначение двух разновидностей ячеек: основной ячейкой будем называть начальную ячейку решетки с номером $R^{1,1}$; дополнительной ячейкой будем называть ее нижнего соседа с номером $R^{2,2}$.

Утверждение 1. Число ячеек на уровне i (1) равняется:

$$W_i = 2 \cdot i - 1. \quad (1)$$

Доказательство. Количество ячеек на первом уровне равно единице, $W_1 = 2 \cdot 1 - 1 = 1$; количество ячеек на втором уровне равно трем, $W_2 = 2 \cdot 2 - 1 = 3$; количество ячеек на третьем уровне равно пяти, $W_3 = 2 \cdot 3 - 1 = 5$. Далее выполним доказательство по индукции, предположим, что количество ячеек на i -м уровне равно $W_i = 2 \cdot i - 1$. Подсчитаем количество ячеек на уровне $(i+1)$. По построению треугольной решетки на каждом последующем уровне добавляются две новые ячейки, $W_{i+1} = W_i + 2 = 2 \cdot i - 1 + 2 = 2(i+1) - 1$.

Утверждение 2. Общее число ячеек в решетке с k уровнями (2) равняется:

$$S_k = \sum_{i=1}^k W_i = \sum_{i=1}^k (2 \cdot i - 1) = \sum_{i=1}^k 2 \cdot i - k = k^2. \quad (2)$$

Доказательство. Количество ячеек в одноуровневой решетке $k=1$ равно $1=1^2=k^2$.

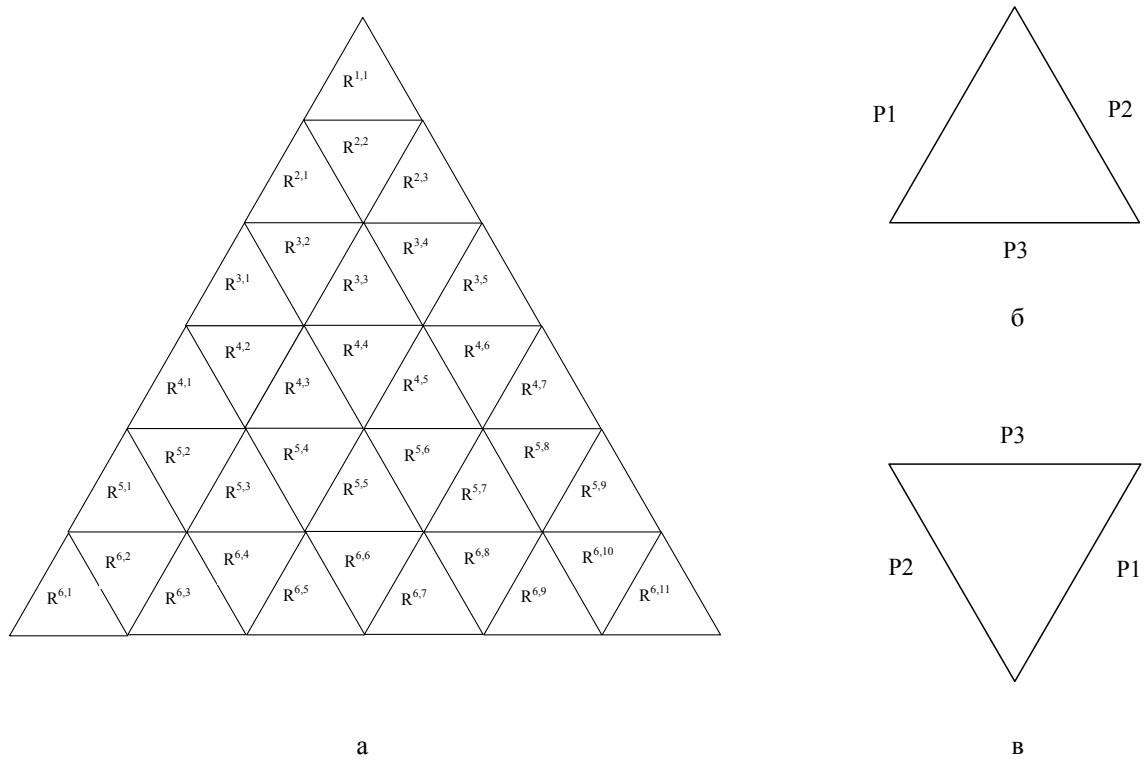


Рисунок 1 – Схема композиции трикутної решетки:
 а – композиція решетки; б – основний узел; в – дополнительний узел

Кількість ячеек в двухуровневій решетці $k=2$ равно $4=2^2=k^2$; кількість ячеек в трехуровневій решетці $k=3$ равно $9=3^2=k^2$. Далее выполним доказательство по индукции, предположим, что количество ячеек на k -м уровне равно (2). Подсчитаем количество ячеек на уровне $(k+1)$. На следующем уровне в решетку добавляется количество ячеек в соответствии с (1), тогда

$$S_{k+1} = S_k + W_{k+1} = k^2 + 2(k+1)-1 = k^2 + 2k + 1 = (k+1)^2.$$

Утверждение 3. Число основных и дополнительных ячеек на уровне i (3) равняется:

$$W_{il} = i, \quad W_{i2} = i-1. \quad (3)$$

Доказательство. На первом уровне решетки $i=1$ число основных ячеек равно $W_{11}=1=i$ и дополнительных $W_{12}=0=i-1$; на втором уровне $i=2$ число основных ячеек равно $W_{21}=2=i$ и дополнительных $W_{22}=1=i-1$; количество ячеек на третьем уровне $i=3$ равно основных $W_{31}=3=i$ и дополнительных $W_{32}=2=i-1$. Далее выполним доказательство по индукции, предположим, что количество основных и дополнительных ячеек на уровне i равняется $W_{il}=i$, $W_{i2}=i-1$. Подсчитаем количество ячеек на уровне $(i+1)$. По построению треугольной решетки на каждом последующем уровне добавляются одна основная и

одна дополнительная ячейки, тогда $W_{(i+1)1}=W_{il}+1=i+1$, $W_{(i+1)2}=W_{i2}+1=i+1-1=i$. Тогда общее число основных и дополнительных ячеек (4) в решетке с k уровнями равняется:

$$\begin{aligned} S_{k1} &= \sum_{i=1}^k W_{il} = \sum_{i=1}^k (i) = \frac{k \cdot (k+1)}{2}, \\ S_{k2} &= \sum_{i=1}^k W_{i2} = \sum_{i=1}^k (i-1) = \sum_{i=1}^k i - k = \frac{k \cdot (k-1)}{2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для описания композиции решетки занумеруем порты двух указанных типов ячеек: основной и дополнительной в соответствии с рис. 1 и [5, 12]. При такой нумерации портов в композиции соседних ячеек всегда соединяется пара портов с одинаковыми номерами. Таким образом, для формального описания композиции необходимо указать индексы соседних узлов произвольного заданного узла решетки $R^{i,j}$.

Если j нечетное ($j \bmod 2 \neq 0$), то это текущий узел основного типа, он может иметь соседей справа, снизу, слева. Если j четное ($j \bmod 2 = 0$), то текущий узел дополнительного типа и может иметь соседей справа, слева, сверху.

Итак, для ячейки $R^{i,j}$ ($j \bmod 2 \neq 0$) соседними ячейками являются $R^{i,j-1}$, $R^{i,j+1}$, $R^{i+1,j+1}$, все до-

полнительного типа. Для ячейки $R^{i,j}$ ($j \bmod 2 = 0$) соседними ячейками являются $R^{i,j-1}$, $R^{i,j+1}$, $R^{i-1,j-1}$, все основного типа. Заметим, что в случае $i-1 < 1$, $j-1 < 1$, $i+1 > k$, $j+1 > k$ соответствующие соседние ячейки отсутствуют; возможно, лишь при соединение терминальных ячеек на границах.

Заметим, что в треугольной решетке достаточно лишь использование имен контактных позиций узлов основного типа, поскольку они окружают узлы дополнительного типа. Таким образом, мы избегает двойной нумерации позиций, которые объединяются при образовании решетки. Кроме того, на границах решетки находятся только узлы основного типа. Описание композиции (5) открытой треугольной решетки размера k :

$$\left\{ \begin{array}{l} pi_1^{i,j} := pi_1^{i,j} \cup po_1^{i,j-1}, \\ pil_1^{i,j} := pil_1^{i,j} \cup pol_1^{i,j-1}, \\ po_1^{i,j} := po_1^{i,j} \cup pil_1^{i,j-1}, \\ pol_1^{i,j} := pol_1^{i,j} \cup pil_1^{i,j-1}, j > 1; \\ pi_2^{i,j} := pi_2^{i,j} \cup po_2^{i,j+1}, \\ pil_2^{i,j} := pil_2^{i,j} \cup pol_2^{i,j+1}, \\ po_2^{i,j} := po_2^{i,j} \cup pil_2^{i,j+1}, \\ pol_2^{i,j} := pol_2^{i,j} \cup pil_2^{i,j+1}, j < W_i; \\ pi_3^{i,j} := pi_3^{i,j} \cup po_3^{i+1,j+1}, \\ pil_3^{i,j} := pil_3^{i,j} \cup pol_3^{i+1,j+1}, \\ po_3^{i,j} := po_3^{i,j} \cup pil_3^{i+1,j+1}, \\ pol_3^{i,j} := pol_3^{i,j} \cup pil_3^{i+1,j+1}, i < k \\ i = \overline{1, k}, j = \overline{1, W_i}, j \bmod 2 \neq 0 \end{array} \right\}. \quad (5)$$

В представленном описании (5) не используются функции, возвращающие значение индекса для соседнего устройства или номер соседнего порта, не требуются специальные соглашения по именованию позиций портов в отличии от [5].

Построим прямое параметрическое представление треугольной решетки. На основании композиции решетки (5) прямое параметрическое представление открытой треугольной решетки размера имеет вид (6).

Для структурного анализа модели решетки в форме сети Петри и исследования свойств модели идеального телекоммуникационного протокола добавим в модель терминальные устройства [8], которые выполняют простейшую обработку сообщений. Прямое параметрическое представление закрытой треугольной решетки размера k состоит из представления (6) к которому добавлено параметрическое описание терминальных устройств (7).

$$\left(\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} (to_u^{i,j} : pol_u^{i,j}, pb_u^{i,j} \rightarrow po_u^{i,j}, pbl^{i,j}), \\ (ti_{u,v}^{i,j} : pi_u^{i,j}, pbl^{i,j} \rightarrow pb_v^{i,j}, pil_u^{i,j}), \\ v = 1, 3, v \neq u \end{array} \right), \\ u = \overline{1, 3}, j \bmod 2 \neq 0 \\ \left(\begin{array}{l} (to_1^{i,j} : pil_1^{i,j+1}, pb_1^{i,j} \rightarrow pi_1^{i,j+1}, pbl^{i,j}), \\ (ti_{1,v}^{i,j} : po_1^{i,j+1}, pbl^{i,j} \rightarrow pb_v^{i,j}, pol_1^{i,j+1}), \\ v = 1, 3, v \neq 1, \\ (to_2^{i,j} : pil_2^{i,j-1}, pb_2^{i,j} \rightarrow pi_2^{i,j-1}, pbl^{i,j}), \\ (ti_{2,v}^{i,j} : po_2^{i,j-1}, pbl^{i,j} \rightarrow pb_v^{i,j}, pol_2^{i,j-1}), \\ v = 1, 3, v \neq 2, \\ (to_3^{i,j} : pil_3^{i-1,j-1}, pb_3^{i,j} \rightarrow \\ pi_3^{i-1,j-1}, pbl^{i,j}), \\ (ti_{3,v}^{i,j} : po_3^{i-1,j-1}, pbl^{i,j} \rightarrow \\ pb_v^{i,j}, pol_3^{i-1,j-1}), \\ v = 1, 3, v \neq 3 \\ j \bmod 2 = 0 \\ i = \overline{1, k}, j = \overline{1, W_i} \end{array} \right) \end{array} \right). \quad (6)$$

На рис. 2 представлены модели узлов треугольной решетки в форме сети Петри. Графические изображения модели основного узла с терминальными переходами показано на рис. 2а; модели дополнительного узла на рис. 2б.

$$\left(\begin{array}{l} (t^{i+1,j} : po_3^{k,j}, pil_3^{k,j} \rightarrow pol_3^{k,j}, pi_3^{k,j}), \\ j = \overline{1, W_i}, j \bmod 2 \neq 0; \\ \left(\begin{array}{l} (t^{i,0} : po_1^{i,j}, pil_1^{i,j} \rightarrow pol_1^{i,j}, pi_1^{i,j}), j = 1, \\ (t^{i,W_i+1} : po_2^{i,j}, pil_2^{i,j} \rightarrow pol_2^{i,j}, pi_2^{i,j}), j = W_i \end{array} \right), \\ i = \overline{1, k} \end{array} \right). \quad (7)$$

Прямое параметрическое представление используется для расчета инвариантов переходов (ρ -инвариантов) сети Петри и нахождения свойств ограниченности и консервативности.

Построим двойственное параметрическое представление [5, 7] треугольной решетки в форме бесконечных сетей Петри с регулярной структурой, по модели узла и правилам композиции решетки. Двойственное параметрическое представление используется для расчета t -инвариантов (или инвариантов переходов) сети Петри и нахождения свойства стационарной повторяемости. Описание состоит из строк следующего вида:

$$p_j : tin_{i_k} * atin_{i_k} \dots \rightarrow tout_{i_l} * atout_{i_l} \dots; indices_range,$$

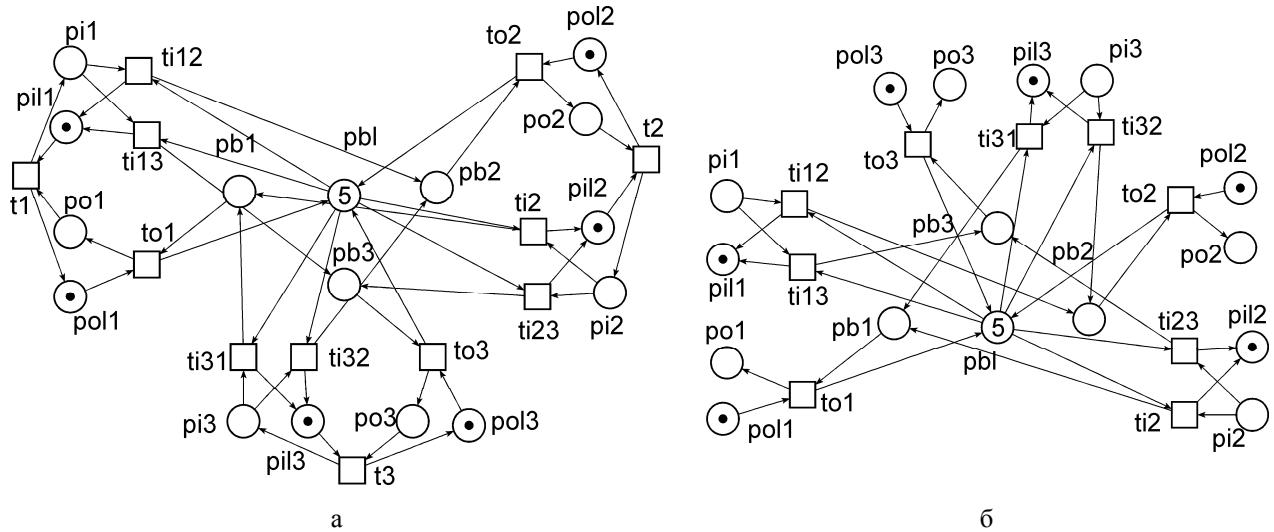


Рисунок 2 – Модели узлов треугольної решетки:
 а – основний узел с терминалными переходами; б – дополнительный

где p_j – описываемая позиция; tin_{i_k} – ее входные переходы; $tout_{i_l}$ – ее выходные переходы; величины $atin_{i_k}, atout_{i_l}$ определяют кратность соответствующих дуг; $indices_range$ – диапазон изменения индексов; если вес дуги равен единице, то величины не указываются и такая сеть называется ординарной сетью Петри.

Двойственное параметрическое описание замкнутого узла основного типа, представленного на рис. 2а, треугольной решетки имеет форму (8):

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} po_u : to_u \rightarrow t^u \\ pol_u : t^u \rightarrow to_u \\ pi_u : t^u \rightarrow (ti_{u,v}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \\ pil_u : (ti_{u,v}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \rightarrow t^u \\ pb_u : (ti_{v,u}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \rightarrow to_u \end{array} \right) \\ u = \overline{1,3} \\ \left(\begin{array}{l} pbl : (to_u, u = \overline{1,3}) \rightarrow \left(\begin{array}{l} (ti_{v,u}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \\ u = \overline{1,3} \end{array} \right) \end{array} \right) \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Представление (8) является также спецификацией решетки при $k=1$, где t^u граничные переходы, индекс u – это номер текущего порта узла, индекс v – номер порта назначения для передачи пакетов в сети. Опишем двойственное параметрическое представление замкнутой треугольной решетки, показанной на рис. 1а, используя последовательность выражений (9)–(13). В (9) показано представление всех внутренних дополнительных и основных узлов решетки:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} (pb_u^{i,j} : (ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \rightarrow to_u^{i,j}) \\ u = \overline{1,3} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} (pbl^{i,j} : (to_u^{i,j}, u = \overline{1,3}) \rightarrow \left(\begin{array}{l} (ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \\ u = \overline{1,3} \end{array} \right)) \end{array} \right) \\ i = \overline{2,k}, j \bmod 2 = 0, j = \overline{2, W_i - 1} \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} (po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow (ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3})) \\ (pol_1^{i,j} : (ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3}) \rightarrow to_1^{i,j}) \\ (pi_1^{i,j} : to_1^{i,j-1} \rightarrow (ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3})) \\ (pil_1^{i,j} : (ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3}) \rightarrow to_1^{i,j-1}) \\ (po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow (ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2)) \\ (pol_2^{i,j} : (ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2) \rightarrow to_2^{i,j}) \\ (pi_2^{i,j} : to_2^{i,j+1} \rightarrow (ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2)) \\ (pil_2^{i,j} : (ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2) \rightarrow to_2^{i,j+1}) \\ (po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow (ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2})) \\ (pol_3^{i,j} : (ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2}) \rightarrow to_3^{i,j}) \\ (pi_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow (ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2})) \\ (pil_3^{i,j} : (ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2}) \rightarrow to_3^{i+1,j+1}) \\ (pb_u^{i,j} : (ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \rightarrow to_u^{i,j}) \\ (pbl^{i,j} : (to_u^{i,j}, u = \overline{1,3}) \rightarrow \left(\begin{array}{l} (ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u) \\ u = \overline{1,3} \end{array} \right)) \end{array} \right) \\ i = \overline{3,k-1}, j \bmod 2 \neq 0, j = \overline{3, W_i - 2} \end{array} \right\} \quad (9)$$

Левые основные граничные узлы (10) без узлов первого и последнего уровня:

$$\left(\begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : to_2^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,32} \right) \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : to_3^{i+1,j+1} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow to_3^{i+1,j+1} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j} \right) u = \overline{1,3}, \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = \overline{2, k-1}, j = 1 \end{array} \right) \quad (10)$$

Правые основного типа граничные узлы (11) без узлов первого и последнего уровня:

$$\left(\begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : to_1^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,32} \right) \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : to_3^{i+1,j+1} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow to_3^{i+1,j+1} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j} \right) u = \overline{1,3}, \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = \overline{2, k-1}, j = W_i \end{array} \right) \quad (11)$$

Основные узлы решетки k -го уровня (12) без первого и последнего элементов:

$$\left(\begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : to_1^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : to_2^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j} \right) u = \overline{1,3}, \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = k, j \bmod 2 \neq 0, j = \overline{3, W_i - 2} \end{array} \right) \quad (12)$$

Три вершины треугольной решетки (13), которым соответствуют узлы с индексами (1,1) – описание (13.1), ($k, 1$) – описание (13.2), (k, W_k) – описание (13.3):

$$\left(\begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i+1,j+1}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : to_3^{i+1,j+1} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow to_3^{i+1,j+1} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j} \right) u = \overline{1,3}, \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = 1, j = 1 \end{array} \right) \quad (13.1)$$

Узел с індексами $(k, 1) - (13.2)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : t^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow t^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j+1}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : to_2^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow to_2^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = k, j = 1 \end{array} \right\}, \quad (13.2)$$

Узел с індексами $(k, W_k) - (13.3)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(po_1^{i,j} : to_1^{i,j} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pol_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j-1}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j} \right) \\ \left(pi_1^{i,j} : to_1^{i,j-1} \rightarrow \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \right) \\ \left(pil_1^{i,j} : \left(ti_{1,v}^{i,j}, v = \overline{2,3} \right) \rightarrow to_1^{i,j-1} \right) \\ \left(po_2^{i,j} : to_2^{i,j} \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(pol_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow to_2^{i,j} \right) \\ \left(pi_2^{i,j} : t^{i,j+1} \rightarrow \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \right) \\ \left(pil_2^{i,j} : \left(ti_{2,v}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq 2 \right) \rightarrow t^{i,j+1} \right) \\ \left(po_3^{i,j} : to_3^{i,j} \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pol_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow to_3^{i,j} \right) \\ \left(pi_3^{i,j} : t^{i+1,j} \rightarrow \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \right) \\ \left(pil_3^{i,j} : \left(ti_{3,v}^{i,j}, v = \overline{1,2} \right) \rightarrow t^{i+1,j} \right) \\ \left(pb_u^{i,j} : \left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) \rightarrow to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \\ \left(pbl_u^{i,j} : \left(to_u^{i,j}, u = \overline{1,3} \right) \rightarrow \right. \\ \left. \left(\left(ti_{v,u}^{i,j}, v = \overline{1,3}, v \neq u \right) u = \overline{1,3} \right) \right) \\ i = k, j = W_i \end{array} \right\}, \quad (13.3)$$

Параметрическі описання (9)-(13) можуть бути агреговані в одне загальне описание, з введением і використанням додаткових внутрішніх параметрів, але таке ускладнене описание лишає естественості форми представлення.

Для обчислення інваріантів позицій або p -інваріантів використовується пряме параметрическе представлення решетки та правило [9] по якому кожному рівнянню відповідає переход з параметрического представлення, рівняння містить рівні сумми для його входящих і исходящих дуг. Загальне представлення рівняння має наступний вигляд:

$$-apin_{j_k} \cdot xpin_{j_k} - \dots + apout_{j_l} \cdot xport_{j_l} + \dots = 0;$$

$indices_range$,

де $xpin_{j_k}, xport_{j_l}$ – невідомі величини, соответствуючі позиціям Петри; величини $apin_{j_k}, apout_{j_l}$ визначають кратність відповідних дуг, якщо кратність дуги дорівнює одиниці, то величини не вказуються; $indices_range$ – діапазон змінних індексів. Система (14) для обчислення p -інваріантів для (6) показана в параметрическом виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} xpol_u^{i,j} + xpb_u^{i,j} - pxo_u^{i,j} - xpb^{i,j} = 0, \\ xpi_u^{i,j} + xpb^{i,j} - pxo_v^{i,j} - xpol_v^{i,j} = 0, \\ v = 1,3, v \neq u \end{array} \right) \\ u = \overline{1,3}, j \bmod 2 \neq 0 \\ \left(\begin{array}{l} xpil_1^{i,j+1} + xpb_1^{i,j} - xpi_1^{i,j+1} - xpb^{i,j} = 0, \\ xpo_1^{i,j+1} + xpb^{i,j} - xpb_v^{i,j} - xpol_1^{i,j+1} = 0, \\ v = 1,3, v \neq 1, \\ xpil_2^{i,j-1} + xpb_2^{i,j} - xpi_2^{i,j-1} - xpb^{i,j} = 0, \\ xpo_2^{i,j-1} + xpb^{i,j} - xpb_v^{i,j} - xpol_2^{i,j-1} = 0, \\ v = 1,3, v \neq 2, \\ xpil_3^{i-1,j-1} + xpb_3^{i,j} - xpi_3^{i-1,j-1} - xpb^{i,j} = 0, \\ xpo_3^{i-1,j-1} + xpb^{i,j} - xpb_v^{i,j} - xpol_3^{i-1,j-1} = 0, \\ v = 1,3, v \neq 3 \end{array} \right) \\ j \bmod 2 = 0 \\ i = 1, k, j = \overline{1, W_i} \end{array} \right\} \quad (14)$$

Для відкритої трикутної решетки розміру k розв'язання (15) системи (14) отримано в параметрическом виде.

Кожна строка (15) є розв'язком системи (14), доказування цього твердження аналогично приведенному в [4, 6] для прямокутної решетки будь-якого розміру. Тоді сеть Петри є p -інваріантною і, слідовательно, обладає властивостями консервативності та обмеженості для будь-якого натурального числа k .

$$\left. \begin{array}{l} ((pi_u^{i,j}, pil_u^{i,j}), u = \overline{1,3}, i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}, \\ j \bmod 2 \neq 0; \\ (po_u^{i,j}, pol_u^{i,j}), u = \overline{1,3}, i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}, \\ j \bmod 2 \neq 0; \\ (pb_1^{i,j}, pb_2^{i,j}, pb_3^{i,j}, pbl^{i,j}), i = \overline{1,k}, \\ j = \overline{1,W_i}; \\ (((pb_1^{i,j}, pb_2^{i,j}, pb_3^{i,j}), i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}), \\ ((pil_u^{i,j}, pol_u^{i,j}), u = \overline{1,3}, i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}, \\ j \bmod 2 \neq 0)); \\ (((pbl^{i,j}), i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}), \\ ((pil_u^{i,j}, pol_u^{i,j}), u = \overline{1,3}, i = \overline{1,k}, j = \overline{1,W_i}, \\ j \bmod 2 \neq 0)); \end{array} \right\} \quad (15)$$

Лемма 1: в любой маркировке μ сети Петри максимальное количество фишек p_{max} в одной позиции pb_u , описывающей буфер коммутатора, и в ограничителе буфера коммутатора позиции pbl равно:

$$p_{max} = b_0 + p_{10} + p_{20} + p_{30},$$

где p_{10}, p_{20}, p_{30} – количество фишек в позициях pb_u ($u = \overline{1,3}$) одного узла при начальной маркировке μ_0 , b_0 – количество фишек в позиции pbl этого же узла при начальной маркировке.

Доказательство. Позиции pb_u и pbl одного узла являются комплементарными. Тогда максимальное количество фишек в позиции pbl равно $b_0 + p_{10}$, и $pbl = 0$; максимальное количество фишек в позиции pbl равно $(b_0 + p_{10}) + p_{20}$, и $pbl = 0$, при $pbl = 0$; максимальное количество фишек в позиции pbl равно $((b_0 + p_{10}) + p_{20}) + p_{30}$, и $pbl = 0$, при $pbl = 0, p_{20} = 0$.

Лемма 2: максимальное количество фишек в любой маркировке равно:

$$N_{max} = 6 \cdot S_{k1} + p_{max} \cdot S_k.$$

Доказательство. Так как сеть строго консервативна, то количество фишек в любой маркировке μ равно количеству фишек в начальной маркировке μ_0 . Количество фишек в начальной маркировке μ_0 равно сумме: количества фишек в ограничителях портов, умноженных на количество основных узлов, и количества всех узлов решетки умноженных, на максимальный размер ограничителя буфера коммутатора.

Лемма 3: количество позиций в бесконечной треугольной решетке размера k равно:

$$N_p = 10k^2 + 6k.$$

Доказательство. По построению треугольной решетки количество позиций в узле основного типа 16 (три порта по четыре позиции и четыре позиции, описывающие буфер), в узле дополнительного типа 4 позиции. Количество ячеек основного типа S_{k1} , дополнительного S_{k2} , тогда количество позиций равно:

$$\begin{aligned} N_p &= 16 \cdot \frac{k \cdot (k+1)}{2} + 4 \cdot \frac{k \cdot (k-1)}{2} = 8k \cdot (k+1) + 2k \cdot (k-1) = \\ &= 10k^2 + 6k. \end{aligned}$$

Лемма 4: количество переходов в бесконечной треугольной решетке размера k равно:

$$N_t = 9k^2 + 3k.$$

Доказательство. По построению треугольной решетки количество переходов в узле любого типа равно 9, всего количество узлов S_k . Количество ячеек основного типа, к которым присоединяют терминальные переходы, на k -м уровне равно W_{k1} , всего сторон три, тогда количество переходов равно:

$$N_t = 9S_k + 3W_{k1} = 9k^2 + 3k.$$

Лемма 5: количество дуг в бесконечной треугольной решетке размера k равно:

$$N_{arc} = 36k^2 + 12k.$$

Доказательство. По построению треугольной решетки количество дуг в узле любого типа 36 (три порта в каждом 12 дуг), всего количество узлов S_k . Количество дуг для присоединения терминального перехода четыре, ячеек основного типа, к которым присоединяют терминальные переходы, на k -м уровне равно W_{k1} , всего сторон три, тогда количество дуг равно:

$$N_{arc} = 3 \cdot 12S_k + 3 \cdot 4W_{k1} = 36S_k + 12W_{k1} = 36k^2 + 12k.$$

Подсчитанные характеристики размера модели (количество узлов, позиций, переходов и дуг) являются вспомогательными и используются в дальнейших доказательствах вычислительной сложности методов. Также, полученные результаты учитывались в ходе тестирования моделей, методически дополнившего теоретические исследования.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для построения модели треугольной коммуникационной решетки произвольного размера предложено использовать программный генератор решеток [11, 12]. При генерации моделей решеток используется прямое параметрическое описание сети Петри, учитываются характеристики модели: размер решетки, емкость буфера коммутатора и количество сообщений в каждом буфере коммутатора. Программный генератор моделей Петри [12] написан на алгоритмическом языке Си, тип выходного формата формируемого файла представлен в графическом формате моделирующей системы Tina [10]. С помощью моделирующей системы Tina выполняется верификация протоколов треугольных коммуникационных решеток, представленных в форме сетей Петри, вычисляется статистическая информация (количество позиций, переходов, дуг в решетке размера k).

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты проведенных экспериментов представлены в табл. 1, изучены и проверены в [13] для разных значений параметров решетки: k – размер решетки, b – емкость буфера коммутатора, p – количество сообщений в каждом буфере коммутатора.

Полученные значения статистических характеристик моделей треугольной коммуникационной решетки совпали со значениями, полученными при исследовании свойств моделей с помощью моделирующей системы Tina [10].

Таблица 1 – Характеристики моделей треугольной коммуникационной решетки

Параметры решетки	Количество позиций	Количество переходов	Количество дуг	Макс кол-во фишек в позиции	Макс кол-во фишек в маркировке
$k = 1, p = 20, b = 0$	16	12	48	60	66
$k = 1, p = 50, b = 0$	16	12	48	150	156
$k = 3, p = 1, b = 1$	108	90	360	4	72
$k = 3, p = 2, b = 6$	108	90	360	12	144
$k = 5, p = 2, b = 0$	280	240	960	6	240
$k = 5, p = 4, b = 6$	280	240	960	18	540

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенные правила композиции треугольной решетки позволили построить прямое и двойственное параметрические представления треугольной коммуникационной решетки произвольного размера, оценить статистические характеристики моделей.

Как видно из табл. 1, количество позиций, переходов и дуг для решеток одного размера одинаково. Максимальное количество фишек в позиции и в маркировке разное, в зависимости от значений емкости буфера коммутатора и количества сообщений в каждом буфере.

Прямое параметрическое представление применено для вычисления инвариантов позиций и анализа свойств моделей треугольных коммутационных решеток в форме бесконечных сетей Петри с регулярной структурой. Показано, что построенная модель в форме сети Петри консервативна и ограничена. Как подтверждение достоверности полученных результатов рассматривается следующий факт: при подстановке конкретных размеров сетей в параметрическое решение (15), базисы совпадают с результатами вычислений системы Tina.

Двойственное параметрическое представление используется для нахождения свойства стационарной повторяемости, что является направлением дальнейших исследований.

ВЫВОДЫ

В работе рассмотрена актуальная задача верификации протоколов треугольных коммуникационных решеток бесконечными сетями Петри. Модель идеального телекоммуникационного протокола должна быть p - и t -инвариантной, и, следовательно, обладать свойствами консервативности и стационарной повторяемости.

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые предложены двойственное и прямое параметрические представления моделей треугольных коммуникационных решеток. На основе прямого параметрического представления проведен расчет и анализ инвариантов позиций, сделан вывод о корректности протоколов коммуникационной решетки произвольного размера. Предложены правила композиции треугольных решеток, на основании которых получены формулы для оценки статистических характеристик моделей треугольной коммуникационной решетки.

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанное программное обеспечение генерирует модель треугольной решетки произвольного размера для дальнейшей верификации с помощью известных моделирующих систем и программно-аппаратной реализации. Модели протестированы, апробированы и приняты в архив моделей сетей Петри.

Перспектива дальнейших исследований состоит в применении двойственного параметрического описания бесконечных сетей Петри с регулярной структурой для композиции бесконечных систем и вычисления t -инвариантов на примере модели замкнутой треугольной решетки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в продолжении словацко-украинской научно-исследовательской работы «Верификация сложных сетевых протоколов» (номер гранта ICS.NUKR.CLG 982698). Автор выражает благодарность проф. Вольфраму С. за организацию серии публикаций по бесконечным сетям Петри, проф. Кордону Ф. за тестирование моделей и полезное обсуждение результатов работы.

ЛИТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Телекоммуникационные системы и сети: Учебное пособие. В 3-х томах / [Под ред. профессора В. П. Шувалова]. – М. : Горячая линия – Телеком. – Т. 2: Радиосвязь, радиовещание, телевидение / [Катунин Г. П., Мамчев Г. В., Носов В. И., Шувалов В. П.]; 4-е издание, переработанное и дополненное, 2017. – 564 с. ISBN 978-5-9912-0494-1
2. Zaitsev D. A. Clans of Petri Nets: Verification of protocols and performance evaluation of networks / D. A. Zaitsev. – LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 292 p. ISBN-13: 978-3-659-42228-7
3. Grid and Cloud Computing: Concepts, Methodologies, Tools and Applications / [Information Resources Management Association (USA)]. – IGI-Globa, 2012. – 2134 p. DOI: 10.4018/978-1-4666-0879-5
4. Сети телевизионного и звукового ОВЧ ЧМ вещания / [М. Г. Локшин, А. А. Шур, А. В. Кокорев, Р. А. Краснощеков]. – М : Радио и связь, 1988. – 144 с.
5. Zaitsev D. A. Infinite Petri Nets: Infinite Petri Nets: Part 2, Modeling Triangular, Hexagonal, Hypercube and Hypertorus Structures / D. A. Zaitsev, I. D. Zaitsev, T. R. Shmeleva // Complex Systems. – 2017. – Vol. 26, № 4. – P. 341–371. DOI: 10.25088/ComplexSystems. 26.4.341
6. Галкин В. А. Цифровая мобильная радиосвязь: учеб. пособ. для вузов / В. А. Галкин: [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2012. – 592 с.

7. Zaitsev D. A. Infinite Petri Nets: Part 1, Modeling Square Grid Structures / D. A. Zaitsev, I. D. Zaitsev, T. R. Shmeleva // Complex Systems. – 2017. – Vol. 26, № 2. – P. 157–195. DOI: 10.25088/ComplexSystems.26.2.157
8. Zaitsev D.A. Verification of Computing Grids with Special Edge Conditions by Infinite Petri Nets / D. A. Zaitsev // Automatic Control and Computer Sciences. – 2013. – Vol. 47, Issue 7. – P. 403–412. DOI: 10.3103/S0146411613070262
9. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications / T. Murata // Proceedings of the IEEE, 1989. – Vol. 77, Issue 4. – P. 541–580. DOI: 10.1109/5.24143
10. Berthomieu B. The Tool TINA: Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets / B. Berthomieu, P.-O. Ribet, F. Vernadat // International Journal of Production Research. – 2004. – Vol. 42, № 14. – P. 2741–2756. DOI: 10.1080/00207540412331312688
11. Zaitsev D. A. Infinite Petri Nets: Part 2, Modeling Triangular, Hexagonal, Hypercube and Hypertorus Structures / D. A. Zaitsev, I. D. Zaitsev, T. R. Shmeleva // Complex Systems. – 2017. – Vol. 26, № 4. – P. 341–371. DOI: 10.25088/ComplexSystems.26.4.341
12. Шмелева Т.Р. Программный генератор моделей Петри треугольных коммуникационных решеток / Т. Р. Шмелева // Сборник научных трудов ОНAC им. А. С. Попова. – 2016. – № 1. – С. 82–89.
13. Shmeleva T. TriangularGrid [Models for the MCC'2016] / T. Shmeleva // Model Checking Contest @ Petri Nets 2016, 6th edition, Torun, Poland, June 21 2016. – Torun, 2016.

Стаття поступила в редакцію 06.02.2018.
После доработки 29.08.2018.

УДК 621.39, 004.7

ВЕРИФІКАЦІЯ ПРОТОКОЛІВ ТРИКУТНИХ КОМУНІКАЦІЙНИХ ГРАТОК НЕСКІНЧЕННИМИ СІТКАМИ ПЕТРІ

Шмелєва Т. Р. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комутаційних систем Одеської національної академії зв’язку ім. О.С. Попова, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Обчислювальні та комунікаційні гратки є потужним засобом підвищення продуктивності і якості обслуговування сучасних мереж. У двовимірних гратках основними формами осередку є трикутник, чотирикутник і шестикутник. Трикутні гратки застосовуються при вирішенні краївих задач з трикутними кінцевими елементами, в системах радіомовлення і телебачення. Найбільш прості та ефективні способи реалізації граток можуть володіти скованими дефектами і уразливостями з точки зору безпечної обміну інформацією. Таким чином, верифікація граток є актуальним завданням. Мета роботи – побудова моделей трикутних комунікаційних граток в формі нескінчених сітей Петрі та дослідження їх властивостей, для доказу коректності (верифікації) протоколів.

Метод. Методи досліджень базуються на основних положеннях теорії графів, лінійної алгебри, теоретичних основах сітей Петрі, математичного та імітаційного моделювання.

Результати. Побудовано параметричний опис трикутної комунікаційної гратки на площині в прямій і двоістій формі. Вузол комутації реалізує повнодуплексний режим роботи та буферизацію пакетів з обмеженим розміром внутрішнього буфера. Отримано аналітичні вирази для оцінки числа компонентів моделі. Рішення нескінчених систем лінійних рівнянь в параметричній формі дозволило довести інваріантність моделі довільного розміру. Інваріантність є одною з основних властивостей моделі ідеального протоколу, що визначає безпеку роботи мережі. Практична значимість отриманих результатів полягає в побудові схем безпечних граток для подальшої програмної і апаратної реалізації, що офіційно підтверджено включенням моделей трикутних граток в архів моделей сітей Петрі Лабораторії Інформатики університету Париж 6.

Висновки. Вперше побудована математична модель трикутних комунікаційних граток з регулярною структурою довільного розміру в формі нескінчених сітей Петрі для верифікації протоколів передачі інформації в гратках. Застосування методики для верифікації трикутних комунікаційних структур дозволяє виконати подальший розвиток теорії нескінчених сітей Петрі для побудови та дослідження моделей довільних граток з регулярною структурою.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: обчислювальні гратки, трикутна комунікаційна структура, нескінченна сіть Петрі, параметричне представлення, лінійний інваріант, верифікація протоколів.

UDC 621.39, 004.7

VERIFICATION OF THE TRIANGULAR COMMUNICATION GRIDS PROTOCOLS BY INFINITE PETRI NETS

Shmeleva T. R. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of Switched System department, A. S. Popov National Academy of Telecommunications, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Computing and communication grids are a powerful means of increasing the performance and quality of service of modern networks. In two-dimensional grids the basic cell forms are a triangle, a square, and a hexagon. Triangular grids are used in solving boundary value problems with triangular finite elements, in broadcasting systems and in television. The simplest and most efficient implementations of grids can possess hidden defects and vulnerabilities in terms of secure information exchange. Thus, the verification of grids is an urgent task.

Objective. The goal of the paper is to construct the models of triangular communication grids in the form of infinite Petri nets and to investigate their properties for proving the protocols (verification) correctness.

Method. Research methods are based on the basics of graph theory, linear algebra, the theoretical foundations of Petri nets, mathematical modeling and simulation.

Results. A parametric description of the triangular communication grid on the plane, in a direct and a dual form, is constructed. The switching node implements full-duplex transmission and buffering of packets with a limited capacity of the internal buffer. Analytic expressions are obtained for estimating the number of model components. Solving infinite systems of linear equations in parametric form allowed us to prove the invariance of a model of arbitrary size. Invariance is one of the basic properties of the ideal protocol model which determines the safety of the network. The practical significance of the results obtained lies in the construction of safe grid schemes for further software and hardware implementation, which is officially confirmed by the inclusion of triangular grid models in the archive of Petri net models of the University Paris 6 Informatics Laboratory.

Conclusions. For the first time, a mathematical model of triangular communication grids with a regular structure and an arbitrary size in the form of infinite Petri nets was constructed for verification of information transmit protocols in grids. The application of the technique for verification of triangular communication structures allows the further development of the infinite Petri nets theory for constructing and investigating models of arbitrary grids with a regular structure.

KEYWORDS: computing grids, triangular communication structure, infinite Petri net, parametric specification, linear invariant, verification of protocols.

REFERENCES

1. Katunin G. P., Mamchev G. V., Nosov V. I., Shuvalov V.P. Telekommunikatsionnye sistemy i seti : Uchebnoye posobiye. V 3-kh tomakh. Pod red. professora V. P. Shuvalova. Moscow, Goryachaya liniya. Telekom. Vol. 2: Radiosvyaz', radioveshchaniye, televideniye; 4-ye izdaniye, pererabotannoye i dopolnennoye, 2017, 564 p. ISBN 978-5-9912-0494-1
2. Zaitsev D. A. Clans of Petri Nets: Verification of protocols and performance evaluation of networks, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013, 292 p. ISBN-13: 978-3-659-42228-7
3. Grid and Cloud Computing: Concepts, Methodologies, Tools and Applications (4 Vol.), Information Resources Management Association (USA), IGI-Global, 2012, 2134 p. DOI: 10.4018/978-1-4666-0879-5
4. Lokshin M. G., Shur A. A., Kokorev A. V., Krasnoshchekov R. A. Seti televizionnogo i zvukovogo OVCH CHM veshchaniya. Moscow, Radio i svyaz', 1988, 144 p.
5. Zaitsev D. A., Zaitsev I. D., Shmeleva T. R. Infinite Petri Nets: Part 2, Modeling Triangular, Hexagonal, Hypercube and Hypertorus Structures, *Complex Systems*, 2017, Vol. 26, No. 4, pp. 341–371. DOI: 10.25088/ComplexSystems.26.4.341
6. Galkin V. A. Tsifrovaya mobil'naya radiosvyaz': ucheb. posob. dlya vuzov: [2-ye izd., pererab. i dop.]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2012, 592 p.
7. Zaitsev D. A., Zaitsev I. D., Shmeleva T. R. Infinite Petri Nets: Part 1, Modeling Square Grid Structures, *Complex Systems*, 2017, Vol. 26, No. 2, pp. 157–195. DOI: 10.25088/ComplexSystems.26.2.157
8. Zaitsev D.A. Verification of Computing Grids with Special Edge Conditions by Infinite Petri Nets, *Automatic Control and Computer Sciences*, 2013, Vol. 47, Issue 7, pp. 403–412. DOI: 10.3103/S0146411613070262
9. Murata T. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, *Proceedings of the IEEE*, 1989, Vol. 77, Issue 4, pp. 541–580. DOI: 10.1109/5.24143
10. Berthomieu B., Ribet P.-O. and Vernadat F. The Tool TINA: Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets, *International Journal of Production Research*, 2004, Vol. 42, No. 14, pp. 2741–2756. DOI: 10.1080/00207540412331312688
11. Zaitsev D. A., Zaitsev I. D., Shmeleva T. R. Infinite Petri Nets: Part 2, Modeling Triangular, Hexagonal, Hypercube and Hypertorus Structures, *Complex Systems*, 2017, Vol. 26, No. 4, pp. 341–371. DOI: 10.25088/ComplexSystems.26.4.341
12. Shmeleva T. R. Programmnyy generator modeley Petri treugol'nykh kommunikatsionnykh reshetok, *Sbornik nauchnykh trudov ONAS im. A.S. Popova*, 2016, No. 1, pp. 82–89.
13. Shmeleva T. TriangularGrid. Models for the MCC'2016. Model Checking Contest @ Petri Nets 2016, 6th edition. Torun, Poland, June 21, 2016.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING

UDC 517.968.22

ON THE ANALYTICAL SOLUTION OF A VOLTERRA INTEGRAL EQUATION FOR INVESTIGATION OF FRACTAL PROCESSES

Gorev V. N. – PhD, Assistant Lecturer of the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine.

Gusev A. Yu. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine.

Korniienko V. I. – Doctor of Science, Associate Professor, Head of the Department of Information Security and Telecommunications, National Technical University Dnipro Polytechnic, Dnipro, Ukraine.

ABSTRACT

Context. We consider a Volterra integral equation of the first kind which may be applied to the data filtration and forecast of fractal random processes, for example, in information-telecommunication systems and in control of complex technological processes.

Objective. The aim of the work is to obtain an exact analytical solution to a Volterra integral equation of the first kind. The kernel of the corresponding integral equation is the correlation function of a fractal random process with a power-law structure function.

Method. The Volterra integral equation of the first kind is solved with the help of the standard Laplace transform method. The inverse Laplace transform leads to the calculation of the line integral of the function of complex variable. This integral is calculated as a sum of a residue part and integrals over the banks of cut. The corresponding integrals are obtained on the basis of the known expansions of special functions.

Results. We obtained an exact analytical solution of the Volterra integral equation the kernel of which is the correlation function of a fractal random process. The paper is based on a model where the structure function of the corresponding process is a power-law function. It is shown that the part of the solution that does not contain delta-function is convergent at any point if the Hurst exponent is larger than 0.5, i.e. if the process has fractal properties. It is shown that the obtained solution is a real-valued function. The obtained solution is verified numerically; it is also shown that our solution gives the correct asymptotic behavior. Although the solution contains an exponentially growing function of time, at large times the integral of the obtained solution asymptotically behaves as a power-law function.

Conclusions. It is important to stress that we obtained an exact solution of the Volterra integral equation under consideration rather than an approximate one. The obtained solution may be applied to the data filtration and forecast of fractal random processes. As is known, fractal processes take place in a huge variety of different systems, so the results of this paper may have a wide field of application.

KEYWORDS: Volterra equation of the first kind, Hurst exponent, Laplace transform, fractal process, exact analytical solution.

NOMENCLATURE

$c(t)$ is a structure function of the fractal random process;

$h(t, k)$ is an unknown function for which the solution of the integral equation is obtained, $t \geq 0$;

H is a Hurst exponent;

i is a complex unity;

$R(t)$ is a correlation function of the fractal random process;

$x(t)$ is a fractal random process under consideration;

$\Gamma(\alpha, z)$ is an incomplete Gamma function;

$\Gamma(z)$ is a Gamma function;

σ^2 is a process variance;

$\langle a(t) \rangle$ is a time average of a random process $a(t)$;

$H(p, k)$ is a Laplace transform of the function $h(t, k)$;

$r(p, k)$ is a Laplace transform of the function $R(t+k)$;

$r(p)$ is a Laplace transform of the function $R(t)$;

${}_1F_1(\alpha, \beta, z)$ is a confluent hypergeometric function;

$B(\mu, v)$ is a Beta-function.

INTRODUCTION

This paper is devoted to the obtaining of an analytical solution to a Volterra equation of the first kind which may be applied to the data filtration and forecast of fractal random processes. The kernel of the corresponding integral equation is the correlation function of a fractal random process with a power-law structure function.

The model of the power-law structure function is a very popular model for the description of fractal processes. For example, it is used in the description of plasma fluctuations [1], in the description of the financial market data on the basis of the statistical physics methods [2–4], etc.

Self-similar processes take place in a huge variety of different systems: industry applications, control systems (see, for example, [5, 6]), information-telecommunication systems, financial markets, physical systems (Brownian motion, non-equilibrium fluctuations, etc.), geophysical time series, etc., see [7] and references therein.

In this paper we consider only continuous random processes. The problem of the solution of the Volterra integral equation under consideration was discussed in [8] where this problem was investigated in the framework of the Kolmogorov–Wiener filter. We should stress that, to obtain the weight function and the output of the Kolmogorov–Wiener filter, a Fredholm integral equation of the first kind should be solved rather than the Volterra one (see, for example, [9]). But the Volterra integral equation is of mathematical interest by itself. As is also known, the Volterra integral equation is a special case of the Fredholm integral equation, so it may be applied to practical investigations of fractal processes.

In this paper the idea of the solution of the Volterra integral equation is similar to that of [8], but the results of paper [8] should be refined in some places, see the corresponding discussion in Sec. 2.

The object of study is the Volterra integral equation of the first kind, the kernel of which is the correlation function of a fractal random process with a power-law structure function.

The subject of study is the analytic solution of the system under consideration.

The aim of the work is to obtain an exact analytical solution to the integral equation under consideration and to investigate its asymptotic behavior.

1 PROBLEM STATEMENT

We consider the following Volterra integral equation of the first kind

$$R(T+k) = \int_0^T d\tau h(\tau, k) R(T-\tau), \quad (1)$$

where $k < T$ is a finite positive constant,

$$R(t) = \sigma^2 - \frac{\alpha}{2} t^{2H}, \quad (2)$$

and $h(\tau, k)$ is the unknown function. The problem is to obtain an analytical solution to eq. (1).

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The models with a power-law structure function are widely used to describe fractal processes (see, for example, [1–4]). Fractal processes are widely used in investigations of different systems (see [5–7] and references therein).

In paper [8] a continuous random process $x(t)$ is given for $t \in [0, T]$. The process is assumed to be a stationary and ergodic one. The structure function $c(t)$ is assumed to be a power-law function:

$$c(\tau) \equiv \left\langle (x(t) - x(t-\tau))^2 \right\rangle_t = \alpha \cdot \tau^{2H}. \quad (3)$$

where α is a positive constant, and H is the Hurst exponent.

In the model (3) the corresponding correlation function is

$$\begin{aligned} R(\tau) &\equiv \left\langle (x(t+\tau) - \langle x(t) \rangle_t)(x(t) - \langle x(t) \rangle_t) \right\rangle_t = \\ &= \sigma^2 - \frac{\alpha}{2} \tau^{2H}. \end{aligned} \quad (4)$$

The Volterra integral equation of the first kind (1) is considered in [8] in the framework of the Kolmogorov–Wiener filter. Of course, it should be stressed that, in order to obtain the Kolmogorov–Wiener filter output, the Fredholm integral equation should be solved rather than the Volterra one. Nevertheless, the Volterra integral equation discussed in [8] is of mathematical interest by itself. The Volterra integral equation is also a special case of the Fredholm integral equation, so it may be applied to data filtration and forecast in some cases (maybe even not necessarily in the framework of the Kolmogorov–Wiener problem).

The problem of the solution of the integral equation under consideration is investigated in [8] with the help of the standard Laplace transform method [10]. The authors of [8] carefully divided the solution into two parts, one of which contains the Dirac delta-function. However, the results of paper [8] should be significantly refined. First of all, eq. (19) in [8] contains a complex function as a result because the incomplete Gamma-function $\Gamma(2H+1, -\lambda x)$ is complex-valued (see eq. (19) in [8]). Besides, a pole residue is not taken into account in [8] either.

In this paper the integral equation (1) is analytically solved and the results of paper [8] are refined.

3 MATERIALS AND METHODS

Let us introduce the following Laplace transforms:

$$\begin{aligned} r(p, k) &= \int_0^\infty dTR(T+k) e^{-p(T+k)}, \\ r(p) &= \int_0^\infty dTR(T) e^{-pT}, \\ H(p, k) &= \int_0^\infty dTh(T, k) e^{-pT}. \end{aligned} \quad (5)$$

Substituting $\xi = T - \tau$ into the right-hand side of (1), multiplying the both sides of (1) by $\exp(-p(t+k))$ and taking the integral over T , with account for (5) we obtain

$$\int_0^\infty dT \int_0^T d\xi e^{-p(T+k)} h(T-\xi, k) R(\xi) = r(p, k). \quad (6)$$

Multiplying the integrand on the left-hand side of (6) by $\exp(-p\xi) \exp(p\xi)$ and substituting $x = T - \xi$, $y = \xi$ into (6), with account for (5) we obtain

$$e^{-pk} H(p, k) r(p) = r(p, k), \quad (7)$$

which with account for (5) leads to

$$H(p, k) = \frac{\int_0^\infty dTR(T+k) e^{-pT}}{\int_0^\infty dTR(T) e^{-pT}}. \quad (8)$$

The standard definitions and tabulated integrals for The Gamma and incomplete Gamma functions are [11]:

$$\begin{aligned} \Gamma(\alpha, x) &= \int_x^\infty dt e^{-t} t^{\alpha-1}, \quad \Gamma(\alpha) = \int_0^\infty dt e^{-t} t^{\alpha-1}, \\ \int_u^\infty dx x^{v-1} e^{-\mu x} &= \mu^{-v} \Gamma(v, \mu u), \\ \int_0^\infty dx x^{v-1} e^{-\mu x} &= \mu^{-v} \Gamma(v). \end{aligned} \quad (9)$$

On the basis of (9) and (2) the integrals in the numerator and the denominator of (8) are calculated:

$$\int_0^\infty dTR(T) e^{-pT} = \frac{\sigma^2}{p} - \frac{\alpha \Gamma(2H+1)}{2 p^{2H+1}}, \quad (10)$$

$$\int_0^\infty dTR(T+k) e^{-pT} = \frac{\sigma^2}{p} - \frac{\alpha e^{pk} \Gamma(2H+1, pk)}{2 p^{2H+1}}.$$

With account for (10) and (8) the following expression for $H(p, k)$ can be obtained:

$$H(p, k) = \frac{2 p^{2H} \sigma^2 - \alpha e^{pk} \Gamma(2H+1, pk)}{2 p^{2H} \sigma^2 - \alpha \Gamma(2H+1)}. \quad (11)$$

Let us investigate the behavior of $H(p, k)$ when $p \rightarrow \infty$. As is known [11], if $x \rightarrow \infty$, then $\Gamma(\alpha, x)$ can be represented as a series:

$$\Gamma(\alpha, x) \Big|_{x \rightarrow \infty} = x^{\alpha-1} e^{-x} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m \Gamma(1-\alpha+m)}{x^m \Gamma(1-\alpha)}. \quad (12)$$

On the basis of (12) and (11) we obtain

$$H(p, k) \Big|_{p \rightarrow \infty} = 1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2 \sigma^2} + O(p^{-1}). \quad (13)$$

According to (13), let us split (11) into two parts:

$$\begin{aligned} H(p, k) &= 1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2 \sigma^2} + H'(p, k), \\ H'(p, k) \Big|_{p \rightarrow \infty} &= 0. \end{aligned} \quad (14)$$

As is known [10], the inverse Laplace transform can be calculated as

$$\begin{aligned} h(t, k) &= \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} dp H(p, k) e^{pt} = \\ &= \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2 \sigma^2} \right) \delta(t) + h'(t, k) \end{aligned} \quad (15)$$

(here we use the fact that the inverse Laplace transform of a constant is the delta-function).

The function $h'(t, k)$ in (15) is the inverse Laplace transform of the function $H'(p, k)$:

$$h'(t, k) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} dp H'(p, k) e^{pt} \quad (16)$$

and in what follows we calculate it. It should be stressed that up to this point all the results coincide with [8], but the following result for $h'(t, k)$ significantly differs from [8].

The singular points of the function $H'(p, k)$ are the branch point $p = 0$ and the poles. The function $H'(p, k)$

satisfies the conditions of the Jordan lemma (see (13)), so the integral (16) is

$$h'(t, k) = I(t, k) + J(t, k), \quad (17)$$

where $I(t, k)$ is the sum of the integrals over the banks of cut and $J(t, k)$ is the pole residue part (see, for example, [12]).

The following banks of cut should be chosen: $p = xe^{i\pi}$ and $p = xe^{-i\pi}$, so

$$\begin{aligned} I(t, k) &= I_1(t, k) + I_2(t, k), \\ I_1(t, k) &= \frac{e^{i\pi}}{2\pi i} \int_0^\infty dx H'(xe^{i\pi}, k) \exp(xe^{i\pi}t), \\ I_2(t, k) &= \frac{e^{-i\pi}}{2\pi i} \int_0^\infty dx H'(xe^{-i\pi}, k) \exp(xe^{-i\pi}t). \end{aligned} \quad (18)$$

As can be seen from (14) and (11), the function $H'(p, k)$ contains the functions p^{2H} , $\exp(pk)$ and $\Gamma(2H+1, pk)$. Obviously,

$$\begin{aligned} e^{\pm i\pi} &= -1, \quad \exp(xe^{\pm i\pi}t) = \exp(-xt), \\ (xe^{\pm i\pi})^{2H} &= x^{2H} (\cos(2\pi H) \pm i \sin(2\pi H)). \end{aligned} \quad (19)$$

As is known [11], the function $\Gamma(2H+1, pk)$ can be expanded into a series:

$$\Gamma(\alpha, x) = \Gamma(\alpha) - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n!} \frac{x^{\alpha+n}}{(\alpha+n)}. \quad (20)$$

With account for (20) and (19) one can obtain

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{i\pi})\right) &= \Gamma(2H+1) + \\ &+ (kx)^{2H} \cos(2\pi H) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(kx)^{1+n}}{n!(2H+1+n)}; \\ \operatorname{Im}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{i\pi})\right) &= \\ &= (kx)^{2H} \sin(2\pi H) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(kx)^{1+n}}{n!(2H+1+n)}, \\ \operatorname{Re}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{-i\pi})\right) &= \operatorname{Re}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{i\pi})\right), \\ \operatorname{Im}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{-i\pi})\right) &= -\operatorname{Im}\left(\Gamma(2H+1, kxe^{i\pi})\right). \end{aligned} \quad (21)$$

It should be noticed that we consider processes with fractal properties, i.e. we consider cases where $H \in (0.5; 1)$. In this range of parameters we have

$\sin(2\pi H) < 0$, $\operatorname{Im}(\Gamma(2H+1, kxe^{-i\pi})) > 0$. On the basis of (18)–(21) the following result for $I(t, k)$ is obtained:

$$\begin{aligned} I(t, k) &= \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx e^{-tx} f(x, k), \\ f(x, k) &= \frac{\Psi(x)\Theta(x, k) - \Lambda(x)\Omega(x, k)}{\Lambda^2(x) + \Psi^2(x)}, \\ \Theta(x, k) &= 2\sigma^2 x^{2H} \cos(2\pi H) - \alpha e^{-kx} A(x, k), \\ \Omega(x, k) &= 2\sigma^2 x^{2H} \sin(2\pi H) + \alpha e^{-kx} B(x, k), \\ \Lambda(x) &= 2\sigma^2 x^{2H} \cos(2\pi H) - \alpha \Gamma(2H+1), \\ \Psi(x) &= 2\sigma^2 x^{2H} \sin(2\pi H), \\ A(x, k) &= \operatorname{Re}\left(\Gamma(2H+1, xke^{-i\pi})\right), \\ B(x, k) &= \operatorname{Im}\left(\Gamma(2H+1, xke^{-i\pi})\right) > 0. \end{aligned} \quad (22)$$

We should stress that in contrast to [8] our result (22) is a real-valued function. Let us investigate the convergence of the integral in (22). On the basis of (22), (20) and the property $\Gamma(\alpha+1) = \alpha\Gamma(\alpha)$ one can obtain

$$\begin{aligned} f(x, k) \Big|_{x \rightarrow \infty} &= \frac{\alpha \Gamma(2H+1) \sin(2\pi H)}{4\sigma^4} \times \\ &\times (2\sigma^2 - \alpha k^{2H}) \cdot x^{-2H} + O(x^{-2H-1}) \end{aligned} \quad (23)$$

so $f(x, k) \Big|_{x \rightarrow \infty} \sim x^{-2H}$ from which it follows that $I(0, k)$ is convergent if $H \in (0.5; 1)$. Obviously, $I(t, k)$ is convergent for $t > 0$. So $I(t, k)$ is convergent for any $t \geq 0$ if the process has fractal properties.

Let us calculate the poles of the function $H'(p, k)e^{pt}$. Obviously, to calculate the poles, we should equate the denominator of (11) to zero because of (14). The solutions of the corresponding equations are

$$z = \left(\frac{\alpha}{2\sigma^2} \Gamma(2H+1) \right)^{\frac{1}{2H}} e^{\frac{i\pi n}{H}}, \quad n \in \mathbb{Z}. \quad (24)$$

According to [12], only the poles with $\arg(z) \in [-\pi, \pi]$ contribute to $J(t, k)$ in (17). We consider the case where $H \in (0.5; 1)$, so from (24) we can see that the only pole that contributes to $J(t, k)$ is

$$p_0 = \left(\frac{\alpha}{2\sigma^2} \Gamma(2H+1) \right)^{\frac{1}{2H}}. \quad (25)$$

Let us investigate the function $H'(p, k)e^{pt}$ in the vicinity of the point $p = p_0$. Let us introduce the

parameter $\xi = p - p_0$. As is known [11], if $|y| < |x|$, then the following expansion is true:

$$\Gamma(\alpha, x+y) = \Gamma(\alpha, x) - e^{-x} x^{\alpha-1} \sum_{m=0}^{\infty} \left[\frac{(-1)^m \Gamma(1-\alpha+m)}{x^m \Gamma(1-\alpha)} \left(1 - e^{-y} \sum_{l=0}^m \frac{y^l}{l!} \right) \right]. \quad (26)$$

On the basis of (11), (14), (25) and (26) one can obtain that in the vicinity of the point $p = p_0$ (i.e. in the vicinity of the point $\xi = 0$)

$$\begin{aligned} H'(p, k) e^{pt} &= H'(p_0 + \xi, k) e^{(p_0 + \xi)t} = \\ &= p_0 e^{p_0 t} \frac{\Gamma(2H+1) - e^{p_0 k} \Gamma(2H+1, p_0 k)}{2H\Gamma(2H+1)} \xi^{-1} + \\ &+ O(\xi^0) = \frac{\Gamma(2H+1) - e^{p_0 k} \Gamma(2H+1, p_0 k)}{2H\Gamma(2H+1)} \times \\ &\times p_0 e^{p_0 t} (p - p_0)^{-1} + O((p - p_0)^0). \end{aligned} \quad (27)$$

As can be seen from (27), the expansion of $H'(p, k) e^{pt}$ into a Laurent series of $p - p_0$ begins with the minus first term, so p_0 is a simple pole and

$$\begin{aligned} J(t, k) &= \operatorname{Res}_{p=p_0} H'(p, k) e^{pt} = e^{p_0 t} p_0 \times \\ &\times \frac{\Gamma(2H+1) - e^{p_0 k} \Gamma(2H+1, p_0 k)}{2H\Gamma(2H+1)}, \end{aligned} \quad (28)$$

it should be noticed that $J(t, k)$ is not taken into account in [8].

So, the following solution is obtained:

$$h(t, k) = \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2} \right) \delta(t) + I(t, k) + J(t, k), \quad (29)$$

where the explicit expressions for $I(t, k)$ and $J(t, k)$ are given in (22) and (28); the expression for p_0 from (28) is given in (25).

4 EXPERIMENTS

Numerical calculations for some parameters are made in order to verify the solution (29). The integral

$$\begin{aligned} \int_0^T d\tau h(\tau, k) R(T - \tau) &= \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2} \right) R(T) + \\ &+ \int_0^T d\tau I(\tau, k) R(T - \tau) + \int_0^T d\tau J(\tau, k) R(T - \tau) \end{aligned} \quad (30)$$

is compared to $R(t+k)$, i.e. the right-hand side of (1) is compared to the left-hand side of (1). The calculations are made on the basis of Mathcad 14 package.

The incomplete Gamma function, which is a built-in Mathcad function, is not defined for a negative second argument. So the functions $A(x, k)$ and $B(x, k)$ in (22) are introduced as

$$\begin{aligned} \Gamma(2H+1, z) &= \int_0^\infty dx e^{-x} x^{2H} + \int_z^\infty dx e^{-x} x^{2H}, \\ A(x, k) &= \operatorname{Re}(\Gamma(2H+1, -xk)), \\ B(x, k) &= -\operatorname{Im}(\Gamma(2H+1, -xk)), \end{aligned} \quad (31)$$

the sign “-” in $B(x, k)$ in (31) is due to the fact that Mathcad interprets $\Gamma(2H+1, -xk)$ from (31) as $\Gamma(2H+1, xke^{i\pi})$; see (21).

We should notice that Mathcad fails to calculate the function $I(t, k)$ as the integral from 0 to ∞ , so $I(t, k)$ is treated as

$$\begin{aligned} I(t, k) &\approx \frac{1}{\pi} \int_0^{233} dx e^{-tx} f(x, k) + \frac{1}{\pi} \int_{233}^{+\infty} dx e^{-tx} \frac{C}{x^{2H}}, \\ C &= \frac{\alpha \Gamma(2H+1) \sin(2\pi H)}{4\sigma^4} (2\sigma^2 - \alpha k^{2H}), \end{aligned} \quad (32)$$

i.e. if $x > 233$, then $f(x, k)$ is replaced with its asymptotics for $x \rightarrow \infty$; see (32) and (23). Mathcad is able to calculate the first integral on the right-hand side of (32) in the range of parameters which is given in table 1.

The following results were obtained.

Table 1 – Verification of the obtained solution

$k = 3, H = 0.8, \alpha = \sigma = 1$		
	$R(T+k)$	the integral (30)
$T = 4$	-10.24934	-10.24935
$T = 5$	-12.92881	-12.92884
$T = 10$	-29.28861	-29.28809
$T = 30$	-133.4598	-133.4534
$k = 3, H = 0.8, \alpha = \pi/2, \sigma = 0.8$		
	$R(T+k)$	the integral (30)
$T = 4$	-17.03041	-17.03042
$T = 10$	-46.93724	-46.93725
$T = 15$	-79.43844	-79.44034
$T = 20$	-117.89713	-117.89911
$k = 3, H = 0.7, \alpha = \pi/2, \sigma = 1.2$		
	$R(T+k)$	the integral (30)
$T = 4$	-10.53367	-10.53367
$T = 10$	-27.04465	-27.04475
$T = 20$	-61.87533	-61.87372
$T = 30$	-103.51651	-103.51531
$T = 40$	-150.5975	-150.61689

As can be seen from the table 1, $R(T+k)$ is in good agreement with the integral (30), so the solution (29) is true. In our opinion, the slight difference of the second and the third columns in table 1 is due to machine errors.

Of course, Mathcad could not adequately calculate the integral (30) at large values of T , i.e. at $T = 10^3, 10^4$, etc. In order to verify the solution (29) for large values of T , we seek the asymptotics of the integrals in (30) if $T \rightarrow \infty$.

Let us denote

$$A = \frac{\Gamma(2H+1) - e^{p_0 k} \Gamma(2H+1, p_0 k)}{2H\Gamma(2H+1)} p_0, \quad (33)$$

then

$$\int_0^T d\tau J(\tau, k) R(T-\tau) = A \int_0^T dt e^{p_0 t} \left(\sigma^2 - \frac{\alpha}{2} (T-t)^{2H} \right). \quad (34)$$

As is known [11],

$$\begin{aligned} & \int_0^u x^{\nu-1} (u-x)^{\mu-1} e^{\beta x} dx = \\ & = B(\mu, \nu) u^{\nu+\mu-1} \cdot {}_1F_1(\nu, \mu+\nu, \beta u). \end{aligned} \quad (35)$$

On the basis of (35) and (34) we have

$$\begin{aligned} & \int_0^T d\tau J(\tau, k) R(T-\tau) = A \left(\frac{\sigma^2}{p_0} (e^{p_0 T} - 1) - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha}{2} T^{2H+1} \frac{\Gamma(2H+1)}{\Gamma(2H+2)} \cdot {}_1F_1(1, 2H+2, p_0 T) \right). \end{aligned} \quad (36)$$

As is known [13], the function ${}_1F_1(\alpha, \beta, z)$ has the following asymptotics:

$$\begin{aligned} & {}_1F_1(\alpha, \beta, z) \Big|_{|z| \rightarrow \infty, -\frac{\pi}{2} < \arg z < \frac{3\pi}{2}} \sim \\ & \sim \frac{\Gamma(\beta) e^z z^{\alpha-\beta}}{\Gamma(\alpha)} \sum_{s=0}^{\infty} \frac{(1-\alpha)_s (\beta-\alpha)_s}{s!} z^{-s} + \\ & + \frac{z^{-\alpha} e^{i\pi a}}{\Gamma(\beta-\alpha)} \Gamma(\beta) \sum_{s=0}^{\infty} \frac{\alpha_s (\alpha-\beta+1)_s}{s!} (-z)^{-s}, \\ & a_s \equiv a(a+1)(a+2)\dots(a+s-1), a_0 \equiv 1. \end{aligned} \quad (37)$$

On the basis on (37) it can be seen that

$$\begin{aligned} & {}_1F_1(1, \beta, z) \Big|_{|z| \rightarrow \infty, -\frac{\pi}{2} < \arg z < \frac{3\pi}{2}} = \\ & = \Gamma(\beta) e^z z^{1-\beta} - \frac{\Gamma(\beta)}{z \Gamma(\beta-1)} + O\left(\frac{1}{z^2}\right). \end{aligned} \quad (38)$$

On the basis of (38), (36) and (25) we obtain

$$\int_0^T dt R(T-t) J(t, k) \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim \frac{\alpha}{2} \frac{A}{p_0} T^{2H}. \quad (39)$$

It should be noticed that for $T \rightarrow \infty$ the integral in (39) behaves as a power-law rather than an exponent function! The integral of $I(t, k)$ is as follows:

$$\begin{aligned} & \int_0^T dt R(T-t) I(t, k) = I_1 - I_2, \\ & I_1 = \sigma^2 \int_0^T dt I(t, k), \quad I_2 = \frac{\alpha}{2} \int_0^T dt I(t, k) (T-t)^{2H}. \end{aligned} \quad (40)$$

After substituting $\xi = T-t$ into I_2 we obtain

$$I_2 = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx f(x, k) e^{-Tx} \int_0^T d\xi e^{\xi x} \xi^{2H}. \quad (41)$$

With the help of the tabulated integral

$$\begin{aligned} & \int_0^u dx x^{\nu-1} e^{-\mu x} = \mu^{-\nu} \gamma(\nu, \mu u), \\ & \gamma(\alpha, x) \equiv \Gamma(\alpha) - \Gamma(\alpha, x) \end{aligned} \quad (42)$$

and eqs. (41) and (20) we obtain

$$\begin{aligned} & I_2 = \frac{\alpha}{2} \frac{1}{\pi} T^{2H} \int_0^\infty dx \frac{f(x, k)}{x} g(x, T), \\ & g(x, T) = e^{-Tx} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(xT)^{n+1}}{n!(2H+1+n)}. \end{aligned} \quad (43)$$

It should be noticed that

$$\begin{aligned} & g(x, T) = e^{-Tx} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(xT)^{n+1}}{n!(2H+1+n)} \leq \\ & \leq e^{-Tx} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(xT)^{n+1}}{(n+1)!} = e^{-Tx} (e^{Tx} - 1) = 1 - e^{-Tx} \leq 1, \end{aligned} \quad (44)$$

so with account for (23) the integral in (43) is convergent; and the asymptotics of (43) for $T \rightarrow \infty$ is not larger than aT^{2H} where a is a constant. We assume that $I_2 \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim T^{2H}$, this assumption is confirmed numerically in what follows.

As for I_1 , we have

$$\begin{aligned} & I_1 = \sigma^2 \int_0^T dt I(t, k) = \\ & = \sigma^2 \int_0^\infty dx f(x, k) \frac{1-e^{-xT}}{x}; 1-e^{-xT} \leq 1, \end{aligned} \quad (45)$$

so obviously I_1 is bounded by a constant and $I_1 = o(I_2)$ if $T \rightarrow \infty$.

Obviously

$$\left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right)R(T) \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim -\frac{\alpha}{2} \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right) T^{2H}, \quad (46)$$

$$R(T+k) \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim -\frac{\alpha}{2} T^{2H}.$$

So, the asymptotic behavior of the left-hand and right-hand sides of (1) on the basis of (29) for $T \rightarrow \infty$ are

$$R(T+k) \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim -\frac{\alpha}{2} T^{2H},$$

$$\int_0^T d\tau h(\tau, k) R(T-\tau) \Big|_{T \rightarrow \infty} \sim \frac{\alpha}{2} T^{2H} \left(\frac{A}{p_0} - \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right) - \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx \frac{f(x, k)}{x} g(x, T) \right); \quad (47)$$

see also (39), (43) and (46). So if

$$\frac{A}{p_0} - \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right) - \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx \frac{f(x, k)}{x} g(x, T) = \quad (48)$$

$$= -1,$$

then our solution (29) is true for $T \rightarrow \infty$.

The validity of (48) is checked numerically with the help of the Wolfram Mathematica 11 package, which is able to calculate the integral on the left-hand side of (48). The following results are obtained.

Table 2 – Verification of the obtained asymptotics

$k = 3, H = 0.7, \alpha = \pi/2, \sigma = 1.2$	
T	$\frac{A}{p_0} - \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right) - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx \frac{f(x, k)}{x} g(x, T)$
10^3	-0.999798
10^4	-0.9998
10^5	-0.999998
$k = 4, H = 0.8, \alpha = \pi/2, \sigma = 0.8$	
T	$\frac{A}{p_0} - \left(1 - \frac{\alpha k^{2H}}{2\sigma^2}\right) - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty dx \frac{f(x, k)}{x} g(x, T)$
10^3	-0.996715
10^4	-0.999671
10^5	-0.999967

As can be seen from table 2, eq. (48) is valid, which justifies our solution.

5 RESULTS

An exact analytical solution to the Volterra integral equation (1) is obtained, see (29). The kernel of the corresponding Volterra integral equation is the correlation function of the continuous fractal process with the power-law structure function (3). Only the cases where the Hurst exponent $H \in (0.5; 1)$ are considered. The obtained solution (29) is verified numerically. The asymptotic

© Gorev V. N., Gusev A. Yu., Kornienko V. I., 2018
 DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-4

behavior of both sides of (1) for $T \rightarrow \infty$ is investigated. It is shown that our solution gives the correct asymptotic behavior.

6 DISCUSSION

The corresponding Volterra integral equation was discussed in [8] in the framework of the Kolmogorov–Wiener filter for the rather popular model with the structure function (3). It seems that the use of the Volterra integral equation in the framework of the Kolmogorov–Wiener filter is in some sense inadequate because the Fredholm integral equation of the first kind should be solved in order to obtain the Kolmogorov–Wiener filter output.

Nevertheless, the Volterra integral equation is of mathematical interest. It should also be noted that the Volterra integral equation is a special case of the Fredholm integral equation, which is rather popular in investigations of fractal processes, so the Volterra integral equation may be applied to some investigations of fractal processes.

An exact analytical solution to eq. (1) is obtained. It is shown that the term $I(t, k)$ in (29) which comes from the integrals over the banks of cut is convergent for any $t \geq 0$ if the Hurst exponent $H \in (0.5; 1)$. In contrast to [8], $I(t, k)$ is a real-valued function. Also in contrast to [8], the residue part of (29) is taken into account. The obtained solution (29) is verified numerically on the basis of Mathcad 14 package.

The asymptotic behavior of both sides of (1) for $T \rightarrow \infty$ is also investigated on the basis of (29). It is shown that our solution gives the correct asymptotic behavior; the corresponding integral in (48) was taken numerically with the help of Wolfram Mathematica 11 package.

CONCLUSIONS

The Volterra integral equation (1) of the first kind the kernel of which is the correlation function (4) is solved.

The scientific novelty of the obtained results is that an exact analytic solution to the corresponding integral equation is obtained. The solution is verified numerically, it is also shown that our solution the gives correct asymptotic behavior. The results of the previous papers devoted to the integral equation under consideration are refined.

The practical significance is that the obtained results may be applied to investigations of fractal random processes.

Prospects for further research are to apply the obtained results to practical problems.

REFERENCES

1. Gilmore M., Yu C. X., Rhodes T. L., W. A. Peebles Investigation of rescaled range analysis, the Hurst exponent, and long-time correlations in plasma turbulence, *Physics of Plasmas*, 2002, Vol. 9, pp. 1312–1317. DOI: 10.1063/1.1459707

2. Gorski A. Z., Drozdz S., Spethc J. Financial multifractality and its subtleties: an example of DAX, *Physica A*, 2002, Vol. 316, pp. 496–510. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)01021-X
3. Preis T., Virnau P., Paul W., Schneider J. Accelerated fluctuation analysis by graphic cards and complex pattern formation in financial markets, *New Journal of Physics*, 2009, Vol. 11, 093024 (21 pages). DOI:10.1088/1367-2630/11/9/093024
4. Preis T., Paul W., Schneider J. Fluctuation patterns in high-frequency financial asset returns, *Europhysics Letters*, 2008, Vol. 82, 68005 (6 pages). DOI: 10.1209/0295-5075/82/68005
5. Gusev O., Kornienko V., Gerasina O., Aleksieiev O. Fractal analysis for forecasting chemical composition of cast iron, In book "Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems", Taylor & Francis Group, London, 2016, pp. 225–231.
6. Kornienko V., Gerasina A., Gusev A. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production, In book "Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems", Taylor & Francis Group. London, 2013, pp. 183–192. ISBN 978-1-138-00126-8.
7. Pipiras V., Taqqu M. Long-Range Dependence and Self-Similarity. Cambridge University Press, 2017, 668p. DOI: 10.1017/CBO9781139600347
8. Bagmanov V. Kh., Komissarov A. M., Sultanov A. Kh. Prognozirovaniye teletraffiika na osnove fraktalnykh filtrov, *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviationskogo universiteta*, 2007, Vol. 9, No. 6 (24), pp. 217–222.
9. Miller S., Childers D. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition. Amsterdam, Elsevier/Academic Press, 2012, 598 p. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
10. Polyanin A. D., Manzhirov A. V. Handbook of the integral equations. Second edition. Boca Raton, Chapman & Hall/CRC Press. Taylor & Francis Group, 2008, 1143 p.
11. Gradshteyn I. S. and Ryzhik I. M. Table of Integrals, Series, and Products. Seventh edition, *Translated from the Russian, Translation edited and with a preface by A. Jeffrey and D. Zwillinger*. Amsterdam, Elsevier/Academic Press, 2007, 1200 p.
12. Angot A. Matematika dlya elektro- i radioingenerov. Moscow, Nauka, 1967, 780 p.
13. Oliver F., Lozier D., Boisvert R., Clark C. NIST Handbook of Mathematical Functions. New York, Cambridge University Press, 2010, 951 p.

Received 22.05.2018.
Accepted 03.06.2018.

УДК 517.968.22

ДО АНАЛІТИЧНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ІНТЕГРАЛЬНОГО РІВНЯННЯ ВОЛЬТЕРИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФРАКТАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ

Горєв В. М. – канд. физ.-мат. наук, асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет Дніпровська Політехніка, Дніпро, Україна.

Гусев О. Ю. – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет Дніпровська Політехніка, Дніпро, Україна.

Корнієнко В. І. – д-р техн. наук, доцент, завідувач кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет Дніпровська Політехніка, Дніпро, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто інтегральне рівняння Вольтери першого роду, яке може бути застосовним до фільтрації та прогнозування випадкових фрактальних процесів, наприклад, у інформаційно-телекомунікаційних мережах та при керуванні складними технологічними процесами.

Метою роботи є отримати точний аналітичний розв'язок інтегрального рівняння Вольтери першого роду. Ядром відповідного інтегрального рівняння є кореляційна функція фрактального випадкового процесу, структурна функція якого є степеневою.

Метод. Інтегральне рівняння Вольтери першого роду розв'язано за допомогою стандартного методу перетворення Лапласа. Зворотне перетворення Лапласа приводить до контурного інтегралу від функції комплексної змінної. Цей інтеграл обчислено як суму частини, що містить лишок, та інтегралів вздовж берегів розрізу. Відповідні інтеграли пораховано за допомогою відомих розвинень спеціальних функцій.

Результати. Нами отримано точний аналітичний розв'язок інтегрального рівняння Вольтери, ядром якого є кореляційна функція фрактального випадкового процесу. Робота базується на моделі, в якій структурна функція відповідного фрактального процесу є степеневою функцією. Показано, що та частина розв'язку, яка не містить дельта-функції, є збіжною в будь-якій точці, якщо показник Херста є більшим за 0,5, тобто якщо процес має фрактальні властивості. Показано, що отриманий розв'язок є дійсною функцією. Отриманий розв'язок перевірено чисельно; також показано, що наш розв'язок дає правильну асимптотичну поведінку. Хоча отриманий розв'язок містить експоненційно зростаючу функцію часу, при великих часах інтеграл від отриманого розв'язку асимптотично веде себе як степенева функція.

Висновки. Важливо підкреслити, що нами отримано точний, а не наближений розв'язок інтегрального рівняння Вольтери, яке досліджується. Отриманий розв'язок може бути застосовним до фільтрації та прогнозування даних випадкового фрактального процесу. Як відомо, фрактальні процеси мають місце у величезній кількості різноманітних систем, тому результати цієї статті можуть мати широку область застосування.

Ключові слова: інтегральне рівняння Вольтери першого роду, показник Херста, перетворення Лапласа, фрактальний процес, точний аналітичний розв'язок.

УДК 517.968.22

КАНАЛИТИЧЕСКОМУ РЕШЕНИЮ ИНТЕГРАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ВОЛЬТЕРРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАКТАЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ

Горев В. Н. – канд. фіз.-мат. наук, асистент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет Дніпровська Політехніка, Дніпр, Україна.

Гусев А. Ю. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет Дніпровська Політехніка, Дніпр, Україна.

Корниенко В. И. – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедры безопасности информации и телекоммуникаций, Национальный технический университет Днепровская Политехника, Днепр, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальність. Рассмотрено интегральное уравнение Вольтерры первого рода, которое может быть применено к фильтрации и прогнозированию случайных фрактальных процессов, например, в информационно-телекоммуникационных сетях и при управлении сложными технологическими процессами.

Целью работы является точное аналитическое решение интегрального уравнения Вольтерры первого рода. Ядром соответствующего интегрального уравнения является корреляционная функция фрактального случайного процесса, структурная функция которого является степенной.

Метод. Интегральное уравнение Вольтерры первого рода решено с помощью стандартного метода преобразования Лапласа. Обратное преобразование Лапласа приводит к контурному интегралу от функции комплексной переменной. Этот интеграл посчитан как сумма части, содержащей вычет, и интегралов вдоль берегов разреза. Соответствующие интегралы получены на основе известных разложений специальных функций.

Результаты. Нами получено точное аналитическое решение интегрального уравнения Вольтерры, ядром которого есть корреляционная функция фрактального случайного процесса. Работа основывается на модели, в которой структурная функция соответствующего фрактального процесса является степенной функцией. Показано, что та часть решения, которая не содержит дельта-функции, сходится в любой точке, если показатель Херста больше 0,5, то есть если процесс имеет фрактальные свойства. Показано, что полученное решение является действительной функцией. Полученное решение проверено численно; также показано, что наше решение дает правильное асимптотическое поведение. Хотя полученное решение содержит экспоненциально возрастающую функцию времени, при больших временах интеграл от полученного решения асимптотически ведет себя как степенная функция.

Выводы. Следует подчеркнуть, что нами получено точное, а не приближенное решение исследуемого интегрального уравнения Вольтерры. Полученное аналитическое решение может быть применено к фильтрации и прогнозированию данных случайного фрактального процесса. Как известно, фрактальные процессы имеют место в огромном количестве разных систем, поэтому результаты этой статьи могут иметь широкую область применения.

Ключевые слова: интегральное уравнение Вольтерры первого рода, показатель Херста, преобразование Лапласа, фрактальный процесс, точное аналитическое решение.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Investigation of rescaled range analysis, the Hurst exponent, and long-time correlations in plasma turbulence / [M. Gilmore, C. X. Yu, T. L. Rhodes, W. A. Peebles] // Physics of Plasmas. – 2002. – Vol. 9. – P. 1312–1317. DOI: 10.1063/1.1459707
2. Gorski A. Z. Financial multifractality and its subtleties: an example of DAX / A. Z. Gorski, S. Drozdz, J. Spethc // Physica A. – 2002. – Vol. 316. – P. 496–510. DOI: 10.1016/S0378-4371(02)01021-X
3. Accelerated fluctuation analysis by graphic cards and complex pattern formation in financial markets / [T. Preis, P. Virnau, W. Paul, J. Schneider] // New Journal of Physics. – 2009. – Vol. 11. – 093024 (21 pages). DOI:10.1088/1367-2630/11/9/093024
4. Preis T. Fluctuation patterns in high-frequency financial asset returns / T. Preis, W. Paul, J. Schneider // Europhysics Letters. – 2008. – Vol. 82. – 68005 (6 pages). DOI: 10.1209/0295-5075/82/68005
5. Fractal analysis for forecasting chemical composition of cast iron / [O. Gusev, V. Kornienko, O. Gerasina, O. Aleksieiev] // In book “Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems”. – Taylor & Francis Group, London, 2016. – P. 225–231.
6. Kornienko V. Methods and principles of control over the complex objects of mining and metallurgical production / V. Kornienko, A. Gerasina, A. Gusev // In book “Energy Efficiency Improvement of Geotechnical Systems”. – Taylor & Francis Group, London, 2013. – P. 183–192. ISBN 978-1-138-00126-8.
7. Pipiras V. Long-Range Dependence and Self-Similarity / V. Pipiras, M. Taqqu. – Cambridge University Press, 2017. – 668 p. DOI: 10.1017/CBO9781139600347
8. Bagmanov V. Kh. Prognozirovanie teletraffika na osnove fraktalnykh filtrov / V. Kh. Bagmanov, A. M. Komissarov, A. Kh. Sultanov // Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviationsnogo universiteta. – 2007. – Vol. 9, No. 6 (24). – P. 217–222.
9. Miller S. Probability and Random Processes With Applications to Signal Processing and Communications. Second edition / S. Miller, D. Childers. – Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2012. – 598 p. DOI: doi.org/10.1016/B978-0-12-386981-4.50001-1
10. Polyanin A. D. Handbook of the integral equations. Second edition / A. D. Polyanin, A. V. Manzhirov. – Boca Raton : Chapman & Hall/CRC Press, Taylor & Francis Group, 2008. – 1143 p.
11. Gradshteyn I. S. Table of Integrals, Series, and Products. Seventh edition / I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik // Translated from the Russian, Translation edited and with a preface by A. Jeffrey and D. Zwillinger. – Amsterdam: Elsevier/Academic Press, 2007. – 1200p.
12. Angot A. Matematika dlya elektro- i radioingenerov / A. Angot. – Moscow : Nauka, 1967. – 780 p.
13. NIST Handbook of Mathematical Functions / [F. Oliver, D. Lozier, R. Boisvert, C. Clark]. – New York : Cambridge University Press, 2010. – 951 p.

UDC 510.6

MODELS OF TRAINING PROCEDURES

Khodakov V. Ye. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Information Technologies, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine.

Sokolov A. Ye. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine.

Veselovskaya G. V. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technologies, Kherson National Technical University, Kherson, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of justifying methods for constructing models of optimization procedures as dynamic objects, taking into account the features of the training procedures, is considered. The object of the study were models of the dynamics of training procedures.

Objective. The goal of the work is to solve the tasks of formalizing the training procedures, developing methods for constructing mathematical models of the learning processes, the processes of searching for the optimum of the learning tasks, and for evaluating dynamic training procedures.

Method. The learning process is a totality of sequential and interrelated actions of a teacher and learners, aimed at providing a conscious and durable assimilation of knowledge, abilities, and skills. As a result of systematic analysis, main, basic patterns of training procedures are defined. The notion of “information flow” is justified as the sequence of messages carrying information for building models of interactions in information systems. The important property of the information flow is determined – the direction from the source to the receiver. Two possible variants of information interaction of objects are singled out – information transfer and information compensation. The use of optimality principle for information processes of learning is offered. It is shown that the dynamics of learning processes is determined by the characteristics of the used optimization procedure. The gradient procedure for finding the extremum of the goal function is described by the autonomous motion of the dynamic system. For a strictly convex goal function, according to sufficient optimality conditions, the optimization procedure is described by the dynamics of the autonomous motion of a stationary linear unbound dynamic object. The choice of the multiplier for the gradient significantly affects the dynamics of the process, and for a strictly convex goal function the multiplier is equal to the increment vector. The use of a dynamic model determines the number of steps required to achieve the given accuracy.

Results. The created models received software implementation and were investigated in practice when solving the tasks of modeling the dynamics of training procedures in the teaching process of the Information Technologies Department of Kherson National Technical University.

Conclusions. The carried out experimental researches have allowed to confirm practically operability of the created mathematical apparatus and to consider it expedient for application with the purpose of increase of efficiency of modeling and realization of training procedures. Further perspectives of the research are seen in the coverage of more types of dynamic training procedures, optimizing approaches to their software implementations, and increasing the scale of their coverage with confirmatory experiments.

KEYWORDS: training, formalization of training procedures, teacher, student, information flow, optimization procedures.

ABBREVIATIONS

GDP is a gross domestic product;

IT are information technologies;

KhNTU is Kherson National Technical University.

NOMENCLATURE

A is a matrix of the partial differentials $\partial f_i / \partial y_j |_{y^*}$;

B is a control matrix that leads to correction of the optimization procedure;

C is some object of the information interaction;

D is another object of the information interaction;

dW is a differential for the resulting learning effectiveness;

dx is a differential for the variable x of the function $f()$;

dy is a differential for the variable y of the function $f()$;

de is a differential for the costs of training;

$f()$ is an integrated function associated with the dynamic learning procedure;

f^* is a specified value of the goal function;

f_0 is an initial value of the goal function;

$gradf()$ is a gradient calculation function associated with the function $f()$;

I_C is an information flow of the object C ;

I_D is an information flow of the object D ;

I_E is a difference of the information flows;

ln is a mathematical calculation of the natural logarithm;

\min is an operation for determining the minimum of the goal function;

R is a remainder of the power series representing the function $f()$;

t_m is a time for finding the optimal solution for the number of steps m ;

u is a control leading to correction of the optimization procedure;

W is a resulting effectiveness of training;

W_0 is a initial learning effectiveness;

x is an integrated input variable of function $f()$;

y is an integrated output variable of function $f()$;

y^* is the specified value of the variable y of the function $f()$;

y_n is a n -th unordered value of the variable y^* ;

y_{n+1} is a $(n + 1)$ -th increment value of the variable y^* .

$\partial f / \partial y |_{y^*}$ is a partial differential of the function $f()$ with respect to the variable y at the local point y^* ;

$\partial f_i / \partial y_i |_{\mathbf{y}^*}$ is a partial differential of the i -th local function $f_i()$ on the i -th variable y_i at the local point \mathbf{y}^* ;
 Δx is an increment of the variable x of the function $f()$;
 Δy is an increment of the variable y of the function $f()$;
 Δe is an increment of training costs;
 α is an integrated speed for the dynamic training procedure;
 α_i is a local speed associated with the $f_i()$ function of the dynamic training procedure;
 ϵ is a training costs;
 η is a sensitivity of the effectiveness of education to the costs of it;
 λ is a specified accuracy of determining the minimum value of the target function;
 χ is an other costs.

INTRODUCTION

Knowledge is the basis of modern technologies including teaching ones.

Preservation and accumulation of knowledge is an indispensable element of the development of society.

A reliable way to save and gain knowledge is the learning process.

Training is a kind of educational activity in which the quantity and quality of the elements of knowledge and skills of a trainee are brought to the proper level (average, standard, possible) by a teacher that makes up the learning goal.

The activity of training is considered complete, and its goal is achieved if quantity and quality of the educational material in the re-manufactured product of a trainee will correspond to the objectives of the training or form the proper level (average, standard, possible) presented for the training purpose.

The learning process is a set of sequential and interrelated actions of an instructor and learner aimed at providing a conscious and lasting assimilation of the system of scientific knowledge, skills, the ability to use them in life, to develop independent thinking, observation and other cognitive abilities of trainees, mastering the elements of culture and mental work as well as formation of the worldview foundations.

The object of study is a set of the models for the dynamics of the training procedures.

The subject of study is a set of the conceptual approaches and ways for modeling dynamic learning procedures.

The purpose of the work is to solve the tasks of formalizing the training procedures, developing methods for constructing mathematical models of the learning processes, the processes of searching for the optimum of the learning tasks, and for evaluating dynamic training procedures.

1 PROBLEM STATEMENT

Despite the existence of certain results of studies of convergence rates of search procedures of optimal [22],

the question of justifying the methods for constructing models of optimization procedures as dynamic objects at the moment has not been sufficiently developed.

In accordance with the above, the main problematic issue of this work is the solution of the problems of formalization of training procedures, the development of methods for constructing mathematical models of learning processes, the processes of searching for optimal learning tasks and evaluating dynamic training procedures.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Let's start with the question of tasks and characteristics of education.

Considering education as a holistic, purposeful process it is possible to distinguish four stages of formation and implementation of the learning objectives:

a) study of objective factors and definition of the general goal of education (requirements of the society to education, the level of development of fundamental sciences, etc.);

b) embodiment of the general goal of education in curricula, textbooks, technical means of teaching, methodological aids;

c) implementation of the goals and objectives of training in the actions of teachers while training students;

d) awareness of the goals and objectives of education and self-training of the students and their conscious desire to adjust their education accordingly.

In the specific cycle of the educational process the goals and objectives of the training are determined on the basis of the requirements of the curriculum taking into account the characteristics of the given class (group), the level of its preliminary preparation, education, upbringing and development as well as considering the possibilities of a teacher, a classroom equipment, didactic teaching aids.

Teaching methods use information and communication technologies [1–3] the essence of which is to use modern high-tech means of information transfer such as computers, laptops, digital projectors, simulators. Information is presented in the form of a visual-shaped series to students, and the phenomenon or process can be detailed and presented in dynamics.

A significant difference of modern computer learning technologies is their interactivity achieved by simulating situations and feedback of a learner with the information support system of a teacher.

The principle of feedback in pedagogy and of scientific teaching methods is presented in [4–6] which emphasizes that learning is the process of transferring knowledge and skills from a teacher to a student until the student acquires the ability to independently reproduce the teacher's activity.

Negative feedback is emphasized in the training system.

Next we consider the question about characteristics of teaching technologies.

Generalized modern teaching technologies are based on advances in information technology [7, 8].

To build models we use the concept of information flow.

As the information flow we will understand the sequence of messages carrying information.

Actually, this is the simplest definition, and in this case the information stream has only one property which is directed from the source to the receiver.

We denote the information flow by an arrow indicating the flow direction, emphasizing the flow belonging to a particular source.

With this approach we get only four possible cases for two objects C and D , namely: C – source, D – receiver; C – receiver, D – source; C – source and D – source; and, in the latter case, C is the receiver and D is the receiver.

It is obvious that only case C is a source, D is a receiver where information is transmitted from source C to receiver D , and the case when C and D are sources is the case of compensation or comparison of information flows when a “difference” information stream carrying information about the difference of information in streams C and D .

To denote the operation of comparing flows we use the symbol of algebraic summation and in this case we can obtain two elements for constructing the scheme which we call the conditional model depicting interaction of information flows (Fig. 1, Fig. 2):

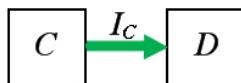


Figure 1 – The transmission of information by I_C stream from source C to receiver D

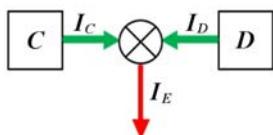


Figure 2 – Compensation of information flow I_C by information flow I_D and formation of information difference flow in I_C and I_D streams or “difference of the flows” I_E

Actually, these are two “bricks” from which the description of information flows can be constructed.

The processes in the source or the receiver can be complex but within the accepted definition of the information flow the information interaction is limited only by these two processes.

The model is important in the training system as a means of describing the outside world.

But when constructing a model the most important is the notion of an adequate model – its correspondence to an object.

The model constructed with the smallest possible error is optimal in the sense of its construction based on the implementation of the procedure for finding conditions for which a minimal estimate of the deviation in the model from the object is characteristic.

To describe the learning processes it is advisable to use the principle of optimality – the processes of information processing while training are described by optimization procedures.

Proceeding from the above we have a simple scheme of the system structure – the conditional structural model (Fig. 3).

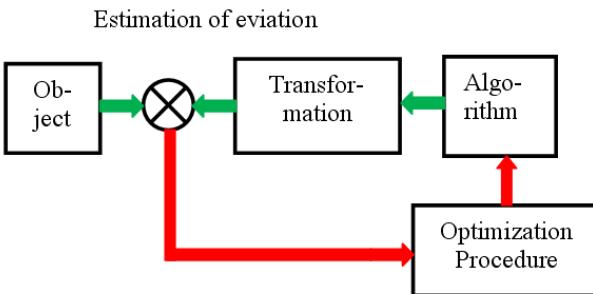


Figure 3 – Enlarged system structure

The above enlarged structure (Fig. 3) takes into account the compensation of the information flow created by the object from the information flow side in accordance with the created modelling algorithm which is determined by the procedure for minimizing the “difference” information flow.

Thus, we have the ability to represent information flows in the system.

Let's call it the structural modelling of information systems – learning systems.

For all its simplicity, the proposed method allows to obtain an algorithm for processing information in the learning system on the basis of a “structural” model.

For various objects and transformations of algorithm steps into a model compared to an object, the general requirement is the requirement of optimality to achieve a minimum deviation of the model from the object.

Transferring the principle of optimality to the training system, we can evaluate the dynamics of the training procedure.

Modern information technology is largely based on the use of optimization procedures that ensure high efficiency of their implementation [9].

At the same time the complexity and coherence of the tasks being solved causes the appearance of significant time-consuming optimization which is manifested as the effect of the dynamics in optimization procedures [10].

It should be borne in mind that with the development and improvement of information technology the task to find the best solutions takes an increasing share among all processes.

The desire to increase the productivity and accuracy of information processing processes led to a revision of the approach in determining the amount of information and the transition to the analysis and synthesis of information systems in the information space [11].

The dynamic properties of the optimization procedure are manifested with decreasing step of the procedure.

It is obvious that with the development of information technology optimization procedures will acquire the properties of an independent dynamic object.

As a consequence it becomes necessary to build mathematical models of the dynamics for the optimization procedure.

We conclude with the question of the research purpose.

Nowadays there is the number of studies on the rate of convergence of a procedure for finding an optimum [22], but the question of justifying the methods for constructing an optimization procedure model as a dynamic object is poorly illuminated.

Thus, the goal of the study is to solve the problems of formalizing the training procedures, developing methods for constructing mathematical models of the learning processes, the processes of searching for the optimum of the learning tasks, and for evaluating dynamic training procedures.

3 MATERIALS AND METHODS

To construct a model for the time behavior of the gradient procedure, let us consider an autonomous stationary nonlinear dynamical object of the first order [13] by the formula (1):

$$\frac{dy}{dx} = f(y). \quad (1)$$

We perform the linearization of the right-hand side of the equation (1). To do this we assume that the function on the right-hand side of the equation (1) can be represented by a power series [13] around point y^* by the formula (2):

$$f(y, x) = f(y^*) + \frac{1}{!} \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{y^*} \Delta y + \dots + R. \quad (2)$$

After transferring the origin to point y^* we obtain in (2) the first approximation of the right-hand side function in (2) by the formula (3):

$$f(y, x) \approx \frac{1}{!} \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{y^*} \Delta y. \quad (3)$$

Using the linear approximation (3), we obtain the formula (4):

$$\frac{dy}{dx} \approx \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{y^*} \Delta y. \quad (4)$$

Taking into account (4) and returning to increments, we have the formula (5):

$$\frac{y + \Delta y - y}{\Delta x} \approx \frac{df}{dy} \Big|_{y^*} \Delta y. \quad (5)$$

Moving the origin to the point y^* and going to increments in (5), we obtain the formula (6):

$$y^* + \Delta y = y^* + \Delta x \frac{df}{dy} \Big|_{y^*} \Delta y. \quad (6)$$

Denoting $y^* = y_n$ and $y^* + \Delta y = y_{n+1}$ in (6), we obtain the model of the Runge-Kutta method of the first order [14] by the formula (7):

$$y_{n+1} = y_n + \frac{df}{dy} \Big|_{y_n} y_n \Delta x. \quad (7)$$

Linearization is performed at each point of the trajectory.

We have the case of transition to new variables and the product $\Delta x y_n = \alpha$ determines the speed of movement for the procedure.

Introducing α into (7), we obtain the expression (7) in the form of the formula (8):

$$y_{n+1} = y_n + \alpha \frac{df}{dy} \Big|_{y_n}. \quad (8)$$

Replacing the derivative in $gradf(y)$ in (8), which is true for (1), we obtain (7) as a gradient procedure [14] by the formula (9):

$$y_{n+1} = y_n + \alpha \cdot gradf \Big|_{y_n}. \quad (9)$$

Therefore, the dynamics in the free movement of an object described by the linear differential equation (1) corresponds to the motion of the gradient optimization procedure with a correction factor before the gradient $\alpha = \Delta x y_n$.

Similarly, as for a one-dimensional object (1) a multidimensional linear dynamic object can be represented by the formula (10):

$$\frac{dy}{dx} = Ay. \quad (10)$$

Matrix A in (10) can be regarded as the matrix of a linearized object by the formula (11), consisting of the functions gradients in the right-hand side:

$$A = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y_n} \end{pmatrix}_{y^*} = \begin{bmatrix} gradf_1 \\ \vdots \\ gradf_n \end{bmatrix}_{y^*}. \quad (11)$$

The Runge-Kutta method of the first order gives the procedure in the form of the formula (12):

$$\begin{bmatrix} y_{k+1}^1 \\ \vdots \\ y_{k+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_k^1 \\ \vdots \\ y_k^n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial f_n}{\partial y_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial y_n} \end{pmatrix}_{y^*} \cdot \begin{bmatrix} y_k^1 \\ \vdots \\ y_k^n \end{bmatrix} \Delta x. \quad (12)$$

In the vector notation procedure (12) has the form of the formula (13):

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k + A_{\mathbf{y}}^* \mathbf{y}_k \Delta \mathbf{x}. \quad (13)$$

On the other hand, in the problem of finding the minimum of a target function that depends on the vector of the formula (14):

$$\mathbf{y}^* \rightarrow \min f(\mathbf{y}), \quad (14)$$

the gradient procedure (9) takes the form of the formula (15):

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k + \alpha \cdot \text{grad}f_{\mathbf{y}_k}. \quad (15)$$

In componentwise recording, the gradient procedure (15) has the form of the formula (16):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{k+1}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{k+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_k^n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{y}_1} & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \cdots & \frac{\partial f}{\partial \mathbf{y}_n} \end{pmatrix}_{\mathbf{y}^*} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Thus, first-order Runge-Kutta procedure for system (12) differs from the gradient procedure for problem (16), first, in that matrix A for the gradient procedure is diagonal and, secondly, by the fact that the factor α in the gradient procedure is chosen from considerations of convergence, and in (12) the factor is defined.

Proceeding from this, it can be asserted that the model for the dynamics of the gradient procedure is the model of free motion of a disconnected linear object if the following condition in the formula (17) is true:

$$\begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \vdots \\ \alpha_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k^1 \Delta \mathbf{x} \\ \vdots \\ \mathbf{y}_k^n \Delta \mathbf{x} \end{bmatrix}. \quad (17)$$

In the general case, taking into account (17) the model for the dynamics of the gradient procedure (16) is described by the Runge-Kutta procedure of first order, and correction of the optimization procedure is described as the control \mathbf{u} with the matrix B by the formula (18):

$$\mathbf{y}_{k+1} = \mathbf{y}_k + A_{\mathbf{y}}^* \mathbf{y}_k \Delta \mathbf{x} + B \mathbf{u}_k \Delta \mathbf{x}. \quad (18)$$

For the identity control matrix procedure (18) takes the form of the formula (19):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_{k+1}^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_{k+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_k^n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{y}_1} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \frac{\partial f}{\partial \mathbf{y}_n} \end{pmatrix}_{\mathbf{y}^*} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_k^n \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x} + \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{\mathbf{y}^*} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{u}_k^1 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_k^n \end{bmatrix} \Delta \mathbf{x}. \quad (19)$$

Consequently the dynamics of a simple gradient procedure with a factor α satisfying condition (17) is described by the system with a next structure (Fig. 4).

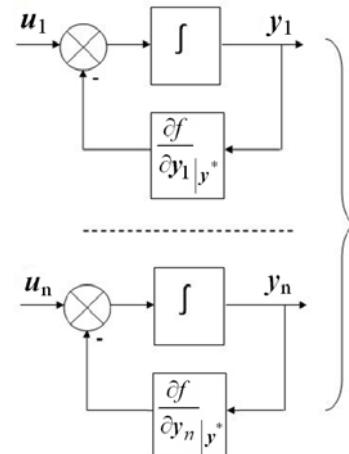


Figure 4 – Model for the dynamics of the gradient procedure

In this case, the sequence of transitions in the gradient procedure that determines the motion of the system is associated with transitions in the space of variables and the change of state – the value of the goal function.

Actually, the change of the value in the target function determines the transient process in the model (Fig. 5, 6):

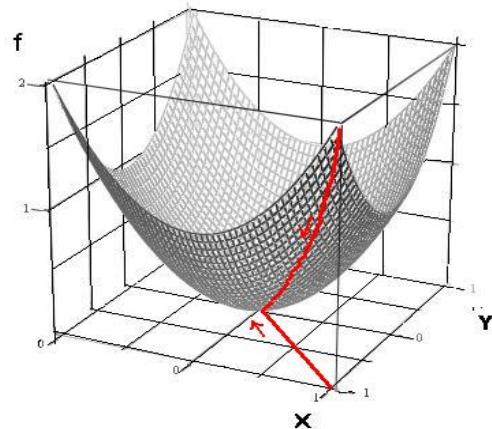


Figure 5 – The process of minimizing the function

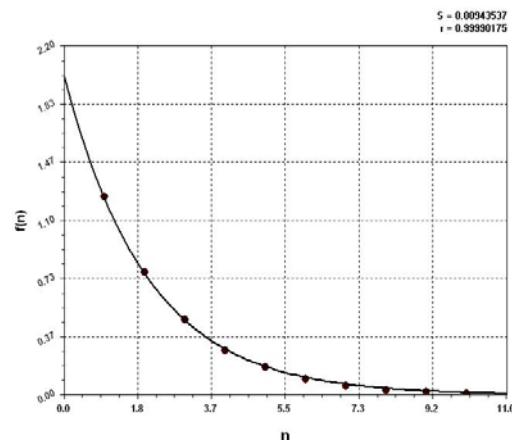


Figure 6 – The transient process of the dynamic model

As it can be seen from Fig. 5, 6 the transient process in the dynamic system coincides with the process of changing the value of the objective function in the gradient procedure.

We can perform an analysis of the assumptions made using the standard quadratic goal function.

Thus, for the processes shown in Fig. 3, 4 the objective function $f(x,y)$ is chosen to be convex by the formula (20):

$$f(x,y) = x^2 + y^2. \quad (20)$$

The gradient procedure was used with the formula (21):

$$\begin{bmatrix} y_{k+1}^1 \\ \vdots \\ y_{k+1}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_k^1 \\ \vdots \\ y_k^n \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial y_1} & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & \cdots & \frac{\partial f}{\partial y_n} \end{pmatrix}_{y^*} \cdot \Delta x. \quad (21)$$

For the chosen target function (20) and constant step Δx we obtain the formula (22):

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - 2x_k \cdot \Delta x \\ y_{k+1} = y_k - 2y_k \cdot \Delta y \end{cases} \quad (22)$$

In this case it gives the model for the dynamics of the gradient procedure in the form of a discrete Runge-Kutta model of the first order for the autonomous motion of an object by the formula (23):

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = -2x \\ \frac{dy}{dt} = -2y \end{cases}. \quad (23)$$

The solution of the disconnected system (23) gives a combination of exponentials by the formula (24):

$$\begin{cases} x(t) = 1 \cdot e^{-2t} \\ y(t) = 1 \cdot e^{-2t} \end{cases}. \quad (24)$$

After substituting the coordinates in (20) we obtain the trajectory of the objective function by the formula (25):

$$f(x,y) = x(t)^2 + y(t)^2 = 2 \cdot e^{-4t}. \quad (25)$$

Thus, taking into account the sufficient conditions of the optimum [10] around the optimum point the dynamics of the gradient procedure is described by the free motion of the linear dynamical system.

For the factor a containing the coordinate, we obtain a procedure with nonlinearity and, as a consequence, the transient process loses exponentiality.

Let's consider the procedure with the formula (26):

$$\begin{cases} x_{k+1} = x_k - \frac{\partial f}{\partial x} \Big|_{x_k} x_k \cdot \Delta x \\ y_{k+1} = y_k - \frac{\partial f}{\partial y} \Big|_{y_k} y_k \cdot \Delta y \end{cases}. \quad (26)$$

We obtain a transient process with the approximation of the transient process by the fractional function a) and the exponent function b) by the formula (27):

$$\begin{aligned} a) \quad x = i, \quad f(x) &= \frac{2 - 0.02x}{1 + 0.5x + 0.05x^2}; \\ b) \quad x = i, \quad f(x) &= 2e^{-0.3x}. \end{aligned} \quad (27)$$

The graphs of the transient process are shown in Fig. 7, 8.

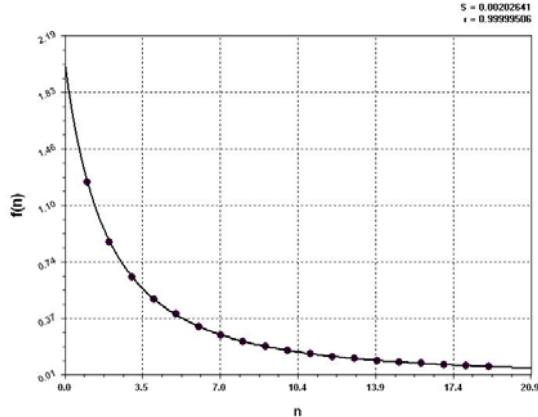


Figure 7 – Approximations of the transient process by the power function

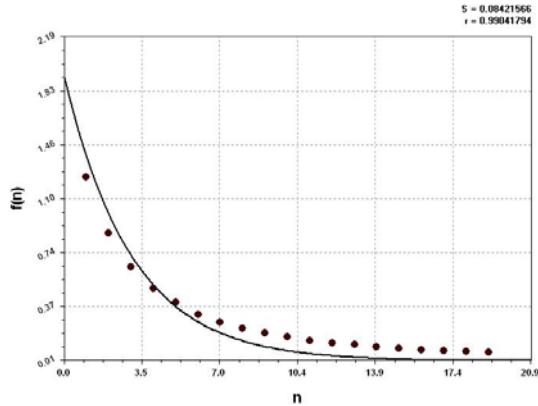


Figure 8 – Approximations of the transient process by the exponent function

As it can be seen from these graphs, the transient process is described by a fractional-rational function for the procedure (26).

An essential advantage of this approach is the ability to determine the required number of steps to achieve specified accuracy in determining the minimum value of the goal function. Indeed, it follows from (25) that for the initial value of the target function $f = f_0$ and the given value $f = f^*$ for a given λ we obtain the formula (28):

$$j_m = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{f^*}{f_0}. \quad (28)$$

The obtained expression allows us to estimate the time of finding the optimal solution.

Thus, it is possible to estimate the time of “learning” which is essential in planning the learning process.

The second essential point in the learning task is the concept of effective learning.

There are methods for evaluating learning outcomes, from simple assessments based on desirability scales to elaborate calculations, e.g., the ratio of the average score of trainees.

To have a true assessment, we use the following: suppose that the gross domestic product (GDP) depends on many factors, including the costs of education.

Then, having designated GDP as W and education costs as ε , we can determine the efficiency of education as a component of the series taking into account other costs χ by the formula (29):

$$W = W_0 + \frac{dW}{d\varepsilon} |_{\chi=const} \Delta\varepsilon + \dots + R. \quad (29)$$

Thus, we have the current value of GDP and the GDP derivative for educational expenditures, while other expenditures are constant, in fact, the assessment of the effectiveness of education is determined by the sensitivity of GDP to the costs of education by the formula (30):

$$\eta = \frac{dW}{d\varepsilon} |_{\chi=const}. \quad (30)$$

4 EXPERIMENTS

To carry out experimental studies, computer software was created, supplementing existing standard software, which allowed to implement the developed models of training procedures in practice and perform their expert evaluation.

The proposed software was applied consistently to all developed key models of training procedures.

The output test data for each key model of training procedures contained 100 data sets, as well as the values of the allowable number of steps and errors.

On the basis of the output test data, validity estimates of the models of the training procedures were obtained.

It was found that the real and reference values of the validity estimates for the developed models of dynamic training procedures coincide, taking into account the permissible errors.

5 RESULTS

After having completed the studies the following results were obtained.

1. The notion of “information flow” is justified as the sequence of messages carrying information, for building models of interactions in information systems.

2. The important property of the information flow is determined – the direction from the source to the receiver.

3. There are two possible options for information interaction of objects – the transfer and compensation of information.

4. The use of the principle of optimality for information learning processes is proposed.

5. It is shown that the dynamics of learning processes is determined by the characteristics of the used optimization procedure.

6. The gradient procedure for finding the extremum of the goal function is described by the autonomous motion of the dynamic system.

7. For a strictly convex goal function, according to sufficient optimality conditions, the optimization procedure is described by the dynamics of the autonomous motion of a stationary linear disconnected dynamic object.

8. The choice of the multiplier for the gradient significantly affects the dynamics of the process, and for a strictly convex target function the factor is equal to the increment vector.

9. The use of a dynamic model determines the number of steps required to achieve the given accuracy.

The created models received software implementation and were investigated in practice when solving the tasks of modeling the dynamics of training procedures in the teaching process of the Information Technologies Department of Kherson National Technical University.

Let's analyze the obtained demonstrative experimental data presented in Table 1, where the following types of trainees target categories are considered, depending on their academic performance: category A – “very strong”; category B – “strong”; category C – “medium”; category D – “weak”; category E – “very weak”; category F – “unsuccessful (receiving positive assessments only after retake)”.

As results, in Table 1 are presented: increment 1 – increment of saving time for passing training procedures by trainees; increment 2 – increment in the amount of learning by the trainee learning information; increment 3 – improving the quality of learners' learning information; increment 4 – increment of the integral indicator of the training procedures effectiveness (in scoring points).

Table 1 – Indicative fragment of the summary experimental data on the results of the research and development performed (with a sample size of 100)

№	Type of target trainees category	Specific number of trainees (in%)	Initial learning success (averaged value)	Trends in the success of training after applying the proposed modeling methods:			
				increment 1	increment 2	increment 3	increment 4
1	Category A	10	92	3	5	4	4
2	Category B	20	86	4	6	5	5
3	Category C	20	78	6	8	7	7
4	Category D	20	69	11	11	8	10
5	Category E	20	62	16	14	12	14
6	Category F	10	40	20	16	24	20
	Average for all categories	16,6	83,5	10	10	10	10

As can be seen from Table 1, the tendencies of the training success after applying the proposed modeling methods progress in a positive direction for all trainees target categories, while the improvement of the learning success is most pronounced for the more “weak” trainees.

6 DISCUSSION

It is important to note that the modeling methods proposed by the authors and the corresponding mathematical apparatus on the basis of information theory should be considered as complementary to existing ones, which we combine into an integral system for optimization modeling methodology of the activities procedures dynamics related to educational processes and training, in particular.

Questions on optimization modeling for the activity procedures dynamics in educational processes were considered by a number of other authors from the point of view of separately singled out aspects, such as: didactic and psychological-pedagogical, connected with the processes for feeding portions of teaching material and controlling the results of their assimilation; cognitive-communicative, using modern network computer technologies; socio-economic, etc.

Let's characterize some of the most revealing works that can be classified as research on optimization of activity procedures in the educational sphere, taking into account the dynamics factor.

The paper [15] raises the questions on dynamic modeling for the controlled process of competences acquisition by trainees on the basis of the cognitive modeling methodology, based on a valid assessment for the level of formation in the trainees competence.

In [16], carried out research and development in the field of mathematical modeling on professional orientation and knowledge control, taking into account the dynamics factor, based on the mathematical apparatus of deductive logical conclusion, fuzzy estimation methods, boundary-value problems for second-order differential equations such as Kolmogorov equations, probability theory, self-organization theory.

A complex of economic and mathematical models for mapping the demand dynamics on higher education institutions services based on logistic approaches, forecasting models, closed-loop control methodology, nonlinear dynamic modeling using iterative equations, reflexive control modeling using graph theory, is described in [17].

The peculiarity and uniqueness of this work is as follows.

The basis of the methods and mathematical models proposed by the authors is the concept of a comprehensive study of the learning process as an integral, purposeful dynamic information process that encompasses the entire spectrum for classes of interconnected activity procedures that form the given level of trainees knowledge, skills and habits as their “information richness” level.

Proceeding from the revealed specific features of the subject area corresponding to the chosen conceptual approach, the authors step-by-step selected and formed the mathematical modeling apparatus.

Thus, there is a situation where:

– in the works of several authors, the set of local aspects and aspects tied to individual parties of the education sector, for the general problem on modeling educational processes and procedures, taking into account the dynamics factor, is studied;

– a similar consideration for certain partial criteria at the moment does not give a sufficiently complete approximation to the general model;

– the methods and models proposed by the authors supplement the existing approaches, contributing a certain significant part, and, accordingly, contribute to a significant increase in the effectiveness of the educational process in accordance with Table 1, the integral indicator of the learning processes effectiveness increases by 10%.

As evidenced by the results of the experiments, with the increase in the dynamics of the training procedures within the established (allowed) situations of their implementation, the validity estimates of the proposed models remain within the established interval reference values (taking into account the permissible errors).

Along with the above, non-standard (force majeure) situations of learning processes and their dynamics require additional research and refinement of models.

CONCLUSIONS

The carried out experimental researches have allowed to confirm practically operability of the created mathematical apparatus and to consider it expedient for application with the purpose of increase of efficiency of modeling and realization of procedures of training.

The scientific novelty of the results is that for the first time the method in optimization modeling of the activity-based learning procedures dynamics on the basis of the information theory is proposed, which is based on the conceptual model of the learning process as an integral, purposeful dynamic information process represented by a full-scale complex of interrelated activity information procedures that form, on the whole, at a given level, the information base of knowledge, abilities and skills of trainees. The method makes it possible to obtain optimal, in accordance with a given accuracy, models for the behavior over time of gradient training procedures; in this case, it is possible to determine the number of steps necessary to achieve a given accuracy in obtaining the minimum for the objective function, as well as the time to find the optimal solution. This makes it possible: to shorten the time for students to undergo training procedures; increase the volume and improve the quality of assimilation by the trainee learning information. In turn, this allows students to receive higher scores.

Within the framework of the proposed method, basic principles and main mathematical models of dynamic training procedures are defined.

The practical significance of obtained results is that they allow to increase the productivity of training procedures.

Prospects for further research are seen in the coverage of more types of dynamic training procedures, optimizing approaches to their software implementations, and increasing the scale of their coverage with confirmatory experiments.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the scientific research project of Kherson National Technical University "Development of software for analysis of the organizational structure of the enterprise" (state registration number PK0116U005663) and by the international project 561728-EPP-1-2015-1-ES-EPPKA2-CBHE-JP "GameHub: University-enterprises cooperation in game industry in Ukraine" of International program Erasmus+ KA2 – Cooperation for innovation and the exchange of good practices – Capacity Building in the field of Higher Education.

REFERENCES

- Mitrofanov K. G., Zaytseva O. V. Primeneniya innovatsionnyih kompyuternyih tehnologiy v sfere obrazovaniya: osnovnyie aspekti i tendentsii, *Vestnik TGPU*, 2009, Vyip. 10 (88), pp. 64–68.
- Alsied S. M., Pathan M. M. The use of computer technology in EFL classroom: Advantages and implications, *International Journal of English Language and Translation Studies*, 2013, Vol. 1, Issue 1, April-June, pp. 61–71.
- Blurton C. New Directions of ICT – Use in Education. United National Education Science and Culture Organization (UNESCO), 1999.
- Viner N. Per. s angl. I. V. Soloveva i G. N. Povarova; Pod red. G. N. Povarova. Kibernetika, ili Upravlenie i syaz v zhivotnom i mashine. 2-e izdanie. Moscow, Nauka, Glavnaya redaktsiya izdaniy dlya zarubezhnyih stran, 1983, 344 p.
- Atanov G. A. Deyatelnostnyiy podhod v obuchenii. Donetsk, EAI press, 2001, 160 p.
- Chaplin J. P. Dictionary of Psychology. N.J., 1985, 528 p.
- Kolmogorov A. N. Teoriya informatsii i teoriya algoritmov. Moscow, Nauka, 1987, 304 p.
- Znanie [Elektronnyiy resurs]. Rezhim dostupa: dic.academic.ru.
- Esipov B. A. Metody optimizatsii i issledovaniya operatsiy: Uchebnoe posobie. Samara, Izd-vo. Samar. aerokosm. un-ta, 2007, 180 p.
- Chernorutskiy I. G. Metody optimizatsii v teorii upravleniya: Uchebnoe posobie. SPB, Peter, 2004, 256 p.
- Larlakov Yu. I. Doslizhennya operatsiy: Navchalnyi posyibnik. Harkiv, V.D. «INZhEK», 2005, 288 p.
- Panteleev A. V., Letova T. A. Metody optimizatsii v primerah i zadachah: Uchebnoe posobie. 2-e izdanie, ispravl. A. V. Panteleev. Moscow, Vyssh. shkola, 2005, 544 p.
- Kim D. P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. Tom 1. Lineynye sistemy. Moscow, Fizmatlit, 2003, 288 p.
- Vasilev F. P. Chislennyie metody resheniya ekstremalnyih zadach: Uchebnoe posobie dlya VUZov. – 2-e izdanie, pererab. i dop. Moscow, Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988, 552 s.
- Moskaleva S. S. Programmnaya podderzhka ekspertnoy otsenki kriteriev dlya postroeniya kognitivnoy modeli, *Obrazovatelnyie resursyi i tehnologii*, 2014, pp. 97–101.
- Samoylo I. V. Matematicheskie modeli i algoritmy professionalnoy orientatsii i upravleniya znaniyami: avtoref. dis. na soiskanie uchen. stepeni kand. tehn. nauk : spets. 05.13.10 "Upravlenie v sotsialnyih i ekonomicheskikh sistemah". Moscow, 2010, 25 p.
- Oharenko T. Yu. Modeliuvannia dynamiki popytu na posluhy vyschikyh navchalnykh zakladiv : avtoref. dys. na zdobutтя nauk. stupenia kand. ekon. nauk : spets. 08.00.11 "Matematichni metody, modeli ta informatsiini tekhnolohii v ekonomitsi." Zaporizhzhia, 2011, 23 p.

Received 23.05.2018.

Accepted 18.06.2018.

УДК 510.6

МОДЕЛІ ПРОЦЕДУР НАВЧАННЯ

Ходаков В. Є. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

Соколов А. Є. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

Веселовська Г. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету, Херсон, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу обґрунтування методів побудови моделей оптимізаційних процедур, як динамічних об'єктів, із урахуванням особливостей процедур навчання. Об'єктом дослідження є моделі динаміки процедур навчання. Мета роботи – розв'язування задач формалізації процедур навчання, розробки методів побудови математичних моделей процесів навчання, процесів пошуку оптимуму задач навчання, для оцінки динамічних процедур навчання.

Метод. Процес навчання – це сукупність послідовних і взаємопов'язаних дій того, хто навчає, та тих, кого навчають, спрямованих на забезпечення свідомого та міцного засвоєння знань, умінь, навичок. У результаті систематичного аналізу, визначені основні, базові закономірності процедур навчання. Обґрунтоване поняття «інформаційний потік», як послідовність повідомлень, що несуть інформацію, для побудови моделей взаємодії в інформаційних системах. Визначено важливу властивість інформаційного потоку – напрямок від джерела до приймача. Виділені два можливих варіанти інформаційної взаємодії об'єктів – передача та компенсація інформації. Запропоноване використання принципу оптимальності для інформаційних процесів навчання. Показано, що динаміка процесів навчання визначається характеристиками використовуваної оптимізаційної процедури. Градієнтна процедура пошуку екстремуму функції мети описується автономним рухом динамічної системи. Для строго опуклої функції мети, згідно достатніх умов оптимальності, процедура оптимізації описується динамікою автономного руху стаціонарного лінійного незв'язаного динамічного об'єкту. Вибір множника для градієнту істотно впливає на динаміку процесу, та для строго опуклої функції мети множник дорівнює вектору збільшень. Використання динамічної моделі визначає необхідну кількість кроків досягнення заданої точності.

Результати. Створені моделі отримали програмну реалізацію та були досліджені на практиці при розв'язуванні задач моделювання динаміки процедур навчання в навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Херсонського національного технічного університету.

Висновки. Виконані експериментальні дослідження дозволили практично підтвердити працевздатність створеного математичного апарату та вважати його доцільним для застосування з метою підвищення ефективності моделювання та реалізації процедур навчання. Подальші перспективи проведених досліджень бачаться в охопленні більшої кількості видів динамічних

процедур навчання, оптимізації підходів до їхніх програмних реалізацій, збільшенню масштабності їхнього охоплення підтвердженувальними експериментами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: навчання, формалізація процедур навчання, вчитель, той, хто навчається, інформаційний потік, оптимізаційні процедури.

УДК 510.6

МОДЕЛИ ПРОЦЕДУР ОБУЧЕНИЯ

Ходаков В. Е. – д-р техн. наук, професор, заведуючий кафедрой информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

Соколов А. Е. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

Веселовская Г. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета, Херсон, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальність. Рассмотрена задача обоснования методов построения моделей оптимизационных процедур, как динамических объектов, с учетом особенностей процедур обучения. Объектом исследования являлись модели динамики процедур обучения. Цель работы – решение задач формализации процедур обучения, разработки методов построения математических моделей процессов обучения, процессов поиска оптимума задач обучения, для оценки динамических процедур обучения.

Метод. Процесс обучения – это совокупность последовательных и взаимосвязанных действий обучающего и обучаемых, направленных на обеспечение сознательного и прочного усвоения знаний, умений, навыков. В результате систематического анализа, определены основные, базовые закономерности процедур обучения. Обосновано понятие «информационный поток», как последовательность сообщений, несущих информацию, для построения моделей взаимодействий в информационных системах. Определено важное свойство информационного потока – направление от источника к приемнику. Выделены два возможных варианта информационного взаимодействия объектов – передача и компенсация информации. Предложено использование принципа оптимальности для информационных процессов обучения. Показано, что динамика процессов обучения определяется характеристиками используемой оптимизационной процедуры. Градиентная процедура поиска экстремума функции цели описывается автономным движением динамической системы. Для строго выпуклой функции цели, согласно достаточным условиям оптимальности, процедура оптимизации описывается динамикой автономного движения стационарного линейного несвязанного динамического объекта. Выбор множителя для градиента существенно влияет на динамику процесса, и для строго выпуклой функции цели множитель равен вектору приращений. Использование динамической модели определяет необходимое число шагов достижения заданной точности.

Результаты. Созданные модели получили программную реализацию и были исследованы на практике при решении задач моделирования динамики процедур обучения в учебном процессе кафедры информационных технологий Херсонского национального технического университета.

Выводы. Выполненные экспериментальные исследования позволили практически подтвердить работоспособность созданного математического аппарата и считать его целесообразным для применения с целью повышения эффективности моделирования и реализации процедур обучения. Дальнейшие перспективы проведенных исследований видятся в охвате большего количества видов динамических процедур обучения, оптимизации подходов к их программным реализациям, увеличению масштабности их охвата подтверждающими экспериментами.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: обучение, формализация процедур обучения, учитель, учащийся, информационный поток, оптимизационные процедуры.

ЛІТЕРАТУРА/ЛІТЕРАТУРА

1. Митрофанов К. Г. Применения инновационных компьютерных технологий в сфере образования: основные аспекты и тенденции / К. Г. Митрофанов, О. В. Зайцева // Вестник ТГПУ. – 2009. – Вып. 10 (88). – С. 64–68.
2. Alsied S. M. The use of computer technology in EFL classroom: Advantages and implications / S. M. Alsied, M. M. Pathan // International Journal of English Language and Translation Studies. – 2013. – Vol. 1, Issue 1, April-June. – P. 61–71.
3. Blurton C. New Directions of ICT – Use in Education / C. Blurton. – United National Education Science and Culture Organization (UNESCO), 1999.
4. Винер Н. Кибернетика, или Управление и связь в животном и машине. – 2-е издание / Н. Винер; Пер. с англ. И. В. Соловьева и Г. Н. Поварова; Под ред. Г. Н. Поварова. – М. : Наука; Главная редакция изданий для зарубежных стран, 1983. – 344 с.
5. Атанов Г. А. Деятельностный подход в обучении / Г. А. Атанов. – Донецк : ЕАИ пресс, 2001. – 160 с.
6. Chaplin J. P. Dictionary of Psychology / J. P. Chaplin. – N.J., 1985. – 528 р.
7. Колмогоров А. Н. Теория информации и теория алгоритмов / А. Н. Колмогоров. – М. : Наука, 1987. – 304 с.
8. Знание [Электронный ресурс]. – Режим доступа: dic.academic.ru.
9. Есипов Б. А. Методы оптимизации и исследования операций: Учебное пособие / Б. А. Есипов – Самара : Изд-во. Самар. аэрокосм. ун-та, 2007. – 180 с.
10. Черноруцкий И. Г. Методы оптимизации в теории управления : учебн. пособие / И. Г. Черноруцкий. – СПБ : Питер, 2004. – 256 с.
11. Ларіонов Ю. І. Дослідження операцій : навч. пос. / Ю. І. Ларіонов. – Харків : В. Д. «ІНЖЕК», 2005. – 288 с.
12. Пантелеев А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах : учебн. пос. – 2-е издание, исправл. / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М. : Вищ. школа, 2005. – 544 с.
13. Кім Д. П. Теорія автоматичного управління. Том 1. Лінійні системи / Д. П. Кім. – М. : Фізматлит, 2003. – 288 с.
14. Васильев Ф. П. Численные методы решения экстремальных задач : учебн. пособие для ВУЗов. – 2-е издание, перераб. и доп. / Ф. П. Васильев. – М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 552 с.
15. Москалева С. С. Программная поддержка экспертной оценки критериев для построения когнитивной модели / С. С. Москалева // Образовательные ресурсы и технологии. – 2014. – С. 97–101.
16. Самойло И. В. Математические модели и алгоритмы профессиональной ориентации и управления знаниями: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук : спец. 05.13.10 «Управление в социальных и экономических системах» / И. В. Самойло. – М. ;, 2010. – 25 с.
17. Огаренко Т. Ю. Моделювання динаміки попиту на послуги вищих навчальних закладів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. екон. наук : спец. 08.00.11 «Математичні методи, моделі та інформаційні технології в економіці» / Т. Ю. Огаренко. – Запоріжжя, 2011. – 23 с.

АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ ДВУХ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ГИПЕРЭРЛАНГОВСКИМИ ВХОДНЫМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ

Тарасов В. Н. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения и управления в технических системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Российской Федерации.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена задача вывода решения для среднего времени ожидания в очереди в замкнутой форме для обычной системы с гиперэрланговскими входными распределениями второго порядка и системы со сдвинутыми гиперэрланговскими входными распределениями.

Цель работы. Получение решения для основной характеристики системы – среднего времени ожидания требований в очереди для системы массового обслуживания типа G/G/1 с обычными и со сдвинутыми с гиперэрланговскими входными распределениями второго порядка.

Метод. Для решения поставленной задачи использован классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли, который позволяет получить решение для среднего времени ожидания для рассматриваемых систем в замкнутой форме. Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли занимает важную часть теории систем G/G/1. Для практического применения полученных результатов использован известный метод моментов теории вероятностей.

Результаты. Впервые получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для обеих систем, с помощью которых выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для вышеуказанных систем в замкнутой форме. Такой подход позволяет рассчитать среднее время ожидания для указанных систем в математических пакетах для широкого диапазона изменения параметров трафика. Все остальные характеристики систем являются производными от среднего времени ожидания.

Выводы. Показано, что гиперэрланговский закон распределения второго порядка, как и гиперэкспоненциальный, являющийся трехпараметрическим, может определяться как двумя первыми моментами, так и тремя первыми моментами. Выбор такого закона распределения вероятностей обусловлен тем, что его коэффициент вариации охватывает более широкий диапазон, чем у гиперэкспоненциального распределения. Для сдвинутого гиперэрланговского закона распределения коэффициент вариации охватывает еще более широкий диапазон, чем у обычного. Введение сдвинутых во времени распределений расширяет область применения СМО с учетом известного факта из теории массового обслуживания, что среднее время ожидания связано с коэффициентами вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания квадратичной зависимостью. Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли для системы массового обслуживания с гиперэрланговскими входными распределениями второго порядка позволяет получить решение в замкнутой форме и это решение публикуется впервые. Полученное решение дополняет и расширяет известную формулу теории массового обслуживания для среднего времени ожидания требований в очереди для системы массового обслуживания типа G/G/1.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гиперэрланговский закон распределения, интегральное уравнение Линдли, метод спектрального разложения, преобразование Лапласа.

АББРЕВИАТУРЫ

ИУЛ – интегральное уравнение Линдли;

СМО – система массового обслуживания;

G/G/1 – СМО с произвольными законами распределений интервалов между поступлениями требований и времени обслуживания;

ФРВ – функция распределения вероятностей.

НОМЕНКЛАТУРА

$a(t)$ – функция плотности распределения интервалов между поступлениями требований;

$A^*(s)$ – преобразование Лапласа функции $a(t)$;

$b(t)$ – функция плотности распределения времени обслуживания;

$B^*(s)$ – преобразование Лапласа функции $b(t)$;

$C(u)$ – ФРВ случайной величины $\tilde{u} = \tilde{x} - \tilde{t}$;

c_λ – коэффициент вариации интервалов поступлений требований;

© Тарасов В. Н., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-6

c_μ – коэффициент вариации времени обслуживания;

D_λ – дисперсия случайного интервала между поступлениями;

D_μ – дисперсия времени обслуживания;

H_2 – гиперэрланговский закон распределения второго порядка;

H_2^- – сдвинутое гиперэрланговское распределение;

H_2 – гиперэкспоненциальный закон распределения второго порядка;

\bar{I} – среднее значение периода простоя;

\bar{I}^2 – второй начальный момент периода простоя;

p – параметр гиперэрланговского закона распределения входного потока;

q – параметр гиперэрланговского закона распределения времени обслуживания;

\bar{W} – среднее время ожидания в очереди;
 $W^*(s)$ – преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания;
 $W(y)$ – ФРВ времени ожидания требования в очереди;
 \tilde{x} – случайное время обслуживания требования;
 \tilde{t} – случайный интервал времени между поступлениями требований;
 z – любое число из интервала $(-1, 1)$.
 λ – интенсивность входного потока;
 λ_1, λ_2 – параметры гиперэрланговского закона распределения входного потока;
 μ – интенсивность обслуживания;
 μ_1, μ_2 – параметры гиперэрланговского закона распределения времени обслуживания
 ρ – коэффициент загрузки системы;
 $\bar{\tau}_\lambda$ – средний интервал между поступлениями требований;
 $\bar{\tau}_\mu$ – среднее время обслуживания;
 $\Phi_+(s)$ – преобразование Лапласа ФРВ времени ожидания;
 $\psi_+(s)$ – первая компонента спектрального разложения;
 $\psi_-(s)$ – вторая компонента спектрального разложения;
 $\chi(t)$ – характеристическая функция случайной величины ξ с произвольной функцией распределения $C(t)$.

ВВЕДЕНИЕ

Для моделирования трафика современных сетей телекоммуникаций широко используются экспоненциальные распределения, куда входят распределения Вейбулла, гамма, логнормальное, гиперэкспоненциальное, гиперэрланговское и др., у которых при определенных значениях параметров коэффициенты вариации случайных величин больше или равны 1 ($c_\tau \geq 1$) или же меньше 1 ($c_\tau < 1$). Коэффициент вариации, больший 1 свидетельствует о том, что вероятность появления больших значений случайной величины значительно выше, чем у классического экспоненциального распределения, а меньший 1 – наоборот.

Как известно, например, из [1], для системы G/G/1 среднее время ожидания определяется выражением

$$\bar{W} = \frac{D_\lambda + D_\mu + (1-\rho)^2 / \lambda^2}{2(1-\rho) / \lambda} - \frac{\bar{I}^2}{2\bar{I}}. \quad (1)$$

Следовательно, первое слагаемое в правой части (1) связано с коэффициентами вариаций интервалов поступления и обслуживания квадратичной зависимостью. Второе слагаемое в правой части (1) остается в общем случае неизвестным и вполне вероятно, что оно может зависеть от моментов интервалов поступления и

времени обслуживания более высокого порядка, чем первые два. Поэтому при анализе СМО G/G/1 необходимо учитывать не только первые два момента случайных интервалов времен поступления и обслуживания, но и моменты более высокого порядка.

Теперь перейдем к определению гиперэрланговского закона распределения. Распределение с плотностью

$$f(t) = \begin{cases} \sum_{i=1}^R \alpha_i \frac{k_i \lambda_i (k_i \lambda_i t)^{k_i-1}}{(k_i-1)!} e^{-k_i \lambda_i t}, & t > 0 \\ 0, & t \leq 0 \end{cases}, \quad \sum_{i=1}^R \alpha_i = 1$$

называют гиперэрланговским порядка R и обозначают НЕ_R [1]. Гиперэрланговское распределение представляет собой вероятностную смесь нормированных распределений Эрланга порядка k с функцией плотности вида $f_k(t) = \frac{k \lambda (k \lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-k \lambda t}$ и является наиболее общим распределением неотрицательных непрерывных случайных величин, поскольку имеет коэффициент вариации c_τ в интервале от 0 до ∞ [5].

В данной работе мы ограничимся гиперэрланговским распределением 2-го порядка при $k_i = 2$ с функцией плотности

$$f(t) = 4\rho \lambda_1^2 t e^{-2\lambda_1 t} + 4(1-\rho) \lambda_2^2 t e^{-2\lambda_2 t}. \quad (2)$$

в связи с тем, что при $k_i \geq 3$ дальнейшие выкладки становятся чрезвычайно трудоемкими.

Как будет показано ниже, коэффициент вариации для такого распределения $c_\tau > 1/\sqrt{2}$. Распределение (2) в научной литературе обозначают через НЕ₂. Оно содержит три параметра $0 < \rho < 1$, $\lambda_1, \lambda_2 > 0$ и таким образом, позволяет аппроксимировать произвольные входные распределения на уровне трех первых моментов с использованием известного метода моментов. Ниже будет показано, что распределение НЕ₂, как и НЕ₂ однозначно может определяться как двумя, так и тремя первыми моментами.

Объектом исследования является СМО типа G/G/1.

Предметом исследования является среднее время ожидания в обычной системе НЕ₂/НЕ₂/1 и в системе НЕ₂/НЕ₂/1 со сдвинутыми гиперэрланговскими входными распределениями.

Целью работы является получение решения в замкнутой форме для основной характеристики системы – среднего времени ожидания требований в очереди для обычной системы массового обслуживания НЕ₂/НЕ₂/1 и НЕ₂/НЕ₂/1 со сдвинутыми с гиперэрланговскими входными распределениями второго порядка.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе ставится задача нахождения решения для времени ожидания требований в очереди в СМО

НЕ₂/НЕ₂/1 и построения механизма аппроксимации произвольных законов распределений гиперэрланговским.

Для исследования системы G/G/1 как известно, например, из [1–4], используется интегральное уравнение Линдли. Одна из форм уравнения Линдли выглядит так:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0; \\ 0, & y < 0. \end{cases}$$

Важно заметить, что такая интегральная форма уравнения Линдли имеет место только для неотрицательных значений аргумента y , т.к. для отрицательных значений аргумента функция $W(y) \equiv 0$.

При кратком изложении метода решения ИУЛ будем придерживаться подхода и символики автора [1], как это было проделано в работах автора [6, 7] с гиперэкспоненциальными входными распределениями. Для этого через $A^*(s)$ и $B^*(s)$ обозначим преобразования Лапласа функций плотности распределения интервалов между поступлениями и времени обслуживания соответственно. Суть решения ИУЛ методом спектрального разложения состоит в нахождении для выражения $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1$ представления в виде произведения двух множителей, которое давало бы рациональную функцию от s . Следовательно, для нахождения закона распределения времени ожидания необходимо следующее спектральное разложение: $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$, где $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ некоторые рациональные функции от s , которые можно разложить на множители. Функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны удовлетворять следующим условиям согласно [1]:

1. для $\operatorname{Re}(s) > 0$ функция $\psi_+(s)$ является аналитической без нулей в этой полуплоскости;
2. для $\operatorname{Re}(s) < D$ функция $\psi_-(s)$ является аналитической без нулей в этой полуплоскости, D – некоторая положительная константа, определяемая из условия:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{a(t)}{e^{-Dt}} < \infty.$$

Кроме того, функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ должны обладать следующими свойствами:

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \operatorname{Re}(s) > 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1; \quad \lim_{|s| \rightarrow \infty, \operatorname{Re}(s) < D} \frac{\psi_-(s)}{s} = -1. \quad (4)$$

Построение функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ с учетом условий (3) и (4) будет продемонстрировано ниже.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Используемый в работе метод спектрального разложения решения ИУЛ впервые подробно представлен в классике теории массового обслуживания [1], а впоследствии применялся во многих работах, включая [2, 3]. Другой подход к решению ИУЛ использован в [4]. Здесь вместо термина «спектральное разложение» использована факторизация, а вместо функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ – компоненты факторизации $\omega_+(z, t)$ и $\omega_-(z, t)$ функции $1 - z \cdot \chi(t)$. Такой подход для получения конечных результатов для системы НЕ₂/НЕ₂/1 менее удобен, чем подход, описанный в [1] и проиллюстрированный многочисленными примерами.

Метод спектрального разложения решения ИУЛ также применен для исследования систем с гиперэкспоненциальными входными распределениями в работах [6–8]. В то же время, научной литературе, включая web-ресурсы специализированных журналов [13, 14], автору не удалось обнаружить результаты по времени ожидания для СМО с гиперэрланговскими входными распределениями 2-го порядка общего вида (2).

Кроме того, в научной литературе нет упоминаний о СМО со сдвинутыми входными распределениями, или же другими словами СМО с запаздыванием во времени. Впервые результаты по СМО с запаздыванием для классической системы М/М/1 со сдвинутыми экспоненциальными распределениями опубликованы в работе автора [9]. Результаты [9] позволили развить теорию метода спектрального разложения решения ИУЛ на смеси сдвинутых вправо от нулевой точки нормированных распределений Эрланга, т.е. на сдвинутое гиперэрланговское распределение. Таким образом, в основу данной статьи легли работы [1, 6, 9].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В СМО НЕ₂/НЕ₂/1, интервалы между соседними требованиями входного потока распределены по закону:

$$a(t) = 4p\lambda_1^2 te^{-2\lambda_1 t} + 4(1-p)\lambda_2^2 te^{-2\lambda_2 t}, \quad (5)$$

а время обслуживания –

$$b(t) = 4q\mu_1^2 te^{-2\mu_1 t} + 4(1-q)\mu_2^2 te^{-2\mu_2 t}. \quad (6)$$

Преобразование Лапласа функции (5) имеет вид:

$$A^*(s) = p \left(\frac{2\lambda_1}{s + 2\lambda_1} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{s + 2\lambda_2} \right)^2, \quad (7)$$

а функции (6) –

$$B^*(s) = q \left(\frac{2\mu_1}{s + 2\mu_1} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{s + 2\mu_2} \right)^2. \quad (8)$$

Перейдем к определению спектрального разложения решения ИУЛ в виде отношения двух рациональных функций $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s)/\psi_-(s)$ в случае распределений (5) и (6) с учетом преобразований Лапласа (7) и (8), а сами функции $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ в отдельности могут быть определены только после получения полного разложения. Получим следующее выражение для отношения:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s} \right)^2 \right] \times \\ \times \left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1 + s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2 + s} \right)^2 \right] - 1.$$

Первый сомножитель в правой части в квадратных скобках равен:

$$\left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1 - s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2 - s} \right)^2 \right] = \\ = \frac{p(16\lambda_1^2\lambda_2^2 - 16\lambda_1^2\lambda_2s + 4\lambda_1^2s^2)}{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2} + \\ + \frac{(1-p)(16\lambda_1^2\lambda_2^2 - 16\lambda_1\lambda_2^2s + 4\lambda_2^2s^2)}{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2} = \\ = \frac{a_0 - a_1s + a_2s^2}{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2},$$

здесь использованы промежуточные параметры $a_0 = 16\lambda_1^2\lambda_2^2$, $a_1 = 16\lambda_1\lambda_2[p\lambda_1 + (1-p)\lambda_2]$, $a_2 = 4[p\lambda_1^2 + (1-p)\lambda_2^2]$.

Аналогично представим второй сомножитель:

$$\left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1 + s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2 + s} \right)^2 \right] = \\ = \frac{q(16\mu_1^2\mu_2^2 + 16\mu_1^2\mu_2s + 4\mu_1^2s^2)}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} + \\ + \frac{(1-q)(16\mu_1^2\mu_2^2 + 16\mu_1\mu_2^2s + 4\mu_2^2s^2)}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} = \\ = \frac{b_0 + b_1s + b_2s^2}{(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2},$$

здесь использованы промежуточные параметры $b_0 = 16\mu_1^2\mu_2^2$, $b_1 = 16\mu_1\mu_2[q\mu_1 + (1-q)\mu_2]$, $b_2 = 4[q\mu_1^2 + (1-q)\mu_2^2]$.

Тогда искомое выражение для спектрального разложения будет иметь вид:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{(a_0 - a_1s + a_2s^2)(b_0 + b_1s + b_2s^2)}{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2} - \\ - \frac{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}{(2\lambda_1 - s)^2(2\lambda_2 - s)^2(2\mu_1 + s)^2(2\mu_2 + s)^2}. \quad (9)$$

Многочлен в числителе в правой части разложения (9) как правило всегда имеет один нуль $s=0$ [1]. В данном случае свободный член разложения также равен 0: $a_0b_0 - 256\lambda_1^2\lambda_2^2\mu_1^2\mu_2^2 \equiv 0$. В числителе дроби в правой части разложения получили многочлен восьмой степени $-s(s^7 - c_6s^6 - c_5s^5 - c_4s^4 - c_3s^3 - c_2s^2 - c_1s - c_0)$, коэффициенты которого равны:

$$c_0 = a_0b_1 - a_1b_0 - 256\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2[\lambda_1\lambda_2(\mu_1 + \mu_2) - \mu_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2)], \\ c_1 = a_0b_2 - a_1b_1 + a_2b_0 - 64[\lambda_1^2\lambda_2^2(\mu_1^2 + \mu_2^2) + \mu_1^2\mu_2^2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)] - 256\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2 \times \\ \times (\lambda_1\lambda_2 - \lambda_1\mu_1 - \lambda_1\mu_2 - \lambda_2\mu_1 - \lambda_2\mu_2 + \mu_1\mu_2), \\ c_2 = a_2b_1 - a_1b_2 - 64\{[\lambda_1^2\lambda_2^2 + \mu_1\mu_2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2)] \times \\ \times (\mu_1 + \mu_2) - (\lambda_1^2\lambda_2 + \lambda_1\lambda_2^2)(\mu_1^2 + \mu_2^2) + \mu_1^2\mu_2^2(\lambda_1 + \lambda_2)\} + 256\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2(\lambda_1 + \lambda_2 - \mu_1 - \mu_2), \\ c_3 = a_2b_2 - 16[\lambda_1^2\lambda_2^2 + \mu_1^2\mu_2^2 + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2)(\mu_1^2 + \mu_2^2)] + 64[(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2)(\lambda_1\lambda_2 + \mu_1\mu_2) - \lambda_1\lambda_2(\mu_1^2 + \mu_2^2) - \mu_1\mu_2(\lambda_1^2 + \lambda_2^2) - 4\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2], \\ c_4 = 16[(\lambda_1 + \lambda_2)(\lambda_1\lambda_2 + 4\mu_1\mu_2) - (\mu_1 + \mu_2) \times \\ \times (\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + 4\lambda_1\lambda_2 + \mu_1\mu_2) + (\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1^2 + \mu_2^2)], \\ c_5 = 16[(\lambda_1 + \lambda_2)(\mu_1 + \mu_2) - \lambda_1\lambda_2 - \mu_1\mu_2 - 4(\lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \mu_1^2 + \mu_2^2)], \\ c_6 = 4(\lambda_1 + \lambda_2 - \mu_1 - \mu_2). \quad (10)$$

Данные коэффициенты получены с помощью выполнения символьных операций математического пакета Mathcad над числителем разложения (9), т.к. в числителе разложения получается 90 слагаемых, и вручную обработать и привести подобные члены после раскрытия скобок довольно проблематично. Возможно поэтому эта задача решалась впервые.

Выделим многочлен в числителе разложения

$$s^7 - c_6s^6 - c_5s^5 - c_4s^4 - c_3s^3 - c_2s^2 - c_1s - c_0, \quad (11)$$

т.к. определение его корней и работа с ними является важным моментом метода спектрального разложения решения ИУЛ.

Исследование многочлена (11) с коэффициентами (9) с использованием формул Виетта подтверждает наличие четырех отрицательных действительных корней либо двух отрицательных действительных

корней и двух комплексно сопряженных корней с отрицательными вещественными частями, а также трех положительных действительных корней либо одного положительного и двух комплексно сопряженных корней с положительными вещественными частями. Исследуем знак младшего коэффициента многочлена (11). После несложных преобразований получим

$$c_0 = 256\lambda_1\lambda_2\mu_1\mu_2\{\mu_1\mu_2[p\lambda_2 + (1-p)\lambda_1] + \\ + \lambda_1\lambda_2[q\mu_2 + (1-q)\mu_1]\},$$

следовательно, $c_0 > 0$. С учетом знака минус в многочлене перед коэффициентом c_0 , формулы Виетта не противоречат факту наличия четырех отрицательных корней у многочлена (11). В общем же случае, наличие таких корней следует из существования и единственности спектрального разложения [1] или же факторизации [4].

Обозначив корни многочлена (11) с отрицательными вещественными частями для удобства через $-s_1, -s_2, -s_3, -s_4$, а с положительными вещественными частями через s_5, s_6, s_7 , отношение $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ окончательно можно разложить на следующие множители:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{-s(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)(s-s_5)(s-s_6)(s-s_7)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(2\mu_1+s)^2(2\mu_2+s)^2}.$$

Поэтому с учетом условий (3), (4) за функцию $\psi_+(s)$ примем

$$\psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}{[(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2]},$$

т.к. нули многочлена (11): $s = 0, -s_1, -s_2, -s_3, -s_4$, и полюсы $s = -2\mu_1, s = -2\mu_2$ лежат в области $\text{Re}(s) \leq 0$, а за функцию

$$\psi_-(s) = -(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2 / [(s-s_5)(s-s_6)(s-s_7)].$$

Теперь выполнение условия (3) для построенных функций $\psi_+(s)$ и $\psi_-(s)$ очевидно. Это подтверждает и рисунок, где отображены нули и полюсы отношения $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ на комплексной s – плоскости для исключения ошибок построения спектрального разложения. На рисунке полюсы отмечены крестиками, а нули – кружками.

Теперь остается проверить выполнение условий (4): имеем $\lim_{|s| \rightarrow \infty} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1$; $\lim_{|s| \rightarrow \infty} \frac{\psi_-(s)}{s} = \lim_{|s| \rightarrow \infty} \frac{-24s}{24s} = -1$, следовательно, условия (4) для построения спектрального разложения также выполнены.

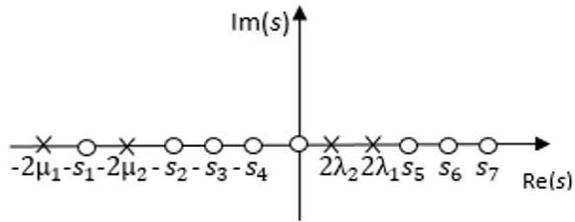


Рисунок 1 – Нули и полюсы функции $\psi_+(s)/\psi_-(s)$ для системы НЕ₂/НЕ₂/1

Далее по методике спектрального разложения определим постоянную

$$K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}{(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2} = \frac{s_1s_2s_3s_4}{16\mu_1^2\mu_2^2}.$$

Постоянная K определяет вероятность того, что поступающее в систему требование застает ее свободной. Функция $\psi_+(s)$ позволяет найти преобразование Лапласа ФРВ времени ожидания $W(y)$:

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{s_1s_2s_3s_4(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}.$$

Следовательно, преобразованием Лапласа для функции плотности времени ожидания будет функция $s \cdot \Phi_+(s)$, т.е.

$$W^*(s) = \frac{s_1s_2s_3s_4(s+2\mu_1)^2(s+2\mu_2)^2}{16\mu_1^2\mu_2^2(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)}. \quad (12)$$

Среднее время ожидания в очереди равно значению производной от преобразования Лапласа (12) функции плотности со знаком минус в точке $s=0$:

$$\left. -\frac{dW^*(s)}{ds} \right|_{s=0} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \frac{1}{s_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}.$$

Окончательно, среднее время ожидания в очереди для СМО НЕ₂/НЕ₂/1:

$$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \frac{1}{s_4} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}. \quad (13)$$

Из выражения (13) также можно определить дисперсию времени ожидания. Вторая производная от преобразования (13) в точке $s=0$ дает второй начальный момент времени ожидания, что позволяет определить дисперсию времени ожидания. Учитывая определение джиттера в телекоммуникациях как разброс времени ожидания [10], тем самым получим возможность его определения через дисперсию. Это является важным результатом для анализа трафика, чувствительного к задержкам.

Теперь перейдем к задаче аппроксимации закона распределения (5) по аналогии с [11, 12] с использованием двух первых моментов. Для этого воспользуемся свойством преобразования Лапласа воспроизведения моментов и запишем начальные моменты до второго порядка для распределения (5):

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}, \quad (14)$$

$$\overline{\tau_\lambda^2} = \frac{3}{2} \left[\frac{p}{\lambda_1^2} + \frac{(1-p)}{\lambda_2^2} \right]. \quad (15)$$

Рассматривая равенства (14) и (15) как запись метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (5) λ_1, λ_2, p . Система двух уравнений (14), (15) при этом является недоопределенной, поэтому к ней добавим выражение для квадрата коэффициента вариации:

$$c_\lambda^2 = \frac{\overline{\tau_\lambda^2} - (\bar{\tau}_\lambda)^2}{(\bar{\tau}_\lambda)^2}, \quad (16)$$

как связующее условие между (14) и (15). Кроме того, коэффициент вариации будем использовать в расчетах в качестве входного параметра системы.

Исходя из вида уравнения (14) положим

$$\lambda_1 = 2p/\bar{\tau}_\lambda, \lambda_2 = 2(1-p)/\bar{\tau}_\lambda \quad (17)$$

и потребуем выполнения условия (16). Подставив выражения (14), (15) и частное решение (17) в (16) и решив уравнение относительно параметра p , выберем

одно нужное значение: $p = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{2(1+c_\lambda^2)-3}{8(1+c_\lambda^2)}}$. Отсюда

следует, что коэффициент вариации $c_\lambda > 1/\sqrt{2}$. Таким образом, получено частное решение недоопределенной системы уравнений (14) и (15) методом подбора. Аналогично поступив с законом распределения (6), определяем его неизвестные параметры μ_1, μ_2, q .

Такой же подход к аппроксимации законов распределения гиперэкспоненциальным распределением применен в работах автора [5–7]. Таким образом, гиперэрланговский закон распределения может определяться полностью двумя первыми моментами и перекрывать весь диапазон изменения коэффициента вариации от $1/\sqrt{2}$ до ∞ , что шире, чем у гиперэкспоненциального распределения $(1, \infty)$.

Учитывая тот факт, что распределение HE_2 является трехпараметрическим, аппроксимацию можно выполнить и на уровне трех первых моментов. Для этого запишем выражения для начального момента третьего порядка, полученное через преобразование Лапласа (7):

$$\overline{\tau_\lambda^3} = \frac{3p}{\lambda_1^3} + \frac{3(1-p)}{\lambda_2^3}. \quad (18)$$

Теперь присоединив уравнение (18) к уравнениям моментов (14) и (15) и решив систему трех нелинейных уравнений с тремя неизвестными в пакете Mathcad находим все три параметра. Как показано в работе [5] на примере гиперэкспоненциальных входных рас-

пределений, аппроксимация с использованием двух первых моментов в отличие от трех моментов, может занижать величину среднего времени ожидания до 10% в зависимости от загрузки и величины третьего момента.

Перейдем к исследованию системы $\text{HE}_2/\text{HE}_2/1$ со сдвинутыми входными распределениями, т.е. к системе с запаздыванием во времени.

Рассмотрим систему, образованную двумя потоками с функциями плотностей распределения интервалов вида:

– для входного потока

$$a(t) = 4p\lambda_1^2(t-t_0)e^{-2\lambda_1(t-t_0)} + 4(1-p)\lambda_2^2(t-t_0)e^{-2\lambda_2(t-t_0)}, \quad (19)$$

– для времени обслуживания

$$b(t) = 4q\mu_1^2(t-t_0)e^{-2\mu_1(t-t_0)} + 4(1-q)\mu_2^2(t-t_0)e^{-2\mu_2(t-t_0)}. \quad (20)$$

Такую систему обозначим через $\text{HE}_2^-/\text{HE}_2^-/1$.

Нас интересует среднее время ожидания для системы $\text{HE}_2^-/\text{HE}_2^-/1$.

Утверждение. Спектральное разложение $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s)/\psi_-(s)$ для системы с запаздыванием $\text{HE}_2^-/\text{HE}_2^-/1$ имеет точно такой же вид, что и для обычной системы $\text{HE}_2/\text{HE}_2/1$:

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \frac{-s(s+s_1)(s+s_2)(s+s_3)(s+s_4)(s-s_5)(s-s_6)(s-s_7)}{(2\lambda_1-s)^2(2\lambda_2-s)^2(2\mu_1+s)^2(2\mu_2+s)^2}.$$

Доказательство. Для системы $\text{HE}_2^-/\text{HE}_2^-/1$ спектральное разложение будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} &= \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1-s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2-s} \right)^2 \right] e^{t_0 s} \times \\ &\quad \times \left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1+s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2+s} \right)^2 \right] e^{-t_0 s} - 1 = \\ &= \left[p \left(\frac{2\lambda_1}{2\lambda_1-s} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{2\lambda_2-s} \right)^2 \right] \times \\ &\quad \times \left[q \left(\frac{2\mu_1}{2\mu_1+s} \right)^2 + (1-q) \left(\frac{2\mu_2}{2\mu_2+s} \right)^2 \right] - 1. \end{aligned}$$

Здесь показатели степени у экспонент обнуляются и тем самым операция сдвига в спектральном разложении полностью нивелируется. Таким образом, спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для двух систем совпадают. Утверждение доказано.

Теперь мы можем воспользоваться для новой системы результатами для обычной системы $\text{HE}_2/\text{HE}_2/1$, но прежде необходимо определить числовые характеристики распределений (19) и (20). Для этого воспользуемся свойством преобразования Лапласа про-

изводить моменты. Преобразование Лапласа функции (19) имеет вид:

$$A^*(s) = [p \left(\frac{2\lambda_1}{s+2\lambda_1} \right)^2 + (1-p) \left(\frac{2\lambda_2}{s+2\lambda_2} \right)^2] \cdot e^{-t_0 s}.$$

Значение первой производной функции $A^*(s)$ со знаком минус в точке $s=0$ равно

$$-\frac{dA^*(s)}{ds} \Big|_{s=0} = p\lambda_1^{-1} + (1-p)\lambda_2^{-1} + t_0.$$

Отсюда среднее значение интервалов между соседними требованиями будет равно

$$\bar{\tau}_\lambda = p\lambda_1^{-1} + (1-p)\lambda_2^{-1} + t_0. \quad (21)$$

Значение второй производной функции $A^*(s)$ в точке $s=0$ дает второй начальный момент интервала поступления

$$\bar{\tau}_\lambda^2 = t_0^2 + 2t_0 \left[\frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2} \right] + \frac{3p}{2\lambda_1^2} + \frac{3(1-p)}{2\lambda_2^2}. \quad (22)$$

Отсюда определим квадрат коэффициента вариации интервалов поступления:

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_1\lambda_2 + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[t_0\lambda_1\lambda_2 - p(\lambda_1 - \lambda_2) + \lambda_1]^2}. \quad (23)$$

Аналогично определяем среднее время обслуживания

$$\bar{\tau}_\mu = q\mu_1^{-1} + (1-q)\mu_2^{-1} + t_0, \quad (24)$$

второй начальный момент времени обслуживания

$$\bar{\tau}_\mu^2 = t_0^2 + 2t_0 \left[\frac{q}{\mu_1} + \frac{(1-q)}{\mu_2} \right] + \frac{3q}{2\mu_1^2} + \frac{3(1-q)}{2\mu_2^2}, \quad (25)$$

и квадрат коэффициента вариации времени обслуживания:

$$c_\mu^2 = \frac{\mu_1^2 - 2q\mu_1\mu_2 + q(1-2q)(\mu_1 - \mu_2)^2}{2[t_0\mu_1\mu_2 - q(\mu_1 - \mu_2) + \mu_1]^2}. \quad (26)$$

Рассматривая выражения (21)–(23) как запись метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (5) λ_1, λ_2, p . Система двух уравнений (21), (22) при этом является недоопределенной, поэтому к ней добавим выражение для квадрата коэффициента вариации (23) в виде связующего условия. Исходя из вида уравнения (21), положим

$$\lambda_1 = 2p / (\bar{\tau}_\lambda - t_0), \quad \lambda_2 = 2(1-p) / (\bar{\tau}_\lambda - t_0) \quad (27)$$

и потребуем выполнения условия (23). Подставив выражения (21), (22) и частное решение (27) в (23), решаем полученное уравнение четвертой степени относительно параметра p , с учетом условия $0 < p < 1$, а затем определяем из (27) параметры λ_1 и λ_2 .

Поступая аналогично с выражениями (24)–(26), определяем неизвестные параметры распределения (20) q, μ_1, μ_2 с учетом условия $0 < q < 1$. Таким образом, алгоритм расчета среднего времени ожидания при заданных входных параметрах $\bar{\tau}_\lambda, \bar{\tau}_\mu, c_\lambda, c_\mu, t_0$ сводится к последовательному решению указанных уравнений. Далее определяем коэффициенты многочлена (11) и находим нужные корни с отрицательными вещественными частями $-s_1, -s_2, -s_3, -s_4$. Подставив абсолютные значения этих корней в выражение (13) определяем среднее время ожидания. Наличие таких корней обусловлено существованием и единственностью спектрального разложения. Проведенные многочисленные эксперименты только подтверждают данный факт.

Теперь оценим влияние параметра сдвига $t_0 > 0$ на числовые характеристики распределений (19) и (20). Нас интересует прежде всего квадрат коэффициента вариации, т.к. среднее время ожидания в системе G/G/1 связано с коэффициентами вариаций квадратичной зависимостью (1).

Квадрат коэффициента вариации для распределения (5) равен

$$c_\lambda^2 = \frac{\lambda_1^2 - 2p\lambda_1\lambda_2 + p(1-2p)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_1 - p(\lambda_1 - \lambda_2)]^2}. \quad (28)$$

Сравнивая выражения (23) и (28) убеждаемся, что операция сдвига во времени уменьшает коэффициент вариации интервалов поступлений в $1 + \frac{t_0\lambda_1\lambda_2}{[\lambda_1(1-p) + \lambda_2p]}$ раз. Аналогично обстоит дело и с коэффициентом вариации времени обслуживания – уменьшение в $1 + \frac{t_0\mu_1\mu_2}{[\mu_1(1-q) + \mu_2q]}$ раз. Следовательно, система с запаздыванием обеспечивает меньшее время ожидания по сравнению с обычной системой при одинаковой загрузке ρ . Это замечательный результат в теории СМО!

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Ниже в таблицах 1 и 2 приведены результаты расчетов в пакете Mathcad среднего времени ожидания для системы НЕ₂/НЕ₂/1 по полученной расчетной формуле (13) для случаев малой, средней и высокой нагрузки $\rho = 0,1; 0,5; 0,9$.

Таблица 1 – Результаты для времени ожидания при коэффициентах вариаций (c_λ, c_μ) , меньших 1

Входные параметры		Среднее время ожидания	
ρ	(c_λ, c_μ)	Для системы $HE_2/HE_2/1$	Для системы $E_2/E_2/1$
0,1	(0,71;0,71)	0,02	0,02
0,5	(0,71;0,71)	0,40	0,39
0,9	(0,71;0,71)	4,40	4,36

Таблица 2 – Результаты для времени ожидания при коэффициентах вариаций (c_λ, c_μ) , больших 1

Входные параметры		Среднее время ожидания	
ρ	(c_λ, c_μ)	Для системы $HE_2/HE_2/1$	Для системы $H_2/H_2/1$
0,1	(2;2)	0,34	0,45
	(4;4)	1,68	1,78
	(8;8)	7,16	7,11
0,5	(2;2)	3,98	4,04
	(4;4)	16,53	16,13
	(8;8)	66,73	64,18
0,9	(2;2)	36,21	36,20
	(4;4)	145,31	144,83
	(8;8)	580,56	577,86

Коэффициент загрузки в данном случае определяется отношением средних интервалов $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda$. Расчеты проведены для нормированного времени обслуживания $\bar{\tau}_\mu = 1$. В табл. 1 приведены результаты для коэффициентов вариаций (c_λ, c_μ) , меньших 1, а в табл. 2 – больших 1. При этом для сравнения использованы известные результаты для СМО $E_2/E_2/1$ и $H_2/H_2/1$ соответственно.

В таблице 3 приведены результаты расчета для системы $HE_2^-/HE_2^-/1$.

Таблица 3 – Результаты экспериментов для СМО $HE_2^-/HE_2^-/1$ и $HE_2/HE_2/1$

Входные параметры		Среднее время ожидания			
ρ	(c_λ, c_μ)	Для системы $HE_2^-/HE_2^-/1$			Для системы $HE_2/HE_2/1$
		$t_0=0,9$	$t_0=0,5$	$t_0=0,1$	
0,1	(0,71;0,71)	0,01	0,01	0,02	0,02
	(2;2)	0,29	0,32	0,33	0,34
	(4;4)	1,21	1,55	1,66	1,68
	(8;8)	4,93	6,48	7,05	7,16
0,5	(0,71;0,71)	0,27	0,31	0,39	0,40
	(2;2)	2,32	3,15	3,82	3,98
	(4;4)	9,35	12,94	15,85	16,53
	(8;8)	37,50	52,13	63,96	66,73
0,9	(0,71;0,71)	3,06	4,11	4,39	4,40
	(2;2)	24,42	33,36	35,88	36,21
	(4;4)	97,71	133,3	143,8	145,31
	(8;8)	390,90	532,7	574,5	580,56

С уменьшением значения параметра t_0 среднее время ожидания в системе $HE_2^-/HE_2^-/1$ стремится к среднему времени ожидания в системе $HE_2/HE_2/1$, что подтверждает полную адекватность и достоверность полученных результатов.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Как видно из таблиц 1 и 2, результаты в обеих случаях достаточно близки к известным результатам. Данные табл. 3 подтверждают адекватность и достоверность проведенных выше математических выкладок.

Выражение (13), полученное впервые с использованием классического метода спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли, справедливо для определения среднего времени ожидания как для обычной системы $HE_2/HE_2/1$, так и для системы с запаздыванием $HE_2^-/HE_2^-/1$. Оно расширяет и дополняет известную формулу (1), а также расширяет область применения СМО за счет уменьшения коэффициентов вариаций интервалов поступления и времени обслуживания до $1/\sqrt{2}$ – для обычной системы, и до 0 – для системы с запаздыванием и тем самым позволяет перекрывать диапазон их изменения от 0 до ∞ .

6 ОБСУЖДЕНИЕ

В работе получено аналитическое решение для среднего времени ожидания для системы $HE_2/HE_2/1$ с использованием символьных операций пакета Mathcad. Это же решение позволяет его использовать для системы с запаздыванием $HE_2^-/HE_2^-/1$. Используя предложенный подход, помимо среднего времени ожидания, можно определить дисперсию и моменты высших порядков времени ожидания.

Полученный результат, с одной стороны, дополняет систему $H_2/H_2/1$, а с другой стороны, расширяет диапазон изменения коэффициентов вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания от $1/\sqrt{2}$ до ∞ . Для убедительности, данные расчетов для системы $HE_2/HE_2/1$ сравниваются с результатами для систем $E_2/E_2/1$ и $H_2/H_2/1$, что демонстрирует их достаточную близость.

ВЫВОДЫ

Научная новизна полученных результатов заключается в том, что впервые получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемых систем и с помощью спектральных разложений выведены расчетные выражения для среднего времени ожидания в очереди для этих систем в замкнутой форме. Эти выражения расширяют и дополняют формулу (1) для среднего времени ожидания для систем $G/G/1$ с произвольными законами распределений входного потока и времени обслуживания.

Практическое значение работы заключается в том, что полученные результаты с успехом могут быть применены в современной теории телетрафика,

где задержки пакетов входящего трафика играют первостепенную роль. Для этого необходимо знать чистовые характеристики интервалов входящего трафика и времени обслуживания на уровне двух первых моментов, что не вызывает трудностей при использовании современных анализаторов трафика [8].

Перспективы дальнейших исследований рассматриваются в продолжении исследования систем G/G/1 с другими общими входными распределениями и в расширении и дополнении формулы (1) для среднего времени ожидания.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

- Клейнрок Л. Теория массового обслуживания ; пер. с англ. под редакцией В. И. Неймана / Л. Клейнрок. – М. : Машиностроение, 1979. – 432 с.
- Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems / N. Brannstrom. – Appllied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004. – 79 p.
- Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods / W. Whitt // Operation Research. – 1982. – № 1. – Р. 125–147.
- Бочаров П. П. Теория массового обслуживания / П. П. Бочаров, А. В. Печинкин. – М. : Изд-во РУДН, 1995. – 529 с.
- Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем / Т. И. Алиев. – СПб : СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.
- Тарасов В.Н. Исследование систем массового обслуживания с гиперэкспоненциальными входными распределениями / В. Н. Тарасов // Проблемы передачи информации. – 2016. – № 1. – С. 16–26.
- Тарасов В.Н. Определение среднего времени ожидания требований в управляемой системе массового обслуживания H2/H2/1 / В. Н. Тарасов, И. В. Карташевский //

Системы управления и информационные технологии. – 2014. – № 3(57). – С. 92–96.

- Анализ входящего трафика на уровне трех моментов распределений временных интервалов / [В. Н. Тарасов, Н. Ф. Бахарева, Г. А. Горелов, С. В. Малахов] // Информационные технологии. – 2014. – № 9. – С. 54–59.
- Тарасов В. Н. Анализ и расчет системы массового обслуживания с запаздыванием / В. Н. Тарасов, Н. Ф. Бахарева, И. А. Блатов // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 11. – С. 51–59.
- HTTPS://tools.ietf.org/html/rfc3393. RFC 3393 IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM) (дата обращения: 26.02.2016).
- Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals / A. Myskja // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers. – 1991. – Р. 683–688.
- Алиев Т. И. Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания / Т. И. Алиев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2(84). – С. 88–93.
- Aras A. K. Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment / A. K. Aras, X. Chen, & Y. Liu // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89, No. 1. – Р. 81–125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0>
- Ghosh, A. & Huang, K. Asymptotically optimal control of N-systems with H_2^* service times under many-server heavy traffic / A. Ghosh, & K. Huang // Queueing Systems. – 2017. – Vol. 86, No. 1. – Р. 35–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9518-1>

Статья поступила в редакцию 01.06.2018.

Посля доработки 25.06.2018.

УДК 621.391.1:621.395

АНАЛІЗ І ПОРІВНЯННЯ ДВОХ СИСТЕМ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З ГІПЕРЛАНГІВСЬКИМИ ВХІДНИМИ РОЗПОДІЛАМИ

Тарасов В. Н. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення і управління в технічних системах Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Российская Федерация.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу виведення рішення для середнього часу очікування в черзі в замкнутій формі для звичайної системи з гіперлангівськими вхідними розподілами другого порядку і системи зі зсунутими гіперлангівськими вхідними розподілами.

Мета роботи – отримання рішення для основної характеристики системи – середнього часу очікування вимог в черзі для системи масового обслуговування типу G/G/1 зі звичайними із зсунутими з гіперлангівськими вхідними розподілами другого порядку.

Метод. Для вирішення поставленого завдання використаний класичний метод спектрального розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі, який дозволяє отримати рішення для середнього часу очікування для розглянутих систем у замкнутій формі. Метод спектрального розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі займає важливу частину теорії систем G/G/1. Для практичного застосування отриманих результатів використаний відомий метод моментів теорії ймовірностей.

Результати. Вперше отримано спектральні розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі для обох систем, за допомогою яких виведені розрахункові вирази для середнього часу очікування в черзі для вищевказаних систем в замкнутій формі. Такий підхід дозволяє розрахувати середній час очікування для зазначених систем в математичних пакетах для широкого діапазону зміни параметрів трафіку. Усі інші характеристики систем є похідними від середнього часу очікування.

Висновки. Показано, що гіперлангівський закон розподілу другого порядку, як і гіперекспоненційний є трипараметричним, може визначатися як двома першими моментами, так і трьома першими моментами. Вибір такого закону розподілу ймовірностей обумовлений тим, що його коефіцієнт варіації охоплює більш широкий діапазон, ніж у гіперекспоненційному розподілі. Для зсунутого гіперлангівського закону розподілу коефіцієнт варіації охоплює ще більш широкий діапазон, ніж у звичайного. Введення зсунутих у часі розподілів розширяє сферу застосування СМО з урахуванням відомого факту з теорії масового обслуговування, що середній час очікування пов'язаний з коефіцієнтами варіацій інтервалів надходжень і часу

обслуговування квадратичною залежністю. Метод спектрального розкладання рішення інтегрального рівняння Ліндлі для системи масового обслуговування з гіперерлангівськими вхідними розподілами другого порядку дозволяє отримати рішення в замкнuttй формі і це рішення публікується вперше. Отримане рішення доповнює і розширює відому формулу теорії масового обслуговування для середнього часу очікування вимог в черзі для системи масового обслуговування типу G/G/1.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: гіперерлангівський закон розподiлу, інтегральне рівняння Ліндлі, метод спектрального розкладання, перетворення Лапласа.

UDC 621.391.1:621.395

ANALYSIS AND COMPARISON OF TWO QUEUEING SYSTEMS WITH HYPERERLANGIAN INPUT DISTRIBUTIONS

Tarasov V. N. – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Software and Management in Technical Systems of Volga State University of Telecommunications and Informatics, Samara, Russian Federation.

ABSTRACT

Context. The problem of finding the solution for the mean waiting time in a closed form for a conventional system with hypererlangian input distributions of second order and for system with shifted hypererlangian input distributions is considered.

Objective is obtaining a solution for the main characteristic of the system—the average waiting time for queuing requirements for a queuing system of the type G/G/1 with normal and with shifted hypererlangian input distributions of the second order.

Method. To solve this problem, we used the classical method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation, which allows one to obtain a solution for the mean waiting time for the systems under consideration in closed form. The method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation occupies an important part of the theory of systems G/G/1. For the practical application of the results obtained, the well-known method of moments of probability theory is used.

Results. For the first time, spectral decompositions of the solution of the Lindley integral equation for both systems were obtained, with the help of which the calculated expressions for the average waiting time in the queue for the above-mentioned systems in closed form were derived. This approach allows us to calculate the average latency for these systems in mathematical packages for a wide range of traffic parameters. All other characteristics of the systems are derived from the average waiting time.

Conclusions. It is shown that the hypererlangian distribution law of the second order, like the hyperexponential, which is three-parameter, can be determined by both the first two moments and the first three moments. The choice of such a law of probability distribution is due to the fact that its coefficient of variation covers a wider range than the hyperexponential distribution. For the shifted hypererlangian distribution law, the coefficient of variation covers an even wider range. The introduction of shifted distributions extends the scope of the QS with considering the well-known fact from queuing theory, that the average waiting time is related to the coefficients of variations in the intervals of receipts and the time of service by a quadratic dependence. The method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation for a queuing system with hypererlangian input distributions of the second order makes it possible to obtain a solution in closed form and this solution is published for the first time. The solution obtained supplements and extends the well-known queuing theory formula for the average waiting time in the queue for a queuing system of type G/G/1.

KEYWORDS: hypererlangian distribution law, Lindley integral equation, spectral decomposition method, Laplace transform.

REFERENCES

1. Kleinrock L. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1979, 432p.
2. Brannstrom N. A Queueing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004, 79 p.
3. Bocharov P. P., Pechinkin A. V. Teoriya massovogo obsluzhivaniya. Moscow, Publishing House of Peoples' Friendship University, 1995, 529 p.
4. Aliev T.I. Osnovy modelirovaniya diskretnykh sistem. SPb: SPbGU ITMO, 2009, 363 p.
5. Tarasov V. N. Analysis of queues with hyperexponential arrival distributions. Problems of Information Transmission, 2016, Vol. 52, No. 1, pp. 14–23. DOI:10.1134/S0032946016010038
6. Tarasov V. N., Kartashevskiy I. V. Opredelenie srednego vremeni ozhidaniya trebovaniy v upravliaemoi sisteme massovogo obsluzhivaniya H₂/H₂/1, *Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii*, 2014, No. 3, pp. 92–95.
7. Tarasov V. N., Bahareva N. F., Gorelov G. A., Malakhov S. V. Analiz vhodiaschego trafika na urovne treh momentov raspredeleniy. *Informacionnye tehnologii*, 2014, No. 9, pp. 54–59.
8. RFC 3393 [IP Packet Delay Variation Metric for IP Performance Metrics (IPPM)] Available at: <https://tools.ietf.org/html/rfc3393>. (accessed: 26.02.2016).
9. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Blatov I. A. Analysis and calculation of queuing system with delay, *Automation and Remote Control*, 2015, No. 11, pp. 1945–1951. DOI: 10.1134/S0005117915110041
10. Whitt W. Approximating a point process by a renewal process: two basic methods, *Operation Research*, 1982, Vol. 30, No. 1, pp. 125–147.
11. Myskja A. An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals. *Teletraffic and datatrafic in a Period of Change. ITC-13*. Elsevier Science Publishers, 1991, pp. 683–688.
12. Aliev T.I. Approximaciya veroyatnostnykh raspredelenij v modelyah massovogo obsluzhivaniya, *Nauchno-tehnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mehaniki i optiki*, 2013, No. 2(84), pp. 88–93.
13. Aras A. K., Chen X. & Y. Liu Many-server Gaussian limits for overloaded non-Markovian queues with customer abandonment, *Queueing Systems*, 2018, Vol. 89, No. 1, pp. 81–125. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-018-9575-0>
14. Ghosh A. & Huang K. Asymptotically optimal control of N-systems with H₂^{*} service times under many-server heavy traffic, *Queueing Systems*, 2017, Vol. 86: No. 1, pp. 35–60. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11134-017-9518-1>

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОІНФОРМАТИКА І ИНТЕЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 681.327.12

ANALYSIS OF THE AUTOMATED SPEAKER RECOGNITION SYSTEM OF CRITICAL USE OPERATION RESULTS

Bisikalo O. V. – Dr. Sc., Professor, Dean of Faculty of Computer Systems and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.

Kovtun V. V. – PhD, Associate Professor, Computer Control Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.

Yukhimchuk M. S. – PhD, Associate Professor, Computer Control Systems Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine.

Voytyuk I. F. – PhD, Associate Professor, Computer Science Department, Ternopil National Economic University, Ternopil, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The article summarizes the statistical learning theory to evaluate the long-term operation results of the automated speaker recognition system of critical use (ASRSCU) taking into account the features of the system's operation object and the structural specificity of such a class of recognition systems.

Objective. The goal of the represented work is the development of a complex set of methods for the ASRSCU's quality parameters stabilization during its long-term operation.

Method. The article formulated set of methods for the ASRSCU's operational risks estimation of its long-term operation. In particular, the dependence of the risk of an incorrect speaker recognition on the features space dimension is described. Based on the formulated measure of informativity, obtained a set of methods to analyze the training sample to identify examples that lead to increased risk. The influence of the phenomenon of the drift of the speech signal parameters on the quality indicators of the ASRSCU is described analytically. An estimation of the operation duration of the ASRSCU, during which it is impractical to re-train its classifier, is carried out. Recommendations for choosing an optimal ASRSCU's classifier are formulated from the position of its complexity minimization, taking into account the risks of the ASRSCU's long-term operation and the possibility of re-training.

Results. Represented in the article theoretical results are verified by the DET-curves experiments data, which summarize the information from long-term experiments with the ASRSCU, in which, during the features space configuration were taken into account the features based on the power normalized cepstral coefficients based and the features based on the spectral-temporal receptive fields theory. Within the framework of the created theoretical concept, an estimation of the influence of the features space configuration and the type and complexity of the classifier on the stability of the ASRSCU's quality parameters during its long-term operation has been carried out.

Conclusions. For the first time the theoretically analyzed the problem of average risk minimization by empirical operation results of a ASRSCU, where, unlike existing approaches, non-stationary input data with the drift of individual speech signals features and the characteristic parameters of the recognition system classifier were taken into account, which allowed to estimate the risk's confidence interval for conditions for re-training sessions.

KEYWORDS: automated speaker recognition system of critical use, experiment planning theory, factor analysis, statistical learning theory.

ABBREVIATIONS

ASRSCU is automated speaker recognition system of critical use;

CNN is a convolution neural network;

STRF is a spectral-temporal receptive fields;

VAD is a voice activity detection;

NOMENCLATURE

Δ is a impulsive variable;

Ω is a parameter of temporal impulse filter responses;

α is a set of parameters of the classifier;

ε is a accuracy of classifier training;

θ is a phase of spectral impulse filter feedback;	l is a basic length of the training sample;
κ_1 is a weight constant;	l_m is a expected average durability of the recognition system exploitation term without re-training;
κ_2 is a time constant;	m is a iterator;
κ_3 is a constant, which set the CNN parameters;	M^{u-1} is a number of entrance maps;
κ_4 is a constant, which set the CNN parameters;	n is a iterator;
κ_5 is a constant, which set the CNN parameters;	N_ω is a number of elements h_{sc} ;
κ_6 is a constant, which set the CNN parameters;	N_k dimension of the feature $F_3(t,k)$;
κ_7 is a training rank;	k is a iterator;
ξ_n is a set of n independent, equally distributed random variables;	O is a degree of sufficiency of the training sample;
ρ is a probability that, at least in one of the N functions $Q(z, \alpha_k)$, $k=1, \dots, N$, the upper limit of the risk R_{\max} exceeds R_m ;	P_α is a probability of the first kind errors of ASRSCU;
τ is a mathematical expectation of the interval between sequences of re-training;	P_β is a probability of the second kind errors of ASRSCU;
ϕ is a phase of spectral impulse filter feedback;	P is a unknown probabilities distribution;
$\phi(\dots)$ is a function of estimation of the drift degree of the input data;	P_1 is a empirical risks by sampling S_1 subset A ;
ω is a density parameter of the spectral impulse response filters;	P_2 is a empirical risk by sampling S_2 subset A ;
$\{(x_i, y_i)\}$ is a the element of the training sample, X and Y are the set of empirical input and output data of the system;	$P^l(\dots)$ is a function of estimating the marginal size of the initial sample;
$1-\delta$ is a reliability of the classifier's training;	P_r is a probability of a situation, when testing the system on a plurality m of elements, the empirical risk R_e will exceed the threshold value of risk R_r ;
b_n^u is a offset for n -i source map;	$Q(\dots)$ is a set of corresponding indicator functions;
d is a degree of complexity of the training algorithm;	R assessment of empirical risk R_e ;
$F_1(t, \omega)$ is a SNRF-individual feature;	$R(\alpha)$ is a functional risk;
$F_2(t, \omega)$ is a SNRF-individual feature;	$R_e(\alpha)$ is a functional of empirical risk;
$F_3(t, k)$ is a SNRF-individual feature;	R_g is a risk of incorrect classification when training a classifier on a sample from which elements were removed at the initial sample length, estimated by the error rate;
f is a frequency;	R_m is a threshold value of the risk, determined by the testing results;
$G(l)$ is a measure of the learning process complexity;	R_{\max} is a upper limit of risk;
$g(x)$ is a classification function;	$STRF(t, f, \Omega, \omega, \phi, \theta)$ is a operation of allocation of SNRF features;
h is a measure of Vapnik-Chervonenkis;	t is a time;
\hat{h} is a Gilbert transformation;	$w_{n,m}^u$ is a convolution core between m -input and n -output source maps;
h_S is a spectral impulse response;	x_m^u is a input feature map m of a layer u ;
h_{sc} is a spectral scale factor;	$y(t, f)$ is a SNRF spectrogram;
h_T temporal impulse response;	$y_A(t, f)$ is a model of hair cells work;
h_{rt} is a temporal scale factor;	$y_C(t, f)$ is a affine wavelet transform of the speech signal frame $s(t)$;
$h(t, f)$ is a impulse response of each filter in bank;	$y_{LIN}(t, f)$ is a model of the lateral inhibitory network;
H is a class of hypotheses of indicator functions g ;	y_n^u is a output feature map n of a layer u ;
i is a iterator;	$Z = \{z_1 = (\bar{x}_i, y_i), z_2, \dots, z_l\}$ is a set of empirical data.
$I(\dots)$ is a informative measure of rejection of empirical data from educational;	
j is a iterator;	
$L_q(h)$ is a loss function, which describes the average difference between a random variable Y and $h(X)$;	
$\hat{L}_q(h)$ is a empirical risk;	

INTRODUCTION

The automated speaker recognition system of critical use [1], as well as all speaker recognition systems, performs the speaker's person recognition by analyzing the individual attributes isolated from the phonogram with the recording of the speech signal. Of course, the speaker is characterized by the pronunciation variability, due both to internal and external factors. To the internal speech variability factors, we will relate the style, tempo and volume of speech. External speech variability factors are characterized by the type and level of noise in the acoustic and hardware channels of the speech signal propagation, as well as distorted perception of the speech signal due to the reverberation of the speaker's spatial surroundings. Also highlighted such high-level individual characteristics of speech as dialect and speech style, which manifests itself in the acoustic characteristics of the speech signal and the tempo of speech. To establish in ASRSCU the potential for distinguishing internal variability factors, taking into account the high-level individual characteristics and resistance to external variability factors, can be used in the systematic approach to forming the features space, the selection and parameterization of classifier, the formation of a training sample and the regulation of the training process. There are other "extreme" volatility sources of the amplitude-frequency characteristics of the speech signal due to the state of the speaker's health, the acoustic parameters and the geometry of the room where the system is operate, the parameters and the location of the microphones. However, these types of variability are so significantly distorting the meaning of informative speech recognition features that they are reasonably easily identifiable and taken into account when deciding on the result of a speech recognition session, taking into account the degree of distortion and the scope of use and the type of the recognition system.

However, the study [2] showed that during prolonged use of the speaker recognition system, the speech signal parameters drift is due to simple normal physiological processes in the articulatory apparatus of the human, as a result of which the time difference between the training session of the ASRSCU classifier and the recognition session can significantly affect the quality system performance. Consequently, the possible critical use of the speaker recognition system necessarily requires the study of the influence of the operating time on the qualitative performance indicators of the recognition system in order to stabilize them.

The object of study is the individual features of the process of human speech activity and the process of hearing perception of speech signals by a human being and their analysis by the auditory cerebral cortex.

The subject of study is the methods of the pattern recognition theory for the modeling of the recognition system, the methods of the statistical training theory for the analysis of the risks arising from the long-term use of the recognition system, the methods of the neural networks theory for the implementation of the optimal

classifier for the recognition system and methods of spectral-temporal receptive fields to describe the process of perception speech signals to the acoustic cerebral cortex of a human.

The purpose of the work is to estimate the risks of long-term operation of the ASRSCU and to propose measures to reduce them.

1 PROBLEM STATEMENT

Let there exist an abstract teacher who offers the ASRSCU's classifier a finite set of examples of an unknown indicator function g over the domain X . On the basis of a sequence of examples $\{(x_i, y_i)\}$, $i = 1, \dots, l$, $x_i \in X$, $y_i \in Y$, where $y_i = g(x_i)$, $1 \leq i \leq m$, and $X \subset R$, $Y = \{0,1\}$, randomly selected in accordance with an unknown distribution of probabilities above X , it is necessary to train a classifier with given accuracy $\varepsilon > 0$ and reliability $1 - \delta$. Suppose the existence of an unknown probabilities distribution P over $X \times Y$, a classifying function $g(x) = E(Y|X=x)$ and a limited training sample with examples $\{(x_i, y_i)\}$, $i = 1, \dots, l$, where (x_i, y_i) are taken independently, respectively P over $X \times Y$. The classifying function belongs to the hypothesis class H , which does not necessarily contain g . Determine the loss function $L_q(h)$, which describes the average difference between the random variable Y and $h(X)$:

$$L_q(h) = \left(E|Y - h(X)|^q \right)^{q^{-1}}, \text{ and the empirical}$$

$$\text{risk } \hat{L}_q(h): \hat{L}_q(h) = l^{-1} \sum_{i=1}^l (y_i - h(x_i))^q)^{q^{-1}}, \text{ where the}$$

$q \geq 1$ averaging takes place in accordance with P . If we take into account $Y = g(X)$, then the loss function will take the form $L_q(h) = \|g - h\|_{L_q(P)}$, that is L_q the norm over P . Suppose the existence of a classifier training algorithm, a coincidence $l(\varepsilon, \delta)$ for examples of a training sample, for any objective function g and any probability distribution P on X , if the hypothesis is $\hat{h} \in H$ fulfilled $L_q(\hat{h}) \leq L_{g,q}^* + \varepsilon$ with probability greater than $1 - \delta$, where $L_{g,q}^* = \inf_{h \in H} \|g - h\|_{L_q(P)}$ – the loss of the optimal hypothesis H . This assumption suggests that it is possible to minimize the empirical risk by using the classifier training algorithm, which \hat{h} is the result of a choice h with H a minimum value $\hat{L}_q(h)$, and formulate the purpose of the training procedure as the choice of an element from H , which minimizes the generalization error $R = \int H(z)dP(z)$ based on empirical data $Z = \{z_1 = (\bar{x}_i, y_i), z_2, \dots, z_l\}$. Next in the article, we will develop the concept formulated above in direction of

identifying the relationship between the performance indicators of the ASRSCU and the training process parameters and the recognition system classifier parameters for its long-term operation.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

In the theory of pattern recognition, one of the applied applications of which is the speaker recognition systems, one of the central problems is to minimize the average risk based on the analysis of empirical data, which developed into the theory of statistical learning [3]. In this theory, many complex problems are investigated, in particular, the restoration of dependencies and distributions density (pattern recognition) and the interpretation of the indirect experiments results. As already noted, the speech signal parameters are inherent in drift, which over time leads to a decrease in the qualitative characteristics of the ASRSCU. In studies [4,5] a hypothesis is formulated on the insignificant effect of the drift of the speech signal parameters on the quality of speaker recognition and is proposed to be compensated by introducing a number of corrective coefficients. So in [6] on the basis of the assumption of constant in time, but a small absolute value of the drift of the speech signal characteristic parameters, its probabilistic estimation is based on the study of the sequence of recognition sessions results and the upper limit of the degree of drift with the given error probability is estimated and taking into account the recognition system classifier training algorithm, but the question of the influence of the number of evaluated data on the reliability of the estimates isn't investigated. The paper [7] describes a method for determining the maximum drift rate allowed for a corresponding recognition system classifier, among which, however, there are no neural networks. In papers [8, 9], the phenomenon of drift recognizes and formulates the requirements for optimizing the parameters of the speaker recognition system classifier re-training process stating, in particular, the requirements regarding the phonetic composition of language materials for re-training, thereby reducing the total amount of study sample. In work [10] the influence of "extreme" variations of speech signals on the quality of the speaker recognition system is estimated, and the permissible limits of variation of spectral individual parameters are estimated. However, in all the aforementioned works, a priori assumptions are made about the nature and parameters of drift in speech signals, therefore, an urgent task is the generalization of the theory of statistical learning to the problem of a speech signal parameters drift in the long-term operation of the speaker recognition system.

3 MATERIALS AND METHODS

In an unknown distribution $P(x, y)$ you can only

estimate the empirical risk $R_e = l^{-1} \sum_{i=1}^l Q(z_i)$. This goal

can be achieved by adjusting the parameters of the © Bisikalo O. V., Kovtun V. V., Yukhimchuk M. S., Voytyuk I. F., 2018
 DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-7

classifier α according to the condition $\alpha^* = \arg \min_{\alpha} R_e(\alpha, l)$, evaluating the complexity of the training process as $G(l) \begin{cases} = 2^l, & \text{if } l \leq d, \\ < l^d(d!)^{-1}, & \text{if } l > d, \end{cases}$, where

$d+1$ – the smallest size of the set, under which the condition $G(l) = 2^l$ is violated.

On the basis of the foregoing, we consider the problem of minimizing the risk functional

$$R(\alpha) = \int Q(z, \alpha) P(z), \quad \alpha \in \Lambda, \quad (1)$$

as a task of minimizing the functional of empirical risk

$$R_e(\alpha) = l^{-1} \sum_{i=1}^l Q(z_i, \alpha), \quad \alpha \in \Lambda \quad (2)$$

over a set of indicator functions $Q(z, \alpha) = \{0,1\}$. In this case (1) is characterized by the probability of incorrect classification $A_\alpha = \{Q(z, \alpha) = 1\}$, and (2) – by the frequency of occurrence of such an event. If all empirical data z are taken from the same distribution, then with probability $1 - \eta$ simultaneously for all N functions from a set $Q(z, \alpha_k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, inequality is performed

$$\begin{aligned} R(\alpha_k) &< R_{\max}(\alpha_k) = R_e(\alpha_k) + l^{-1} (\ln N - \ln \rho) \cdot \\ &\left(1 + \sqrt{1 + 2 R_e(\alpha_k) / (\ln N - \ln \rho)}^{-1} \right). \end{aligned} \quad (3)$$

The equation (3) allows us to describe the dependence of the incorrect classification risk on the factor space dimension, which can be reduced by applying, in particular, the principal component analysis [11], thus reducing the computational complexity of the recognition task. However, in the context of the critical use of the recognition system, the increase in the wrong classification risk is unacceptable, which can be prevented by removing examples that increase risk from the training sample. This operation is proposed to be carried out on the basis of Shannon's informativeness [12]:

$$R_g = R(s) + \kappa_1 \left(d \left(\ln \left(2d^{-1}(p-s) \right) + 1 \right) s \left(\ln \left(ps^{-1} \right) + 1 \right) \right) / (p-s)^{-1}. \quad (4)$$

If the parameters of the initiating probability distribution are unknown, then it is suggested to use the test to identify the distribution point in the context of the speaker's identity, which will be recognized by the ASRSCU [13]:

$$\phi(P_1, P_2) = \sup_A |P_1 - P_2| \left(\min(0.5(P_1 + P_2), 1 - 0.5(P_1 + P_2)) \right)^{-0.5}, \quad (5)$$

where $\sup |S_1 - S_2| = 0.5 \text{dist}(S_1, S_2)$ – the empirical measure of the distance between the samples S_1 and S_2 . This test also allows us to determine the marginal sample size $P^l(\phi(S, P) > \varepsilon) \leq (2l)^d e^{0.25l\varepsilon^2}$ and the boundary of the second kind of errors probability

$$P^{2l}(\phi(S_1, S_2) > \varepsilon) \leq (2l)^d e^{0.25l\varepsilon^2}. \quad (6)$$

In addition to the parameters of the training procedure on the quality parameters of the ASRSCU, the drift of the speech signal parameters is also influenced by the physiological changes in the speech apparatus of the human. If ASRSCU will operate for a long time, the quality of recognition will decrease, as the initiating distribution of input data will change. Next, we call this phenomenon a drift of a compatible distribution $P(\bar{x}, y)$. The theory of machine learning regulates the definition of the adequacy of the amount of training sample O for “drifting” data in the form $O = \varepsilon^{-2}(d + \log \delta^{-1})$ [13]. However, the relevance of the relationship of drift with the empirical and true risk is relevant. Assume that the recognition is performed by the Bayesian classifier in terms of deterministic connection $P(\bar{x}, y) \in \{0,1\}$. If the example provided for classification x_i is close to the training sample data $\min \| \bar{x} + x_i \| < \varepsilon$, then the classification is carried out in accordance with a reliable estimate of conditional probability, and the error probability is $\min\{P(\bar{x}, A), P(\bar{x}, B)\} \approx 0$, and informative $x_i - I(k) \approx 1$, $I(k) = -\log P_k(\hat{y}_k = y_k | z_1, z_2, \dots, z_{k-1}, \bar{x}_k)$ which defines the deviation degree of the input data from the data of the training sample. That is, if x_i is much different from the data of the training sample, then the error probability can be estimated as $2P(A)P(B) \approx 0.5$, and informative $I(k) \approx 2$. In the field of drift, these indicators will generally take a form $\max\{P(\bar{x}, A), P(\bar{x}, B)\} \approx 1$, $I(k) \rightarrow \infty$. Consequently, there is a link between the need for re-training of the classifier and the value of empirical risk, embodied in the value of informativity. When creating critical systems, risk management is necessary, so we will combine the re-training operation with the situation of exceeding the value of the empirical risk of some threshold. That is, we will carry out repeated training if with a probability ρ in at least one of an N functions $Q(z, \alpha_k)$, $k = 1, \dots, N$ the upper limit of risk exceeds the thresholds by the testing results on the sample no less than from the m elements: $R_{\max}(\alpha_k) > R_m$, or by revealing this relation:

$$R_e(\alpha_k) + K_l \left(1 + \sqrt{1 + 2R_e(\alpha_k)K_l^{-1}} \right) > R_m, \quad \text{where}$$

$K_l = (\ln N - \ln \rho)^{-1}$, $l \geq m$. Given the previous transformations we obtain $R_e(\alpha_k) > R_m - \sqrt{2R_m K_l}$, or

$$R_e(\alpha_k) > R_m - \sqrt{2R_m (\ln N - \ln \rho)^{-1}}. \quad (7)$$

Inequality (7) describes the ratio of empirical risk to threshold values for any one $l \geq m$. If the recognition system is used, then based on the generalization of the results of its work for a certain time you can calculate the empirical risks $R_e(\alpha_k)$ for the various classes of system parameters, for example, the length or content of the

passphrase, the number of microphones for its recording, acoustic space parameters where the system is operating, etc. If for some class the empirical risk exceeds the threshold $R_e(\alpha_k) \geq R_{tr}$, then for the data of this class, you need re-training.

Let's describe the probability of a situation when after testing a system on a set of elements the empirical risk will exceed the threshold R_{tr} :

$$P_r = \sup_{1 \leq k \leq N} \left(\sum_{l=\lceil R_{tr}m \rceil}^m \binom{l}{\lfloor R_{tr}l \rfloor} R(\alpha_k)^{\lceil R_{tr}l \rceil} (1-R(\alpha_k))^{\lfloor l(R_{tr}) \rfloor} \right). \quad (8)$$

where unknown true risks $R(\alpha_k)$ are used, the limit values of which can be obtained by analyzing the empirical risks, but taking into account the limited sample size, these estimates will be understated. However, it is possible to obtain a reliable lower boundary r providing for a monotonous increase in the likelihood of re-training P_r with growth $R(\alpha_k)$. Let $(\xi_n, n \geq 1)$ be a sequence of intervals between the re-training procedures of the recognition system, measured in the number of recognition sessions performed. Assume that ξ_n – independent randomly distributed probability variables, then the probability that re-training will occur through sessions will describe by $p\{\xi_n = t\} = q^{t-1}P_r$, where $q = 1 - P_r$, and the probability that re-training will occur no more than through the sessions we describe like $p\{\xi_n \leq t\} = 1 - q^t$. The mathematical expectation of the interval between sequences of re-training will describe by

$$\tau = \mu(\xi_n) = \sum_{t=1}^{\infty} tq^{t-1}P_r = \sum_{t=1}^{\infty} \left(\sum_{x=t}^{\infty} q^{x-1} \right) P_r = \sum_{t=1}^{\infty} (q^{t-1})(1-q)^{-1}P_r = \sum_{t=1}^{\infty} q^{t-1} = P_r^{-1},$$

from where the expected average operation duration of the recognition system without re-training is $l_m = m\tau = mP_r^{-1}$. Also, we obtain the mathematical expectation of the number of re-training procedures for sessions: $H(t) = \sum_{n=1}^{\infty} p(s_n \leq t)$,

$$\lim_{t \rightarrow \infty} H(t)t^{-1} = \tau^{-1} = P_r.$$

Determine the effect of re-training on some limited positive rational function $G > g(t) > 0$ taking into account the corrective operator Ψ . For a given P_r correction, the evaluation (8) is based on the decomposition of a complex phenomenon on a complete set of incompatible events $P(A) = \sum_B P(B)P(A|B)$:

$$P \left\{ \sup_{1 \leq k \leq N} R(\alpha_k) - R_e(\alpha_k)(R(\alpha_k))^{-0.5} > \varepsilon \right\}. \quad (9)$$

$$< NP_r a(1-a)^{-1} + N(1-P_r(1-a)^{-1})a^t,$$

where $a = qe^{-0.5\varepsilon^2 m}$. Using inequality (9) we establish a connection between ε and reliability taking into account that

$$\begin{aligned} \rho_0 > NP_r a(1-a)^{-1} \Rightarrow a < \rho_0(\rho_0 + NP_r)^{-1} \Rightarrow qe^{-0.5\varepsilon^2 m} \\ &< \rho_0(\rho_0 + NP_r)^{-1} : \\ \varepsilon > \varepsilon_0 = \sqrt{-2m^{-1} \ln(\rho_0((\rho_0 + NP_r)(1 - P_r))^{-1})}. \end{aligned} \quad (10)$$

We simplify inequality (9) taking into account the fact that the values a and $(1-a)^{-1}$ decreases with growth ε determine what value ensures reliability $1-\rho$, $\rho > \rho_0$, taking into account that

$$\begin{aligned} \rho > \rho_0 + Nqa^t \Rightarrow q^t e^{-0.5\varepsilon^2 mt} < (\rho - \rho_0)(Nq)^{-1} \Rightarrow -0.5\varepsilon^2 m \\ < \ln((\rho - \rho_0)(N^{-1}q^{-(t+1)})) : \\ \varepsilon > \varepsilon_1 = \sqrt{-2m^{-1}(\ln((\rho - \rho_0)N^{-1}) - (t+1)\ln(1 - P_r))}. \end{aligned} \quad (11)$$

Using the above considerations, we obtain on the basis of (9) taking into account (11) the expression to determine the true risk:

$$\begin{aligned} R(\alpha_k) < R_e(\alpha_k) + \varepsilon_1 \left(1 + \sqrt{1 + 2R_e(\alpha_k)\varepsilon_1^{-1}} \right) = \\ = R_e(\alpha_k) + \sqrt{-2m^{-1} \ln((\rho - \rho_0)N^{-1}q^{-(t+1)})} \times \\ \times \left(1 + \sqrt{1 + 2R_e(\alpha_k)(-2m^{-1} \ln((\rho - \rho_0)N^{-1}q^{-(t+1)}))^{-0.5}} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

and generalizing (10) and (11) we obtain the constraints on the choice ρ_0 for (12):

$$\rho > \rho_0 > 0.5N(P_r + q^t) + 0.5\rho \left(\sqrt{4NP_r + (N\rho^{-1}(P_r + q^t) - 1)^2} - 1 \right). \quad (13)$$

We formulate measures on the practical use of the aforementioned theory of the risk assessment of ASRSCU taking into account the procedure of the classifier re-training as a result of the drift of the speech signal parameters. In the context of the foregoing, ASRSCU requires a classifier designed to take into account the balance between the reduction of the empirical risk and the increase in the difference between the empirical and true risk with increasing complexity of the classifier, by which we mean the capacity of the set of input data that the classifier is capable of recognizing. The indicated balance is proposed to be ensured by minimizing the upper limit of true risk for the specified values of reliability and duration of the training sample. Based on [14] we formulate a kind of indicator function that minimizes empirical risk with probability $1-\rho$:

$$R_e - \sqrt{0.5\varepsilon(l)} \leq R \leq R_e + 0.5\varepsilon(l) \left(1 + \sqrt{1 + 4R_e(\varepsilon(l))^{-1}} \right), \quad (14)$$

where $\varepsilon(l) = 4hl^{-1}(\ln(2lh^{-1}) + 1) - 4l^{-1}\ln(0.24\rho)$.

If the re-training procedure is implemented, it's expedient to minimize the true risk, and estimate the limit of the empirical risk for the specified re-training risk. It

has been previously grounded that re-training of the classifier with reliability $1-\rho$ willn't occur, if $q^t > 1-\rho$, that allows (14) to obtain an analytical expression for calculating the boundary that describes the effect of re-training on the choice of a classifier:

$$\begin{aligned} R_r \leq R_e + 0.5\varepsilon(m) \left(1 + \sqrt{1 + 4R_e(\varepsilon(m))^{-1}} \right) + \\ + \sqrt{0.5\varepsilon(m) \ln(1-\rho) \ln(1 - P_r))^{-1}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Consequently, the authors proposed a set of measures for assessing the operational risks of long-term use of ASRSCU. In particular, using (3) describes the dependence of the risk of incorrect classification from the dimension of the factor space. Based on the formulated measure of informativity with the help of (4) it is possible to analyze the study sample on the presence of examples that lead to increased risk. With the help of (8) we describe the influence of the phenomenon of drift of input parameters on the qualitative performance indicators of the ASRSCU, and with the help of (13) an estimation of the operation duration of the ASRSCU is performed, during which it is impractical to re-train the classifier. Also (15), it is possible to choose the optimal classifier on the position of minimizing its complexity, taking into account the risks of long-term use of the ASRSCU and the possibilities of re-training. In general, the above-mentioned material for the first time comprehensively describes the problem of minimizing the average operation risk of the ASRSCU under empirical data, generalized taking into account nonstationary input data with drift patterns and parameters of the recognition system classifier. The limits of confidence intervals of risk are calculated taking into account the procedures of classifier re-training.

4 EXPERIMENTS

The statistical data for the empirical assessment of the adequacy of the above theoretical concepts for the operational risks analysis of the ASRSCU is obtained on the basis of the analysis of the results of long-term use of ASRSCU at the Department of Computer Control Systems of Vinnytsia National Technical University. The mentioned ASRSCU has a classical architecture, which includes a block of preliminary speech signal processing, a block of informative features allocation and a classification block.

In the pre-processing block, the detection of speech activity intervals in phonograms was performed using a two-channel VAD algorithm [16]. Intervals of linguistic activity lasting 3 seconds were segmented into frames of duration 30 ms with 15 ms shift. To compensate for the Gibbs effect, the signal was weighed by the Hemming window. Effects of channel distortions at the factor level were offset by the calculation of the cepstral mean subtraction and, taking into account the sufficient duration of the analysis frameworks, the implementation of the feature warping [17].

In the block of informative features extraction from each of the received from the block of preliminary processing frames extracted 19 normalized by the power cepstral coefficients [18], their energy and their first and second derivatives. Also, for the presentation of speech signals, the position of the theory of spectral-temporal receptive fields was used, which describes the work of the human auditory system with the involvement of the results of psychoacoustic and neuropsychological studies of the peripheral and central auditory system of mammals in the spectral and temporal spaces [19, 20]. The STRF-description of the speech signal included two stages. At the first stage, the auditory spectrum was obtained as a result of the simulation of the peripheral auditory system. At the second stage on the basis of the first stage results the high-level representations of linguistic representations as the results of simulation of the auditory cortex of the central nervous system of human were synthesized.

For the implementation of the first stage, an affine wavelet transform $y_C(t, f)$ of the speech signal frame $s(t)$, was initially carried out, which was passed through a bank of cochlear filters: $y_C(t, f) = s(t) *_t h(t, f)$, where

$*_t$ – is a convolution operation in the time space. Further, the work of hair cells $y_A(t, f)$ was modeled, which was consistently performed: the operation of high-frequency filtration to emulate the process of converting sound pressure into the speed of hairs; nonlinear compression operation $g(u)$; low frequency filtering operation $w(t)$ to emulate phase blocking of the auditory nerve: $y_A(t, f) = g(\partial_t y_C(t, f)) *_t w(t)$. Next, the work of the lateral inhibitory network of the cochlear nucleus $y_{LIN}(t, f)$ was modeled in the form of a frequency selection operation, for which the partial derivative of the $y_A(t, f)$ frequency was passed through a half-period rectifier: $y_{LIN}(t, f) = \max(\partial_f y_A(t, f), 0)$. And the first stage was ended by receiving the auditory spectrogram $y(t, f)$ by convolution $y_{LIN}(t, f)$ in the time space with a short-term window function $\mu(t, \kappa_2)$:

$$y(t, f) = y_{LIN}(t, f) *_t \mu(t, \kappa_2), \text{ where } \mu(t, \tau) = e^{-\kappa_2^{-1} \tau^2}$$

In Fig. 1 we can visually compare examples of Fourier and STRF-spectrograms.

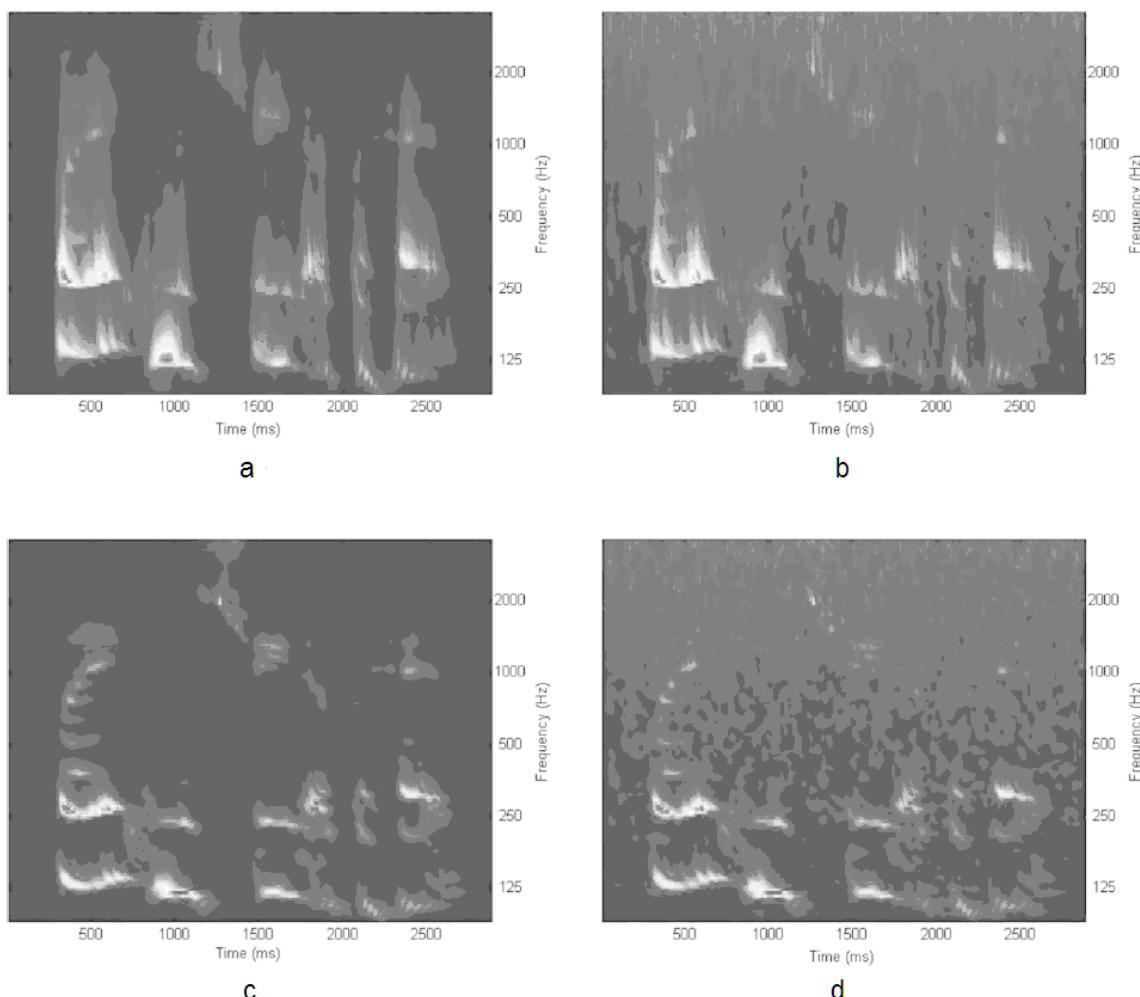


Figure 1 – Visual representation of a speech signal: a, b – Fourier spectrographs of the speech signal without / with noise respectively; c, d – STRF spectrograms of the speech signal without / with noise respectively

The ongoing second phase was based on obtaining the STRF-function as a result of the combination h_S and h_T :
 $STRF = h_S \cdot h_T$, where $h_S(f, \omega, \theta) = h_{sc}(f, \omega) \cos \theta + \hat{h}_{sc}(f, \omega) \sin \theta$,
 $h_T(t, \Omega, \varphi) = h_{rt}(t, \Omega) \cos \varphi + \hat{h}_{rt}(t, \Omega) \sin \varphi$. Operation $STRF(t, f, \Omega, \omega, \varphi, \theta)$ on a spectrograph $y(t, f)$ describes like $STRF(t, f, \Omega, \omega, \varphi, \theta) = y(t, f) *_{if} [h_S(f, \omega, \theta) \cdot h_T(t, \Omega, \varphi)]$, where $*_{if}$ is the convolution operation in both time and frequency spaces. Fig. 2 shows a scalable STRF representation of one of the speech signal frames from Fig. 1 in h_{sc}/h_{rt} space and MFCC-representation of the same frame.

In the investigated ASRSCU from the frames of the speech signal, according to the results of the STRF analysis, three informative features were distinguished. The first feature $F_1(t, \omega)$ was obtained by summing the values of all elements of the STRF representation in h_{sc}/h_{rt} spaces:

$$F_1(t, \omega) = \sum_f \sum_{\Omega} |STRF(t, f, \Omega, \omega, 0, 0)|, \quad (16)$$

where $\omega = 1, 2, \dots, N_{\omega}$, N_{ω} – is the number h_{sc} elements, and the values of the phase parameters φ and θ , given their small informativity for a speaker recognition task

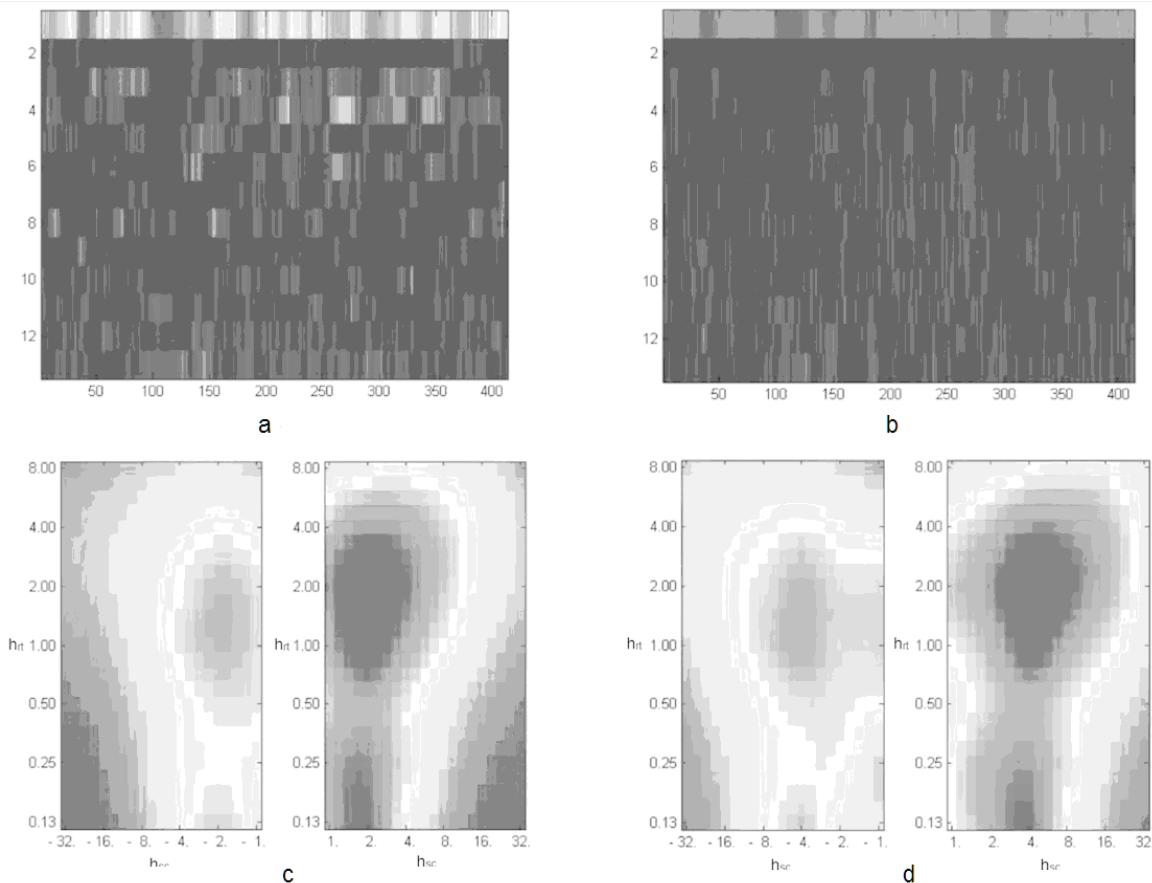


Figure 2 – Visual representation of a speech signal: a, b – MFCC-presentation of speech recording without noise / with noise; c, d – STRF-representation of spectrographs of speech recording without noise / with noise in space h_{sc}/h_{rt}

[19], was considered equal to 0 for a simplification of calculations. The second feature was obtained by logarithm $F_1(t, \omega)$:

$$F_2(t, \omega) = \log(F_1(t, \omega)). \quad (17)$$

The third STRF feature was obtained using the discrete cosine transform (DCT) [20] to $F_2(t, \omega)$:

$$F_3(t, k) = \sum_{\omega=1}^{N_{\omega}} F_2(t, \omega) \cos(2\pi\omega k N_{\omega}^{-1}), \quad (18)$$

where $k = 1, 2, \dots, N_k$, $N_k \leq N_{\omega}$.

Thus, the vector of informational attributes for one frame of the input speech signal after its processing consisted of 79 elements that are visually represented in the form of a spectrogram-like structure, where the axis of the ordinates is postponed by the number of frames along the abscissa, the values of the ordinate axes correspond to the numbers of informative features, and the intensity of the color shows the value of the corresponding features within the frame, multiplied by the corresponding weighting factor. Such a way of presenting informative features is due to the type of ASRSCU classifier.

In the classification block of the ASRSCU, a convolutional neural network [21] was implemented. Its architecture is designed taking into account the recommendation (15) regarding the complexity of the recognition system classifier, taking into account the features space parameters, operating conditions and the purpose of the ASRSCU. The structure of network (see Fig. 3) includes two convolution layers for features extraction, two sub-sampling layers to reduce features dimension, two local normalization layers, three full-connected layers and finalized by an output SOFTMAX layer.

The convolutional layer of the neural network performs a two-dimensional convolution operation of the fragment of the input image and a filter to extract the height-level features based on the activation functions of the Rectified Linear Units:

$$y_n^u = \max \left(0, \sum_m^{M^{u-1}} w_{n,m}^u * x_m^u + b_n^u \right). \text{ To reduce the data}$$

dimension, the sub-sampling MAX-pooling type layers are used, at the outputs of which the maximum values of square pieces are obtained in size 3×3 , on which the input card is broken off without overlapping. In order to prevent a decrease in the network training process speed the Local Response Normalization procedure implemented, in which the normalized response $B_n^u(x, y)$ at the output of $y_n^u(x, y)$ MAX-pooling sub-sampling layer at the position (x, y) is obtained as $B_n^u(x, y) =$

$$= H_n^u(x, y) \left(\kappa_3 + \kappa_5 \sum_{n=\max(0, n-0.5\kappa_4)}^{\min(M^u, n+0.5\kappa_4)} H_n^u(x, y)^2 \right)^{-\kappa_6},$$

where M^u – is a total number of cores in the layer u , and the values $\kappa_3 = 2$, $\kappa_4 = 5$, $\kappa_5 = 10^{-3}$, $\kappa_6 = 0.75$ defined empirically. Dropout technology is implemented to prevent overhaul on the full-connected network layer. SOFTMAX classifier on the output layer of the network determines the probability distribution y_m of membership

of the central pixel of the input fragment x_m to C

$$\text{speakers classes like } y_m = e^{\lambda_n} \left(\sum_{n=1}^C e^{\lambda_n} \right)^{-1}, \text{ where}$$

$$\lambda_n = \sum_{m=1}^M (w_{n,m} * x_m + b_n), M = 100. \text{ For network training}$$

a stochastic gradient descent method with step 128 was used. The rule for updating weight w_k on k iteration looks like $w_{k+1} = \Delta_{k+1} + w_k$, where

$\Delta_{k+1} = 0.9\Delta_k - 0.004\kappa_7 w_k - \kappa_7 \partial L / \partial w_k$ and $\partial L / \partial w_k$ is a derivative. The initial values of the neuron weights on each layer were set using the zero mean Gaussian distribution with a standard deviation of 1. The training error was 0.0002.

5 RESULTS

The main purpose of the experiments carried out with the above-described ASRSCU was to assess the impact of the operation duration on the recognition system quality performance with the generalization of data on the informativity of the attributes space elements. For this purpose, the ASRSCU software was installed on three computers at the Department of Computer Control Systems of the Vinnytsia National Technical University, which operated for two years. Experiments were attended by 6 speakers (4 male and 2 female), each of whom conducted regular recognition sessions at least once every five days (total of over 2000 recognition sessions per speaker per study period) with fixation of results. The possible result of the recognition session was the correct speaker's recognition, the speaker's confusion (the first kind error, Miss) or denial access (second kind error, False Alarm). The results of experiments are presented in the form of detection error trade-off curves, which show the dependence of the likelihood of the first kind errors P_α occurrence from the second kind errors P_β occurrence

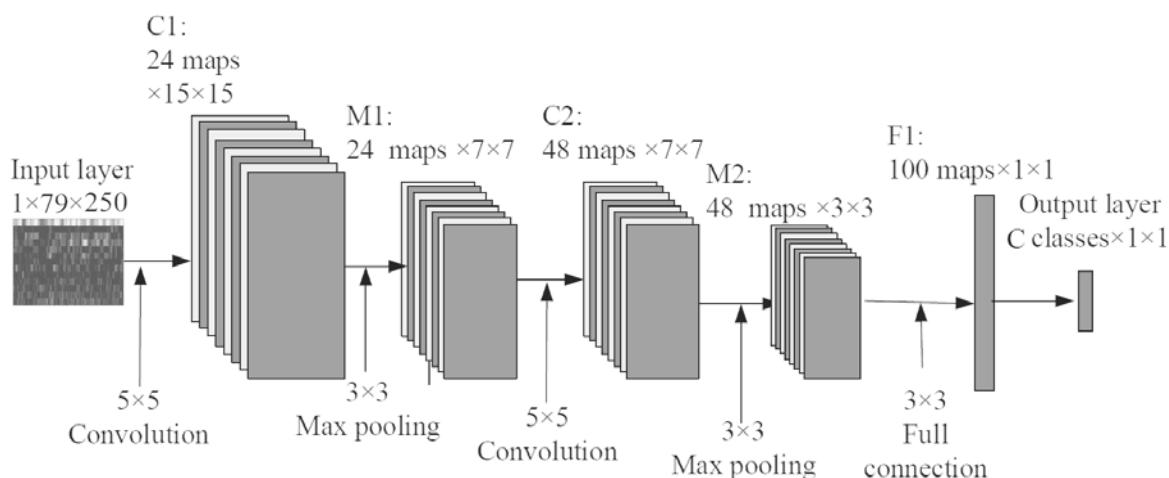


Figure 3 – Architecture of the ASRSCU's convolutional neural network classifier

probability, with the same threshold decision making recognition system's classifier. In particular, Fig. 4 shows the DET curves depending P_α/P_β on the operation duration of the ASRSCU without the re-training of the classifier, to evaluate the drift of the individual features that characterized the speakers in the recognition process.

Fig. 5 shows the DET curves for P_α/P_β compliance with the recommendations for the re-training frequency

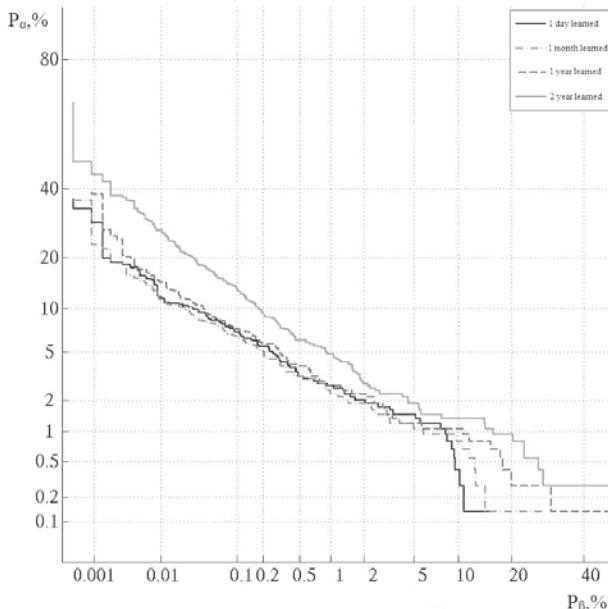


Figure 4 – DET curves P_α/P_β of ASRSCU depending on the duration of operation without re-training of the classifier

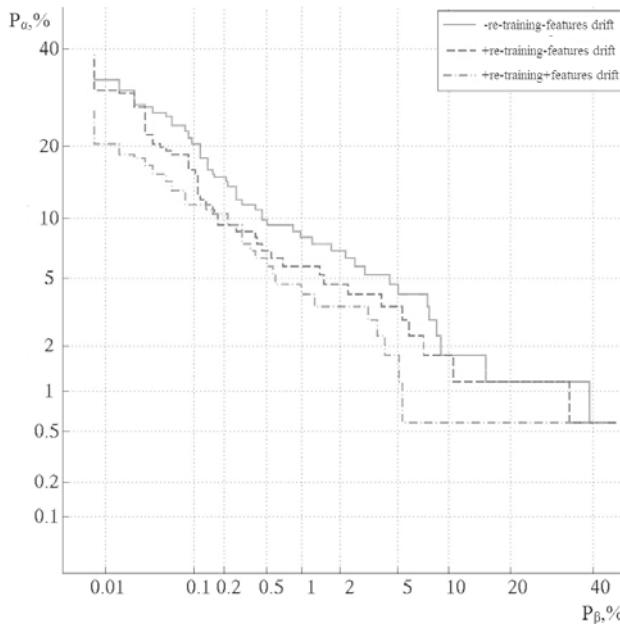


Figure 5 – DET curves P_α/P_β of the ASRSCU, depending on the observance of the recommendations for the re-training frequency and the length of the training sample, taking into account the drift of individual speech parameters

and the length of the training sample, taking into account the drift of individual speech parameters. Parameters of the periodicity of re-training and the length of the training sample were determined for the ASRSCU by the formulas (8) and (13) respectively.

Fig. 6 shows the DET curves P_α/P_β depending on the configuration of the ASRSCU features space, which regularly passed re-training procedures with the parameters of the training sample, regulated by the above theoretical results.

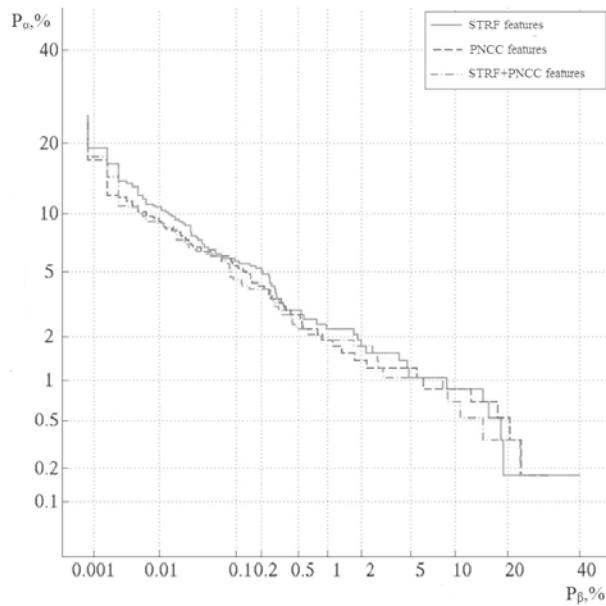


Figure 6 – DET curves P_α/P_β of the ASRSCU, depending on the feature space configuration

The obtained DET curves confirm the theoretical assessments adequacy of the sufficiency of the classifier's complexity to make decisions on the speaker personality of the ASRSCU, confirming the expediency of the re-training procedure of the ASRSCU classifier and correctness determined on the basis of theoretical estimates of this procedure parameters.

6 DISCUSSION

The results of the experiments on a Fig. 4 show that the quality indicators of the ASRSCU during a long-term exploitation process are reduced stochastically without the possibility of identifying an adequate tendency that to some extent allows the use of the speaker recognition system for its intended purpose, but makes its critical application impossible, one of the conditions of which is predictability of the work results.

The results shown in Fig. 5 clearly confirm the expediency of the re-training procedure of the classifier, whose parameters are regulated by the theoretical results obtained in part 4 of the article. It should be noted that, in addition to observing the periodicity of re-training, the obtained results reveal the relationship between the ASRSCU's first and second kind errors probabilities and the composition and the size of the training samples used

for re-training. On the basis of the results analysis of a long-term exploitation of the ASRSCU, the effect the informative features drift on the quality of the system's operation was found which provides objective material for optimization of the ASRSCU factor space by reevaluating the weight of the informative features, which are subsequently visualized before using the convolutional neural network classifier.

The results shown in Fig.6 on the one hand show a greater informativeness of the features based on the power-normalized cepstral speech signals analysis. However, the features that result from the practical application of the theory of spectral-temporal receptive fields make up only about 4% of the features space, but not only can significantly increase the quality of the ASRSCU, but also make the DET curves more linear, that is, in general, stabilize the decision-making process by the system critical use.

CONCLUSIONS

In the article a theoretical analysis of the long-term operation process of the ASRSCU was conducted, on the basis of which the practical recommendations for the stabilization of the quality indicators of the recognition system are formulated.

The scientific novelty of the obtained results can be attributed to the fact that for the first time a theoretical analysis of the problem of an average risk minimization has been made on the empirical operation results of the speaker recognition system for critical use, in which, unlike the existing approaches, non-stationary input data with drift patterns and characteristic features of the recognition system classifier are taken into account, which allowed to estimate the limits of the risk confidence intervals, provided that the re-training sessions were carried out. The practical consequence of the theoretical analysis is the formulated set of measures for assessing the operational risks of long-term use of the ASRSCU. In particular, using (3) the dependence of the wrong classification risk on the dimension of the factor space is described. Based on the formulated measure of informativity (4), an analysis of the training sample on the identification of elements that lead to increased risk was made. Using (8), we describe the influence of the phenomenon of drift of the speech signals parameters on the qualitative performance indicators of the ASRSCU. With the help of (13), an estimation of the operation duration of the ASRSCU was carried out, during which it was impractical to re-train the classifier. Applying (15) the optimal classifier was chosen from the position of minimization of its complexity, taking into account the risks of long-term use of ASRSCU and the possibility of re-training. In particular, the resulting ASRSCU-based convolutional neural network classifier has a compact structure and confirmed the predicted efficiency. The formulated recommendations correctness is confirmed by empirical results presented in the form of DET curves.

Subsequent studies are planned to devote to the detection of the final potential of the spectral-temporal

receptive fields theory in the context of the informative features for speaker recognition synthesis. As the results of experiments have shown, their use not only significantly increases the qualitative performance of the ASRSCU, but also make the DET curves more linear, that's, in general stabilizes the decision-making process by a system of critical use. It is planned to investigate the potential of introducing into the list of information features used in the ASRSCU the human speech source parameters and to make the final factor space optimization.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was carried out within the framework of the cathedral scientific research work number 46K4 "Methods of modeling and optimizing complex systems on the basis of intellectual technologies" at the Department of Computer Control Systems of the Vinnytsia National Technical University with the support of the department staff and the staff of related Department of Automation and Information Measuring Technologies.

REFERENCES

1. Kovtun V. V., M. M. Bykov Ocinjuvannja nadijnosti avtomatyzovanyh system rozpisznavannja movciv krytychnogo zastosuvannja, *Visnyk Vinnyc'kogo politehnichnogo instytutu*, 2017, No. 2, pp. 70–76.
2. Speaker verification over the telephone [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/cad0/bfdec3f4fb1198f63c959580d7217d541a0f.pdf>
3. Introduction to Statistical Learning Theory [Electronic resource]. Access mode: http://www.kyb.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/pdfs/pdf2819.pdf
4. Learning deep architectures for AI [Electronic resource]. - Access mode: https://www.iro.umontreal.ca/~bengioy/papers/fml_book.pdf
5. Scaling learning algorithms towards AI [Electronic resource]. Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/bengio-lecun-07.pdf>
6. Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification [Electronic resource]. Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/chopra-05.pdf>
7. Jang G., Lee T., Oh Y. Learning statistically efficient feature for speaker recognition, *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 7–11 May 2001: proceedings. Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2002, pp. 4117–4120. DOI: 10.1109/ICASSP.2001.940861.
8. Unsupervised feature learning for audio classification using convolutional deep belief networks [Electronic resource]. Access mode: <http://www robotics.stanford.edu/~ang/papers/nips09-AudioConvolutionalDBN.pdf>
9. Learning methods for generic object recognition with invariance to pose and lighting [Electronic resource]. Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/lecun-04.pdf>
10. Learning a nonlinear embedding by preserving class neighbourhood structure [Electronic resource]. Access mode: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.8635&rep=rep1&type=pdf>
11. A tutorial on Principal Components Analysis [Electronic resource]. Access mode: http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
12. Gustafson J. L., Montry G. R., Benner R. E. Development of parallel methods for a 1024-processor hypercube, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*, 1988, Vol. 9, No. 4, pp. 609–638.

13. Bell J., Casasent D., Bell C. G. An Investigation of Alternative Cache Organizations, *IEEE Transactions on Computers*, 1974, Vol. C-23, No. 4, pp. 346–351.
14. Sergienko I. V. Topical directions of informatics. In memory of V. M. Glushkov. New York, Heidelberg, Dordrecht, London: Springer, 2014, 286 p.
15. Sampling – 50 years after Shannon [Electronic resource]. Access mode: <http://bigwww.epfl.ch/publications/unser0001.pdf>
16. Mak M. W., Yu H. B. A study of voice activity detection techniques for NIST speaker recognition evaluations, *Computer, Speech and Language*, 2014, Vol. 28, No. 1, pp. 295–313. DOI: 10.1016/j.csl.2013.07.003.
17. Front-end factor analysis for speaker verification [Electronic resource]. Access mode: http://habla.dc.uba.ar/gravano/ith-2014/presentaciones/Dehak_et_al_2010.pdf
18. Power-normalized cepstral coefficients (PNCC) for robust speech recognitions [Electronic resource]. Access mode: http://www.cs.cmu.edu/~robust/Papers/OnlinePNCC_V25.pdf
19. Speech Processing with a Cortical Representation of Audio [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/f1d8/f93cdb64390b3a65f930cee4346c30bd86e4.pdf>
20. Using spectro-temporal features to improve AFE feature extraction for automatic speech recognition [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/c7c5/04087f2107f0ea9a3cedeeaf5cc0c48c0c92.pdf>
21. Kovtun V. V., Bykov M. M. Doslidzhennja efektyvnosti oznak rozpiznavannja movciv pry vyukorystanni zgortal'nyh nejromerezh, *Optyko-elektronni informacijno-energetichni tehnologii*, 2016, No. 2(32), pp. 22–28.

Received 03.06.2018.
Accepted 25.07.2018.

УДК 681.327.12

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТИВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЦЯ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

Бісікало О. В. – д-р техн. наук, професор, декан факультету комп’ютерних систем і автоматики Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

Ковтун В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

Юхимчук М. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерних систем управління Вінницького національного технічного університету, Вінниця, Україна.

Войтиюк І. Ф. – канд. техн. наук, доцент кафедри комп’ютерних наук Тернопільського національного економічного університету, Тернопіль, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. У статті узагальнюється теорія статистичного навчання для оцінювання результатів довготривалої експлуатації автоматизованої системи розпізнавання мовця критичного застосування (ACPMK3) із урахуванням особливостей об’єкту, із яким працює система, та структурної специфіки такого класу систем розпізнавання.

Мета роботи. Розроблення цілісного комплексу заходів для стабілізації якісних параметрів ACPMK3 при її довготривалій експлуатації.

Метод. У роботі сформульовано комплекс заходів для оцінювання експлуатаційних ризиків тривалого використання ACPMK3. Зокрема, описано залежність ризику неправильної класифікації від розмірності факторного простору. Базуючись на сформульованій мірі інформативності, проаналізовано заходи щодо аналізу навчальної вибірки для виявлення прикладів, які призводять до зростання ризику. Аналітично описано вплив явища дрейфу параметрів мовних сигналів на якісні показники ефективності ACPMK3. Здійснено оцінювання тривалості експлуатації ACPMK3, на протязі якої здійснюють повторне навчання класифікатора недоцільно. Сформульовано рекомендації щодо вибору оптимального класифікатора ACPMK3 з позиції мінімізації його складності із урахуванням ризиків тривалої експлуатації ACPMK3 та можливістю процедури повторного навчання.

Результати. Підтверджено адекватність отриманих у роботі теоретичних результатів представленими у вигляді DET-кривих даними, які узагальнюють інформацію від довготривалих експериментів із ACPMK3, у якій при формуванні конфігурації простору ознак враховувалися нормовані за потужністю кепстральні коефіцієнти та похідні від них характеристики і ознаки, отримані на основі теорії спектрально-temporalних рецептивних полів. В рамках створеної теоретичної концепції проведено оцінювання впливу конфігурації простору ознак та виду і складності класифікатора на стабільність якісних параметрів ACPMK3 при її довготривалій експлуатації.

Висновки. Вперше теоретично проаналізовано проблему мінімізації середнього ризику по емпіричним результатам експлуатації системи розпізнавання мовця критичного застосування, де, на відміну від існуючих підходів, враховано нестационарність вхідних даних із дрейфом індивідуальних параметрів мовних сигналів та характеристичні параметри класифікатора системи розпізнавання, що дозволило оцінити межі довірчих інтервалів ризику за умови здійснення сеансів повторного навчання.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: автоматизована система розпізнавання мовців критичного застосування, планування експерименту, факторний аналіз, теорія статистичного навчання.

УДК 681.327.12

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМАТИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДИКТОРА КРИТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Бисикало О. В. – д-р техн. наук, профессор, декан факультета компьютерных систем и автоматики Винницкого национального технического университета, Винница, Украина.

Ковтун В. В. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем управления Винницкого национального технического университета, Винница, Украина.

Юхимчук М. С. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры компьютерных систем управления Винницкого национального технического университета, Винница, Украина.

Войтиюк И. Ф. – канд. техн. наук, доцент кафедры компьютерных наук Тернопольского национального экономического университета, Тернополь, Украина.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. В статье обобщается теория статистического обучения для оценки результатов длительной эксплуатации автоматизированной системы распознавания диктора критического применения (АСРДКП) с учетом особенностей объекта, с которым работает система, и структурной специфики такого класса систем распознавания.

Цель роботи. Разработка целостного комплекса мер по стабилизации качественных параметров АСРДКП при ее длительной эксплуатации.

Метод. В работе сформулирован комплекс мер для оценки эксплуатационных рисков длительного использования АСРДКП. В частности, описано зависимость риска неправильной классификации от размерности факторного пространства. Основываясь на сформулированной степени информативности, сформулированы меры по анализу обучающей выборки для выявления примеров, которые приводят к росту риска. Аналитически описано влияние явления дрейфа параметров речевых сигналов на качественные показатели эффективности АСРДКП. Осуществлена оценка зависимости длительности эксплуатации АСРДКП, в течение которой осуществлять повторное обучение классификатора нецелесообразно. Сформулированы рекомендации по выбору оптимального классификатора АСРДКП с позиции минимизации его сложности с учетом рисков длительной эксплуатации АСРДКП и возможности процедуры повторного обучения.

Результаты. Подтверждена адекватность полученных в работе теоретических результатов представленными в виде DET-кривых данными, которые обобщают информацию от длительных экспериментов с АСРДКП, в которой при формировании конфигурации пространства признаков учитывались нормированные по мощности кепстральные коэффициенты и производные от них характеристики и признаки, полученные на основе теории спектрально-временных рецептивных полей. В рамках созданной теоретической концепции проведена оценка воздействия конфигурации пространства признаков и вида и сложности классификатора на стабильность качественных параметров АСРДКП при ее длительной эксплуатации.

Выводы. Впервые теоретически проанализирована проблема минимизации среднего риска по эмпирическим результатам эксплуатации системы распознавания диктора критического применения, где, в отличие от существующих подходов, учтена нестационарность входных данных с дрейфом индивидуальных параметров речевых сигналов и характерные параметры классификатора системы распознавания, что позволило оценить пределы доверительных интервалов риска с условием осуществления сеансов повторного обучения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: автоматизированная система распознавания диктора критического применения, планирование эксперимента, факторный анализ, теория статистического обучения.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Ковтун В. В. Оцінювання надійності автоматизованих систем розпізнавання мовців критичного застосування / М. М. Биков, В. В. Ковтун // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2017. – № 2. – С. 70–76.
2. Speaker verification over the telephone [Electronic resource]. – Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/cad0/bfdec3f4fb1198f63c959580d7217d541a0f.pdf>
3. Introduction to Statistical Learning Theory [Electronic resource]. – Access mode: http://www.kyb.mpg.de/fileadmin/user_upload/files/publications/pdfs/pdf2819.pdf
4. Learning deep architectures for AI [Electronic resource]. – Access mode: https://www.iro.umontreal.ca/~bengioy/papers/fml_book.pdf
5. Scaling learning algorithms towards AI [Electronic resource]. – Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/bengio-lecun-07.pdf>
6. Learning a similarity metric discriminatively, with application to face verification [Electronic resource]. – Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/chopra-05.pdf>
7. Jang G. Learning statistically efficient feature for speaker recognition / G. Jang, T. Lee, Y. Oh // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 7–11 May 2001: proceedings. – Salt Lake City, UT, USA: IEEE, 2002. – P. 4117–4120. DOI: 10.1109/ICASSP.2001.940861.
8. Unsupervised feature learning for audio classification using convolutional deep belief networks [Electronic resource]. – Access mode: <http://www robotics.stanford.edu/~ang/papers/nips09-AudioConvolutionalDBN.pdf>
9. Learning methods for generic object recognition with invariance to pose and lighting [Electronic resource]. – Access mode: <http://yann.lecun.com/exdb/publis/pdf/lecun-04.pdf>
10. Learning a nonlinear embedding by preserving class neighbourhood structure [Electronic resource]. – Access mode: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.124.8635&rep=rep1&type=pdf>
11. A tutorial on Principal Components Analysis [Electronic resource]. – Access mode: http://www.cs.otago.ac.nz/cosc453/student_tutorials/principal_components.pdf
12. Gustafson J. L. Development of parallel methods for a 1024-processor hypercube / J. L. Gustafson, G. R. Montry, R. E. Benner // SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing. – 1988. – Vol. 9, № 4. – P. 609–638.
13. Bell J. An Investigation of Alternative Cache Organizations / J. Bell, D. Casasent, C. G. Bell // IEEE Transactions on Computers. – 1974. – Vol. C-23, № 4. – P. 346–351.
14. Sergienko I. V. Topical directions of informatics. In memory of V. M. Glushkov / I. V. Sergienko. – New York, Heidelberg, Dordrecht, London : Springer, 2014. – 286 p.
15. Sampling – 50 years after Shannon [Electronic resource]. – Access mode: <http://bigwww.epfl.ch/publications/unser0001.pdf>
16. Mak M. W. A study of voice activity detection techniques for NIST speaker recognition evaluations / M. W. Mak, H. B. Yu // Computer, Speech and Language. – 2014. – Vol. 28, № 1. – P. 295–313. DOI: 10.1016/j.csl.2013.07.003.
17. Front-end factor analysis for speaker verification [Electronic resource]. – Access mode: http://habla.dc.uba.ar/gravano/ith-2014/presentaciones/Dehak_et_al_2010.pdf
18. Power-normalized cepstral coefficients (PNCC) for robust speech recognitions [Electronic resource]. – Access mode: http://www.cs.cmu.edu/~robust/Papers/OnlinePNCC_V25.pdf
19. Speech Processing with a Cortical Representation of Audio [Electronic resource]. – Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/f1d8/f93cdb64390b3a65f930cee4346c30bd86e4.pdf>
20. Using spectro-temporal features to improve AFE feature extraction for automatic speech recognition [Electronic resource]. – Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/c7c5/04087f2107f0ea9a3cedeeaf5cc0c48c0c92.pdf>
21. Ковтун В. В. Дослідження ефективності ознак розпізнавання мовців при використанні згортальних нейромереж / М. М. Биков, В. В. Ковтун // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2016. – № 2 (32). – С. 22–28.

ІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕЧІТКИХ ЗНАНЬ

Волошин О. Ф. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри моделювання складних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченко, Київ, Україна.

Маляр М. М. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна.

Поліщук В. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмного забезпечення систем Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна.

Шаркаді М. М. – канд. екон. наук, доцент кафедри кібернетики і прикладної математики Ужгородського національного університету, Ужгород, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проведено дослідження актуальної задачі розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань для інформаційних технологій на прикладі різних прикладних задачах, які зустрічаються при функціонуванні соціо-економічних систем із застосуванням апарату нечітких множин, нечіткої логіки і системного підходу.

Метою даної роботи є розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань для прийняття управлінських рішень при функціонуванні соціо-економічних систем в умовах невизначеності за вхідними експертними оцінками.

Об'єктом дослідження є процес моделювання нечітких знань на основі функцій належності для вхідних експертних оцінок за критеріями.

Предметом дослідження є методи і моделі представлення нечітких знань для прийняття рішень в умовах невизначеності.

Метод. Вперше запропоновано інформаційне моделювання нечітких знань на основі функцій належності оцінок за критеріями і їх можливістю застосування для різних прикладних задач. Удосконалено модель представлення нечітких знань для оцінювання платоспроможності підприємств та інвестиційних проектів, сформувавши множину критеріїв для оцінювання та наведено приклади побудов функцій належності для порівнювання вхідних даних. Вперше запропоновано інформаційну модель представлення нечітких знань у вхідних експертних оцінках, на прикладі оцінювання стартап проектів, що дозволить отримати лінгвістичне значення та оцінку достовірності альтернативних варіантів.

Результати. Отриманим результатом дослідження є інформаційне моделювання представлення нечітких знань на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних та стартап проектів за вхідними експертними оцінками. Розроблена модель дає можливість для набраних експертних балів слабо структурованої або неструктуреної задачі отримувати тлумачення, розкриваючи суб'єктивізм експертів та мати кількісну оцінку у неформалізованих задачах. Рациональність оцінки доводить переваги розроблених моделей.

Висновки. У роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань для інформаційної технології на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних проектів та стартап проектів за вхідними експертними оцінками. Розроблення моделей нечітких знань дасть можливість адекватно підійти до оцінювання альтернативних рішень підвищуючи при цьому ступінь обґрунтованості прийняття рішень. Запропоновані інформаційні моделі нечітких знань оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних та стартап проектів можуть бути втілені у роботу інвестиційних установ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інформаційна модель, нечіткі знання, нечіткі множини, функція належності, експертна оцінка, прийняття рішень.

НОМЕНКЛАТУРА

- Ан – необоротні активи;
Ao – оборотні активи;
Вк – власний капітал;
 Bm – матеріальні затрати, витрати на оплату праці та інші операційні витрати;
Дз – довгострокові зобов'язання;
З – поточні зобов'язання;
Знв – забезпечення наступних витрат і цільове фінансування;
I – поточні фінансові інвестиції;
IT – інформаційні технології;
Кв – грошові кошти;
ОПР – особа, що приймає рішення;
Чп – чистий прибуток;
 α – функція належності «бажаних значень»;
 Ξ – відношення належності = {Належить, Скоріше всього належить, ..., Не належить};

Ω = відношення слідування = { Слідує, Скоріше всього слідує, ..., Не слідує};

Λ = відношення зв'язку = {I / АБО, Скоріше всього I / АБО, ...};

$\mu()$ – функція належності;

a_i – елементи терм-множини лінгвістичної змінної;

a – числовий параметр;

a_i – елементи терм-множини лінгвістичної змінної;

b – числовий параметр;

B – лінгвістична змінна;

CF_0 – початкова інвестиція;

CF_k – потік платежів на k -вому кроці, або в k -вому періоді;

Cs – сума кредиту (основний борг);

g_i – згортка суми балів по градаційній шкалі для розглядуваного стартапу;

G_1 – суть ідеї;

G_2 – автори ідеї;

G_3 – порівняльна характеристика ідеї;

G_4 – комерційна значимість ідеї;

G_5 – очікувані результати;

I_1 – чиста приведена вартість проекту;

I_2 – простий термін окупності проекту;

I_3 – співвідношення кредиту до вартості проекту;

I_4 – співвідношення кредиту до цінності проекту/об'єкту;

IC – загальна вартість (інвестиційний бюджет) проекту без урахування відсотків;

K – множина критеріїв ефективності;

K_i – значення i -го критерію;

K_1 – коефіцієнт миттєвої ліквідності;

K_2 – коефіцієнт загальної ліквідності;

K_3 – коефіцієнт фінансової незалежності;

K_4 – коефіцієнт маневреності власних коштів;

K_5 – коефіцієнт діяльності минулих років;

K_6 – коефіцієнт рентабельності виробництва;

K_1^1 – запропонована ідея – це продукт або послуга;

K_2^1 – до якої галузі відноситься розроблена ідея;

K_3^1 – соціальне значення ідеї;

K_4^1 – сила ідеї;

m – шкала критеріальних оцінок;

m_1 – оцінка об'єкту дослідження дуже низька;

m_2 – оцінка об'єкту дослідження низька;

m_3 – оцінка об'єкту дослідження середня;

m_4 – оцінка об'єкту дослідження вище середнього;

m_5 – оцінка об'єкту дослідження висока;

$m()$ – оцінка альтернативи;

n – кількість альтернатив;

\bar{n} – середнє простого терміну окупності;

O_{ij} – оцінка j -ї альтернативи по i -му критерію;

P – множина альтернативних варіантів;

r – ставка дисконтування;

U^* – міркування експерта щодо терму оцінювання;

U_{i1} – «оцінка групи критеріїв значно нижча відносно «бажаного значення»»;

U_{i2} – «оцінка групи критеріїв нижча відносно «бажаного значення»»;

U_{i3} – «оцінка групи критеріїв близька до «бажаного значення»»;

U_{i4} – «оцінка групи критеріїв трошки краща відносно «бажаного значення»»;

U_{i5} – «оцінка групи критеріїв значно краща відносно «бажаного значення»»;

v – ваговий коефіцієнт;

VM – ринкова вартість активу;

w – нормований ваговий коефіцієнт;

X_i – значення лінгвістичних змінних;

x_i – значення функції належності розглядуваного стартапу по групах критеріїв;

Y – значення лінгвістичної змінної.

ВСТУП

Використання інформаційних технологій у різних сферах людської діяльності супроводжується розробкою інтелектуальних систем, які використовують зв'язок знань у загальному випадку з навколошнім світом. Постановка і розв'язання будь-якої задачі зв'язана з конкретними предметними областями, які, як правило, є погано або слабко структурованими. Поняття «знання» за своєю суттю являється багатозначним. Знання у широкому сенсі – сукупність понять, теоретичних побудов і уявлень. Знання у вузькому сенсі – це закономірності предметної галузі (принципи, зв'язки, закони), отримані під час практичної діяльності та професійного досвіду людини. Сьогодні у галузі штучного інтелекту не існує строго формалізованого визначення поняття «знання». Більшість фахівців, розробників інтелектуальних систем використовують таке визначення: знання – це добре структурована інформація, що зберігається в системі і містить усі відомості про предметну область та правила виводу, що необхідні для розв'язку безлічі завдань інтелектуальної системи [1]. Під час проектування та розробки інтелектуальної системи, знання проходять аналогічну трансформацію даних – від більш узагальнених множин до більш вузьких, конкретизованих для даної предметної області. При розробці інтелектуальних систем знання про конкретну предметну область, для якої розробляється система, рідко бувають повними й достовірними. Використання точних методів не дозволяє врахувати вербалну неточність та суб'ективізм експертної інформації, що у свою чергу накладає обмеження на якісне відображення знань для прийняття рішень.

На сьогоднішній день існує велика кількість моделей представлення знань в інтелектуальних системах. Умовно всі моделі можна розділити на наступні групи [1]: логічні, продукційні, семантично мережеві, фреймові, математичні.

Побудова математичних моделей, в цілому, базується на об'єктивній інформації про об'єкт, хоча можливо і на неточній, оскільки при побудові моделі використовуються відомості отримані експертним чином, які відображають змістовні особливості досліджуваного об'єкту і формулюються на природній мові. Опис об'єкту у такому випадку носить нечіткий

характер. Тому для відображення знань про об'єкт доцільно використовувати теорію нечітких множин. Таким чином, проходить перехід знань у класичному розумінні до знань нечітких.

Нечіткі знання у загальному випадку можна описати через лінгвістичні змінні. Наприклад,

Якщо $(a_1 \Xi_1 X_1 \Lambda_1 a_2 \Xi_2 X_2 \Lambda_2 \dots a_l \Xi_l X_l \dots)$, то $\Omega_p B \Xi_j Y$.

Основним елементом при побудові моделі нечітких знань є значення лінгвістичних змінних, які отримуються через модель відповідної функції належності нечіткої множини.

Актуальність роботи полягає у інформаційному моделюванні представлення нечітких знань для різних прикладних задачах із застосуванням апарату нечітких множин, нечіткої логіки і системного підходу до побудови даних моделей, що на сьогодні є нерозкритим достатнім чином. У роботі наведено інформаційне моделювання нечітких знань, на прикладі трьох прикладних задач: оцінювання платоспроможності підприємств, оцінювання інвестиційних проектів та оцінювання стартап проектів. Інформаційне моделювання нечітких знань дає можливість адекватно підійти до оцінювання альтернативних рішень підвищуючи при цьому ступінь обґрутованості прийняття рішень.

Об'єктом дослідження є процес моделювання нечітких знань на основі функцій належності для вхідних експертних оцінок за критеріями.

Предметом дослідження є методи і моделі представлення нечітких знань для прийняття рішень в умовах невизначеностей.

Метою роботи є розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних та стартап проектів за вхідними експертними оцінками.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення мети наукового дослідження необхідно вирішити такі завдання:

– вперше запропонувати інформаційне моделювання нечітких знань на основі функцій належності оцінок за критеріями і їх можливістю застосування для різних прикладних задач;

– удосконалити модель представлення нечітких знань для оцінювання платоспроможності підприємств та інвестиційних проектів, сформувати множину критеріїв для оцінювання та навести приклади побудов функцій належності для порівнювання вхідних даних;

– вперше запропонувати інформаційну модель представлення нечітких знань для вхідних експертних оцінок, на прикладі оцінювання стартап проектів, що дозволить отримати лінгвістичне значення та оцінку достовірності альтернативних варіантів.

Сформулюємо задачу дослідження наступним чином. Нехай маємо на вході деяку множину альтерна-

тивних рішень $P = (P_1, P_2, \dots, P_n)$, для яких потрібно побудувати їх ранжувальний ряд на основі інформаційного моделювання нечітких знань. Розглянемо метод моделювання задачі багатокритеріального вибору за допомогою апарату нечітких множин та побудови їх функцій належності. Множина P може бути як скінченою, тобто допустимі альтернативи можна перевіряти, так і неперервною, заданою умовами обмеженнями.

Позначимо

$K = \{(K_i, \mu(K_i)), i = 1, 2, \dots, m\}$ нечітку множину критеріїв ефективності, за допомогою яких проводиться оцінювання кожної альтернативи із множини P . $\mu(K_i)$ – оцінка функції належності відповідного критерію, побудованою інформаційним моделюванням представлення нечітких знань.

Таким чином, задачу вибору можна сформулювати наступним чином: вибрати найкращу альтернативу із множини P , коли відомі на цій множині оцінки $(K_i, \mu(K_i)), i = 1, 2, \dots, m$.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Останні наукові дослідження свідчать про необхідність інформаційного моделювання нечітких знань, що дозволяє на основі нечіткої, неповної, а особливо експертної інформації отримувати адекватні та об'єктивні знання про об'єкт дослідження. Добування великих масивів даних без їх належного, а головне якісного опрацювання не має смислу.

Використовуючи сучасні методи досліджень, проаналізуємо джерела, що стосуються використання апарату нечіткої математики для створення у системах підтримки прийняття управлінських рішень моделей представлення нечітких знань. Наприклад, у роботах [1–2] розглянуті загальні ідеї та переваги, на яких базуються сучасні погляди щодо використання нечіткої логіки в системах підтримки прийняття рішень. У працях [3–4] представлено використання нечіткої логіки в різних сферах застосування, що дає змогу визначення оптимальних параметрів за умов невизначеності вхідних змінних. У роботі [5] чітко окреслено і введено основи видобутку даних. Питання видобуток даних розглядається головним чином з точки зору машинного навчання і статистики розглядається у роботі [6].

Використання методів нечіткого аналізу в оцінюванні платоспроможності підприємств та створення відповідних систем підтримки прийняття рішень для експертів представлено у [7–8]. Оцінювання інвестиційних проектів та стартап проектів за нечіткими та неповними вхідними даними представлено у роботах [9–10].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Розкриття невизначеності в стабільній ситуації може здійснюватись класичними ймовірнісно-статистичними методами, але при цьому отримують усереднені оцінки, які мають не зовсім коректний характер. В нестабільній ситуації, застосування статистичних методів не є зовсім коректним і тоді рішення

повинні прийматися по правилам, які відповідають принципам ОПР, по відношенню до феномена невизначеності.

Розв'язування задач зводиться до виявлення і дослідження уявлень ОПР, а також до побудови на цій основі адекватної моделі вибору найкращої альтернативи. Важлива особливість задач прийняття рішень постає у необхідності врахування суб'ективних суджень експертів, або ОПР при формалізації представлені виборі найкращої альтернативи. Ця особливість означає, що різні експерти та ОПР в одній і тій самій ситуації прийняття рішень, на основі одної і тієї ж моделі, можуть отримати різні результати.

В подібних ситуаціях прийняття рішень здійснюється на експертних оцінках, при цьому розуміється, що «раціональний експерт» здатний дати точну оцінку. Тим не менше, необхідно відмітити, що будь-який експертний висновок, навіть зроблений по точним об'ективним даним, значно невизначений, чим висновок, який оснований на складній багатовимірній сукупності даних. Таким чином, хоч експертні висновки можуть містити практичні прогнози, але вони містять у собі невизначеність. В поставленій проблемі всі вхідні дані отримуються, в тій чи іншій мірі, експертним шляхом.

Не зменшуючи загальності, будемо розглядати задачі вибору, у яких множина допустимих альтернатив дискретна і скінчена, тоді оцінки значень функцій належності по альтернативах можуть бути представлена у вигляді табл. 1.

Або матриці рішень:

$$O = (O_{ij}), i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Таблиця 1 – Оцінки значень функцій належності по альтернативах

	P_1	P_2	...	P_n
$\mu(K_1)$	O_{11}	O_{12}	...	O_{1n}
$\mu(K_2)$ ⋮	O_{21}	O_{22}	...	O_{2n}
$\mu(K_m)$	O_{m1}	O_{m2}	...	O_{mn}

Функції належності для відповідних критеріїв будемо вибирати враховуючи конкретну прикладну задачу. Наведемо моделі щодо подання, критеріїв оцінювання для різних прикладних задач за допомогою апарату нечітких множин і функцій належності.

Розглядається варіант існування кількісних і якісних критеріїв оцінювання. Запропонуємо побудову моделей нечітких знань за допомогою формалізації критеріїв оцінювання функціями належності. Приведемо найбільш поширені види функцій належності, які можуть ідентифікувати множину критеріїв досліджуваних задач.

Всі критерії визначаються і оцінюються експертами, тому вони несуть у собі певний суб'ективізм, невизначеність даних та інформації і необхідність

об'єднання кількісної та якісної інформації. В результаті цього, стає можливим використовувати апарат нечітких множин для розкриття невизначеності і формалізації якісної інформації. Тому, інформаційне моделювання нечітких знань через функції належності критеріїв дасть можливість більш адекватно підійти до проблеми оцінювання.

Наведемо деякі критерії та підходи до побудов їх функцій належності, що варто застосовувати для оцінювання платоспроможності підприємств [11].

1. Коефіцієнт миттєвої ліквідності (співвідношення поточних фінансових інвестицій та всіх грошових коштів до поточних зобов'язань), розраховується за формулою:

$$K_1 = \frac{K_B + I}{3}. \quad (2)$$

Даний коефіцієнт характеризується тим, як швидко короткострокові зобов'язання можуть бути погашені високоліквідними активами. Тобто, здатність підприємства негайно ліквідувати короткострокову заборгованість [12]. В такому випадку функція належності коефіцієнта миттєвої ліквідності може бути представлена у вигляді s-подібної функції належності:

$$\mu_S(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a < x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < x < b \\ 1, & x \geq b \end{cases}, \quad (3)$$

де a, b – числові параметри, що можуть приймати критерій оцінки і впорядковані співвідношенням: $a < b$. Дані функції належності утворюють нормальні випуклі нечіткі множини з ядром $[b; +\infty)$ і носієм $(a; +\infty)$. Якщо взяти та проаналізувати достатньо велику вибірку середніх підприємств однієї галузі функціонування, тоді отримаємо, що при значенні $K_1 < 0,2$ підприємства не здатні ліквідувати короткострокову заборгованість за короткий час, а при $K_1 > 0,25$ – відповідно швидко короткострокові зобов'язання можуть бути погашені високоліквідними активами. В такому випадку, можемо побудувати s-подібну функцію належності (формула (4)), на основі якої маємо можливість порівняти діяльність підприємств:

$$\mu(K_1; 0,2; 0,25) = \begin{cases} 0, & K_1 \leq 0,2; \\ 32(5K_1 - 1)^2, & 0,2 < K_1 \leq 0,225; \\ 1 - 50(1 - 4K_1)^2, & 0,225 < K_1 < 0,25; \\ 1, & K_1 \geq 0,25. \end{cases} \quad (4)$$

Використовуючи даний підхід можна розкривати невизначеність статистичної інформації аналізуючи той чи інший показник. Решту найпоширеніших кри-

терів оцінювання платоспроможності підприємств та побудови їх функцій належностей наведено у результатах дослідження.

Наведено деякі з відомих критеріїв $I = (I_1, I_2, I_3, I_4)$ та побудуємо їх функції належності, згідно яких можемо оцінити інвестиційні проекти враховуючи фактори невизначеності у прийнятті рішень та невпевненість експерта у своїх висновках.

1. Чиста приведена вартість проекту [7, 13].

Чисту приведену вартість проекту будемо обчислювати за формулою: $NPV = \sum_{k=1}^n \frac{CF_k}{(1+r)^k} + CF_0$.

Результатом обчислення даної формули буде грошова вартість проекту. У даній формулі початкова інвестиція виражається, як власні кошти. У нашому випадку, ми повинні враховувати і вкладені кошти в інвестицію (також сюди можемо включити і відсотки, які нараховуються на вкладені кошти).

Нехай $I_1 = NVP/IC$, тоді функцію належності для даного критерію будемо будувати, як s-подібну, наступним чином:

$$\mu(I_1; 0,2; 1) = \begin{cases} 0, & I_1 \leq 0,2; \\ \frac{(5I_1 - 1)^2}{8}, & 0,2 < I_1 \leq 0,6; \\ 1 - \frac{(5 - 5I_1)^2}{8}, & 0,6 < I_1 < 1; \\ 1, & I_1 \geq 1. \end{cases} \quad (5)$$

2. Простий термін окупності проекту (років). Час, необхідний для покриття витрат на інвестиції (без урахування дисконтування). Функцію належності для даного критерію будемо будувати як z-подібну:

$$\mu_z(I_2, a, b) = \begin{cases} 1, & I_2 \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{I_2 - a}{b - a}\right)^2, & a < I_2 \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b - I_2}{b - a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < I_2 < b \\ 0, & I_2 \geq b \end{cases}. \quad (6)$$

Поставимо a – мінімально-можливий термін окупності інвестиційного проекту, b – відповідно максимально-прийнятний для інвестиційної установи. Так задана функція належності буде містити наступний зміст: чим менший термін окупності, тим функція належності буде прямувати до одиниці, а в протилежному випадку до нуля. Як частковий варіант, термін окупності можемо розглядати на інтервалі [1;5] років, тоді функція належності буде наступною:

$$\mu(I_2; 1; 5) = \begin{cases} 1, & I_2 \leq 1, \\ 1 - \frac{(I_2 - 1)^2}{8}, & 1 < I_2 \leq 3; \\ \frac{(5 - I_2)^2}{8}, & 3 < I_2 < 5; \\ 0, & I_2 \geq 5. \end{cases} \quad (7)$$

3. Співвідношення кредиту до вартості [13].

Дане співвідношення визначимо формулою:

$I_3 = C_s/IC$. В даному випадку, під вартістю проекту розуміються сумарні витрати на проект. Зрозуміло, що критерій $I_3 \in (0;1]$. Тоді, z-подібна функція належності буде мати вигляд:

$$\mu(I_3; 0,2; 0,8) = \begin{cases} 1, & I_3 \leq 0,2; \\ 1 - \frac{2(5I_3 - 1)^2}{9}, & 0,2 < I_3 \leq 0,5; \\ \frac{2(4 - 5I_3)^2}{9}, & 0,5 < I_3 < 0,8; \\ 0, & I_3 \geq 0,8. \end{cases} \quad (8)$$

4. Співвідношення кредиту до цінності проекту/об'єкту [13].

Формула для обчислення даного критерію наступна: $I_4 = C_s/VM$. Заповнюється підсумкова ринкова вартість об'єкту, коли проект буде завершений. У рамках цього критерію, під ринковою вартістю, розуміється оцінна вартість об'єкту, визначувана як найбільша вірогідна ціна, за яку він може бути проданий на відкритому ринку в умовах конкуренції. z-подібна функція належності тоді буде мати вигляд:

$$\mu(I_4; 0,3; 0,9) = \begin{cases} 1, & I_4 \leq 0,3; \\ 1 - \frac{(10I_4 - 3)^2}{18}, & 0,3 < I_4 \leq 0,6; \\ \frac{(9 - 10I_4)^2}{18}, & 0,6 < I_4 < 0,9; \\ 0, & I_4 \geq 0,9. \end{cases} \quad (9)$$

Таким чином, на сонові моделей побудови функцій належності по аналізу діяльності підприємств згідно фінансових звітів, а також аналізу інвестиційної діяльності та на основі опрацювання великої кількості статистичної інформації, маємо можливість порівнювати вхідні дані та розкрити невизначеність для адекватного оцінювання платоспроможності підприємств та інвестиційних проектів.

Наведено інформаційну модель представлення нечітких знань у вхідних експертних оцінках, на прикладі оцінювання стартап проектів.

Запропонуємо загальну множину критеріїв оцінювання «ідей» та класифікуємо їх за п'ятьма групами критеріїв: $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$ [9, 14].

Розглянемо першу групу критеріїв G_1 . Дано група критеріїв має найбільший пріоритет, оскільки у ній міститься критерій, що відображає зміст і значення «ідеї». Для отримання оцінки за кожним критерієм, представимо його у вигляді запитання і опишемо відповідну градаційну шкалу оцінок. Для оцінювання необхідно обрати той варіант, що близький до істини. До цієї групи можемо віднести, для прикладу, такі критерії.

K_1^1 – запропонована ідея – це продукт або послуга?

(що прийшла на деякий час (5 балів); що в даний час у стадії розробки, з маркетинговими дослідженнями та бізнес-планом (20 балів); що на етапі робочого прототипу, який тестується потенційними клієнтами (25 балів); яка в даний час отримує доходи (30 балів)).

K_2^1 – до якої галузі відноситься розроблена ідея? (продукт має відношення до продажу для широкого загалу (роздрібна торгівля, харчування, розваги і т.д.) (10 балів); запропоновану ідею ще ніхто не визнає, як промисловість (20 балів); продукт був популярний серед інвесторів кілька років тому (20 балів); продукт в даний час є популярний серед інвесторів (медичні пристлади, нанотехнології, програмне забезпечення безпеки, економії грошей корпоративного програмного забезпечення і т.д.) (30 балів)).

Наведена шкала бальних оцінок за відповідями на запитання є евристичною і характеризує рівень стартапу. Чим більша кількість балів за відповідями, тим перспективніший проект. За кожним критерієм експерт вибирає один із варіантів відповідей, якому присвоюється відповідний бал. Визначимо згортку оцінок, наприклад, як суму балів відповідей градаційної шкали для групи критеріїв G_1 , що позначимо – g_1 .

Таким чином, отримаємо множину числових змінних $g = \{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\}$ для групи критеріїв оцінок відповідно $G = \{G_1, G_2, G_3, G_4, G_5\}$, що приймають значення на певному числовому проміжку. Кожну з цих числових змінних будемо розглядати як множину-носій лінгвістичної змінної U , що складається із наступних термів: U_{i1} – «оцінка групи критеріїв G_i значно нижча відносно «бажаного значення»»; U_{i2} – «оцінка групи критеріїв G_i нижча відносно «бажаного значення»»; U_{i3} – «оцінка групи критеріїв G_i близька до «бажаного значення»»; U_{i4} – «оцінка групи критеріїв G_i трохи краща відносно «бажаного значення»»; U_{i5} – «оцінка групи критеріїв G_i значно краща відносно «бажаного значення»».

«Бажані значення» – це умовна згортка балів, що задовольняє особу, що приймає рішення при розгляді, оцінюванні та виборі стартапів.

Оскільки отримані числові змінні $\{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5\}$ приймають різні числові значення, то для їх порівняння потрібно мати нормовані величини. Для цього побудуємо модель нечітких знань, як s -подібну функцію належності [7, 15]:

$$\mu_{G_i}(g_i, a, b) = \begin{cases} 0, & g_i \leq a; \\ 2\left(\frac{g_i - a}{b - a}\right)^2, & a < g_i \leq \frac{a+b}{2}; \\ 1 - 2\left(\frac{b - g_i}{b - a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} < g_i < b; \\ 1, & g_i \geq b. \end{cases} \quad (10)$$

Тут a – згортка суми мінімальних балів, b – згортка суми максимальних балів градаційної шкали оцінювання за критеріями у групі G_i . Таким чином, отримані вхідні дані будуть нормовані і порівнювальні.

Для кожної групи критеріїв ОПР має власні міркування, якими повинні бути «бажані значення», тобто сума балів відповідно дляожної групи критеріїв. Їх позначимо вектором $T = (t_1, t_2, \dots, t_5)$ відповідно по групах критеріїв G_i , ($i = \overline{1, 5}$), причому для кожного значення обчислюємо функцію належності за формулою (10). Вектор функції належності «бажаних значень» позначимо через $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5)$, де $\alpha_i = \mu_{G_i}(t_i)$, ($i = \overline{1, 5}$).

Далі відносно «бажаних значень» і отриманих результатів дляожної групи критеріїв G_i , проектуємо значення функції належності на множину носій лінгвістичної змінної U . Це дозволить розкрити суть розглядуваної «ідеї» відносно «бажаних значень».

Для кожного терму U побудуємо функції належності наступним чином (11)–(15).

$$\mu_{U1}\left(x; \alpha - \frac{\alpha}{2}; \alpha - \frac{\alpha}{4}\right) = \begin{cases} 1, & x \leq \alpha - \frac{\alpha}{2}; \\ \frac{3\alpha - 4x}{\alpha}, & \alpha - \frac{\alpha}{2} < x \leq \alpha - \frac{\alpha}{4}. \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_{U2}\left(x; \alpha - \frac{\alpha}{2}; \alpha - \frac{\alpha}{4}; \alpha\right) = \begin{cases} \frac{4x - 2\alpha}{\alpha}, & \alpha - \frac{\alpha}{2} < x \leq \alpha - \frac{\alpha}{4}; \\ \frac{4\alpha - 4x}{\alpha}, & \alpha - \frac{\alpha}{4} < x \leq \alpha. \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{U3}\left(x; \alpha - \frac{\alpha}{4}; \alpha; \alpha + \frac{\alpha}{4}\right) = \begin{cases} \frac{4x - 3\alpha}{\alpha}, & \alpha - \frac{\alpha}{4} < x \leq \alpha; \\ \frac{5\alpha - 4x}{\alpha}, & \alpha < x \leq \alpha + \frac{\alpha}{4}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mu_{U4}\left(x; \alpha; \alpha + \frac{\alpha}{4}; \alpha + \frac{\alpha}{2}\right) = \\ = \begin{cases} \frac{4x - 4\alpha}{\alpha}, & \alpha < x \leq \alpha + \frac{\alpha}{4}; \\ \frac{6\alpha - 4x}{\alpha}, & \alpha + \frac{\alpha}{4} < x \leq \alpha + \frac{\alpha}{2}. \end{cases} \quad (14)$$

$$\mu_{U5}\left(x; \alpha + \frac{\alpha}{4}; \alpha + \frac{\alpha}{2}\right) = \\ = \begin{cases} \frac{4x - 5\alpha}{\alpha}, & \alpha + \frac{\alpha}{4} < x \leq \alpha + \frac{\alpha}{2}; \\ 1, & x \geq \alpha + \frac{\alpha}{2}. \end{cases} \quad (15)$$

В залежності від того, в який інтервал попадає x , дляожної групи критеріїв G_i , вибираємо ту чи іншу функцію належності μ_{Uij} відносно «бажаного значення» α . Обчислюємо функцію належності відносно термів $U_{ij}, (i, j = \overline{1, 5})$ для розглядуваного стартапу.

В результаті, дляожної групи критеріїв G_i отримаємо лінгвістичне значення та оцінку достовірності стартапу. Тобто, достовірність того, що оцінка групи критеріїв належить до одного, або іншого терму.

Нехай експерт по оцінюванню має власні міркування відносно того, якими повинні бути терми за групами критеріїв $G_i - U^*$, табл. 2.

Таблиця 2 – Отримані дані згідно другого рівня

Групи критеріїв	Отриманий терм	Достовірність терму (значення функції належності)	«Бажані значення» терму
G_1	U_{1j}	μ_{U1j}	U_{1j}^*
G_2	U_{2j}	μ_{U2j}	U_{2j}^*
...
G_m	U_{mj}	μ_{Umj}	U_{mj}^*

На наступному кроці обчислюємо оцінки відносно отриманих та бажаних термів за допомогою наступної функції належності (16):

$$\mu(O_i) = \max\{\mu(A_i); \mu(B_i)\}, \quad (16)$$

$$\mu(A_i) = \begin{cases} \mu_{Uij}, & U_{ij} = U_{ij}^*, \\ 0, & U_{ij} \neq U_{ij}^*. \end{cases}$$

$$\mu(B_i) = \begin{cases} \frac{\mu_{Uij}}{2}, & U_{i(j \pm 1)} = U_{ij}^*, \quad (i = \overline{1, m}). \\ 0, & U_{i(j \pm 1)} \neq U_{ij}^*. \end{cases}$$

Отримана функція належності показує на скільки об'єкт дослідження задовільняє побажанням ОПР за кожною групою критеріїв.

Оскільки побудовані функції належності (11)–(15) мають перетини, то для груп критеріїв отримаємо або один, або два терми і відповідно таку ж кількість для них достовірностей. Тому, якщо по групі критеріїв маемо дві оцінки, то побудована функція належності (16) для наступного етапу вибирає більшу з них.

Таким чином, для оцінюваного стартапу вихідними даними моделі буде оцінка «ідеї» та її лінгвістичне значення. На основі цього приймається подальше рішення стосовно безпеки реалізації стартапу проекту [16–17].

Побудована модель може бути представлена, як інформаційна модель отримання нечітких знань для будь-якої прикладної задачі експертного оцінювання. Для набраних експертних балів слабо структурованої або неструктуреної задачі розроблена модель дасть можливість отримати тлумачення, розкриваючи суб'єктивізм експертів та мати розуміння даної проблематики.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо експериментальне дослідження розроблених моделей для задачі прийняття рішень. Для прикладу, розглянемо наступну задачу. Нехай нам задано n – альтернативних варіантів $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$, яких потрібно оцінити та побудувати їх ранжувальний ряд [15].

Нехай ОПР відомі або може задати вагові коефіцієнти кожному критерію ефективності $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ із інтервалу $[0; l]$, $l \in N$ (на розгляд експерта і як йому зручно, наприклад від 0 до 10, або від 0 до 100). Тоді можна визначити нормовані вагові коефіцієнти для кожного критерію:

$$w_i = \frac{v_i}{\sum_{i=1}^m v_i}, \quad i = \overline{1, m}; \quad w_i \in [0; 1]; \quad (17)$$

які відповідають умові $\sum_{i=1}^m w_i = 1$.

Оцінки альтернатив можемо обчислити за допомогою наступної формули [7]:

$$m(P_j) = \sum_{i=1}^m w_i \cdot \mu_{P_j}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (18)$$

Отже, якщо $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ – вектор коефіцієнтів вагомості, $M = \begin{bmatrix} \mu_{P_1} & \dots & \mu_{P_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{P_n} & \dots & \mu_{P_n} \end{bmatrix}$ – матриця зна-

чань

чень функцій належності для альтернатив P_1, P_2, \dots, P_n , то M' – вектор елементів $m(P_1), m(P_2), \dots, m(P_n)$, по яких будується ранжувальний ряд альтернатив і він має вигляд:

$$M' = M \cdot W. \quad (19)$$

Введемо лінгвістичну змінну $L(m)$ – «оцінка об'єкту дослідження». Універсальною множиною для змінної L є відрізок $[0; 1]$, а множиною значень змінної m – терм-множина $L(m) = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}$.

Для встановлення лінгвістичної оцінки об'єкту дослідження отримане значення по формулі (19) зіставимо до одної з терм-множин $L(m) = \{m_1, m_2, m_3, m_4, m_5\}$. Шкалу оцінок можемо визначити наступним чином: $m \in (0,67; 1] - m_5$; $m \in (0,47; 0,67] - m_4$; $m \in (0,36; 0,47] - m_3$; $m \in (0,21; 0,36] - m_2$; $m \in [0; 0,21] - m_1$.

Таким чином, для оцінюваного об'єкту дослідження вихідними даними моделі буде оцінка та її лінгвістичне значення.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Розроблену інформаційну модель представлення нечітких знань для оцінювання платоспроможності підприємств, покажемо на прикладі оцінювання п'яти підприємств P_1, P_2, \dots, P_5 .

Коефіцієнти платоспроможності підприємств та їх функцій належностей можемо представити наступним чином.

1. Коефіцієнт миттєвої ліквідності ((2)–(4)).

2. Коефіцієнт загальної ліквідності (визначається, як оборотні активи розділені на поточні зобов'язання) розраховується за формулою:

$$K_2 = \frac{A_o}{3}. \quad (20)$$

Аналізуючи даний показник, отримаємо, що найоптимальніше коли K_2 в межах від 1 до 2,5. При цьому, за умови низько ліквідних активів, може погіршитися фінансовий стан підприємства, а надто висока ліквідність буде свідчити про недолік у використанні активів. В такому випадку, даний коефіцієнт доцільно представити у вигляді трикутної функції належності, що найкраще описує дану ситуацію:

$$\mu(K_2; 1; 1,75; 2,5) = \begin{cases} 0, & K_2 \leq 1; \\ \frac{4(K_2 - 1)}{3}, & 1 < K_2 \leq 1,75; \\ \frac{10 - 4K_2}{3}, & 1,75 < K_2 < 2,5; \\ 0, & K_2 \geq 2,5. \end{cases} \quad (21)$$

3. Коефіцієнт фінансової незалежності характеризує ступінь незалежності підприємства від зовнішніх запозичень. Визначається, як відношення забезпечення наступних витрат і цільове фінансування, довгострокові зобов'язання та поточні зобов'язання до власного капіталу. Цей коефіцієнт характеризує частку власного капіталу в загальній сумі засобів авансованих у його діяльність. Коефіцієнт обчислюється згідно наступної формули:

$$K_3 = \frac{3B_v + D_z + 3}{B_k}. \quad (22)$$

Коефіцієнт фінансової незалежності, найкраще моделюється трикутною функцією належності, яку представимо за формулою:

$$\mu(K_3; 0; 1; 2) = \begin{cases} 0, & K_3 \leq 0; \\ K_3, & 0 < K_3 \leq 1; \\ 2 - K_3, & 1 < K_3 < 2; \\ 0, & K_3 \geq 2. \end{cases} \quad (23)$$

4. Коефіцієнт маневреності власних коштів (різниця між власним капіталом та необоротними активами розділена на власний капітал) [12]. Наведений показник показує, наскільки мобільні власні джерела засобів з фінансової точки зору. Він є одним з головних показників впливу структури капіталу на прибутковість підприємства і може варіювати залежно від структури капіталу та галузевої належності підприємства. Бажано, щоб коефіцієнт маневреності дешо зростав, але не доцільно допускати різке його збільшення, оскільки автоматично зменшуються інші показники, наприклад, коефіцієнт автономії, що призводить до більшої залежності підприємства від кредиторів.

Коефіцієнт розраховується за наступною формулою:

$$K_4 = \frac{B_k - A_h}{B_k}. \quad (24)$$

Із опису поняття коефіцієнту маневреності власних коштів видно, що найкращий варіант використати трикутну функцію належності, а дослідження на великій вибірці підприємств дозволяє представити загальний вигляд наступний:

$$\mu(K_4; 0; 0,5; 1) = \begin{cases} 0, & K_4 \leq 0; \\ 2K_4, & 0 < K_4 \leq 0,5; \\ 2 - 2K_4, & 0,5 < K_4 < 1; \\ 0, & K_4 \geq 1. \end{cases} \quad (25)$$

5. Коефіцієнт діяльності минулих років.

Даний коефіцієнт містить якісну інформацію про прибуткову діяльність підприємства, яку можемо розкрити за допомогою нечітких чисел [11–12].

Для аналізу прибутків та збитків введемо наступну градацію: (0; 1] – збиткова діяльність за два минулих роки або звіт за попередній звітний рік не наданий; (1; 2] - збиткова діяльність за минулий рік; (2; 3] – діяльність за відсутності прибутків та збитків, або відсутності діяльності; (3; 4] – прибуткова за минулий рік; (4; 5] – прибуткова за два минулих роки.

Функція належності коефіцієнту діяльності минулих років можемо представити у вигляді s -подібної і обчислюємо за формулою:

$$\mu(K_5; 1; 5) = \begin{cases} 0, & K_5 \leq 1; \\ \frac{(K_5-1)^2}{8}, & 1 < K_5 \leq 3; \\ 1 - \frac{(5-K_5)^2}{8}, & 3 < K_5 < 5; \\ 1, & K_5 \geq 5. \end{cases} \quad (26)$$

6. Коефіцієнт рентабельності виробництва (співвідношення чистого прибутку підприємства та всіх витрат діяльності) характеризує ефективність вкладення коштів у дане виробництво. Формула для розрахунку наступна:

$$K_6 = \frac{\text{ЧП}}{\text{Вт}} \quad (27)$$

Функція належності коефіцієнта рентабельності виробництва може бути представлена у вигляді s -подібної функції належності за формулою:

$$\mu(K_6; 0,05; 0,1) = \begin{cases} 0, & K_6 \leq 0,05; \\ 2(20K_6 - 1)^2, & 0,05 < K_6 \leq 0,075; \\ 1 - 8(1 - 10K_6)^2, & 0,075 < K_6 < 0,1; \\ 1, & K_6 \geq 0,1. \end{cases} \quad (28)$$

На основі фінансових звітів [7] даних підприємств обчислюємо критерії оцінки та їх функції належності. Отримані результати та вагові коефіцієнти критеріїв представимо у вигляді табл. 3.

На першому кроці визначимо нормовані вагові коефіцієнти для кожного критерію за формулою (17): $w = (0,20; 0,17; 0,15; 0,20; 0,11; 0,17)$.

Далі обчислюємо оцінки альтернатив за допомогою формулі (18):

$$m(P_1) = 0,20 * 0,87 + 0,17 * 1 + \dots + 0,17 * 0,9 = 0,819.$$

$$m(P_2) = 0,758. \quad m(P_3) = 0,751. \quad m(P_4) = 0,596.$$

$$m(P_5) = 0,866.$$

Таблиця 3 – Вхідні дані по підприємствах

Критерії оцінки	Вагові коефіцієнти $v \in [1;10]$:	Функція належності критеріальних оцінок				
		P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
K_1	9	0,87	0,78	0,65	0,45	0,9
K_2	8	1	0,8	0,6	0,5	1
K_3	7	0,74	0,8	0,85	0,54	0,87
K_4	9	0,57	0,54	0,78	0,7	0,65
K_5	5	0,87	0,87	1	1	1
K_6	8	0,9	0,83	0,74	0,54	0,85

Згідно отриманих оцінок можемо побудувати рангуваньливий ряд альтернатив P_5, P_1, P_2, P_3, P_4 . Отже, найкращою виявилась альтернатива P_5 на основі цього робимо висновок, оскільки $m(P_5) = 0,866$, належить до лінгвістичної змінної m_5 – «оцінка об'єкту дослідження висока».

5 ОБГОВОРЕННЯ

В теорії нечітких множин відсутні умови необхідності статистичної однорідності змінних досліджуваного процесу і однорідності використовуваних для них функцій належності. Експерт у відповідності з загальними правилами побудови функцій належності для різних змінних процесу, відповідно до своїх суб'єктивних суджень, може в загальному випадку вибирати різні по виду і параметрам функції належності. Особливість даної теорії є те, що функції належності експерт може будувати сам, так, як вони не визначаються самою теорією нечітких множин. В даній теорії поняття «середнє значення» використовується не в розумінні статистичного середнього, а лише як лінгвістичне значення деякої змінної.

Також, важливим є те, що процедура переведення нечітких даних не залежить від виду функцій належності. Тому, в теорії нечітких множин допускається, що експерти можуть мати різні представлення видів функцій належності і базових множин, на яких вони визначені, а це не впливає на кінцевий результат. При використанні теорії нечітких множин у оцінці плато-спроможності підприємств чи інвестиційних проектів, разом із отриманою оцінкою ми отримаємо степінь ризику операцій, оскільки оцінки параметрів є нечіткими. Ще однією перевагою використання даної теорії є те, що формульовання природною мовою на стадії оцінки є природними конструкціями для апарату нечітких множин.

Введення теорії нечітких множин усуває сумніви, що «раціональний» експерт повинен давати тільки точні оцінки. Появляється можливість задавати інтервал допустимих значень, при цьому, на відміну від методів інтервальної математики, на такому інтервалі задається розподіл можливостей реалізації того, чи іншого значення у виді функцій належностей.

Результат обчислень також представляється нечітким числом і при цьому отримуємо не менше, як три

оцінки: найбільш раціональну (очікувану), оптимістичну і пессимістичну. Крім цього, експерт взагалі може відмовитись від задання числових оцінок і користуватись лінгвістичними, які за допомогою задання функцій належності отримують строго математичне представлення. Далі, методи теорії нечітких множин дозволяють змоделювати правдоподібні судження, а це дає можливість подолати проблему не монотонності.

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

Отриманим результатом дослідження є інформаційна модель представлення нечітких знань на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних та стартап проектів за вхідними експертними оцінками. Достовірність отриманих результатів забезпечується коректним використанням апарату нечітких множин, що підтверджується результатами дослідження.

Побудова інформаційних моделей представлення нечітких знань має ряд переваг, а саме: точність, робота з абстракціями, передача інформації логічно однозначним способом і підвищення об'єктивності експертних оцінок, розкриває суб'єктивізм експертів, отримується кількісна оцінка неформалізованих задач.

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

ВИСНОВКИ

У роботі розв'язано науково-прикладне завдання розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних проектів та стартап проектів за вхідними експертними оцінками.

Наукова новизна проведеного дослідження наступна:

– вперше запропоновано інформаційне моделювання нечітких знань на основі функцій належності оцінок за критеріями і їх можливістю застосування для різних прикладних задач;

– удосконалено модель представлення нечітких знань для оцінювання платоспроможності підприємств та інвестиційних проектів. Для оцінювання платоспроможності підприємств, наведено приклади побудов функцій належності для порівнювання вхідних даних. Це дає можливість порівнювати вхідні дані та розкрити невизначеність

© Волошин О. Ф., Маляр М. М., Поліщук В. В., Шаркаді М. М., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-8

для адекватного оцінювання платоспроможності підприємств. Наведено відомі критерії оцінювання класичних інвестиційних проектів та розроблено підхід побудови функцій належності для представлення нечітких знань, що дозволяє враховувати фактори невизначеності у прийнятті рішень та невпевненість експерта у своїх висновках;

– вперше запропоновано інформаційну модель представлення нечітких знань для вхідних експертних оцінок, на прикладі оцінювання стартап проектів за п'ятьма групами критеріїв, що дозволить отримати лінгвістичне значення та оцінку достовірності альтернативних варіантів. Розроблена модель дає можливість для набраних експертних балів слабо структурованої або неструктурованої задачі отримувати тлумачення, розкриваючи суб'єктивізм експертів та мати кількісну оцінку неформалізованих інформаційних задач.

Практичне значення одержаних результатів, а саме розроблення інформаційних моделей представлення нечітких знань на прикладах побудови моделей оцінювання платоспроможності підприємств, інвестиційних та стартап проектів за вхідними експертними оцінками можуть бути втілені у роботі інвестиційних установ. Розроблена модель буде корисним інструментом при підвищенні обґрунтованості прийняття рішень інвестиційними суб'єктами.

Подальше дослідження проблематики вбачаємо у апробації подібних моделей для різних прикладних сфер застосувань.

ПОДЯКИ

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антоненко В. М. Сучасні інформаційні системи і технології: управління знаннями: навчальний посібник / В. М. Антоненко, С. Д. Мамченко, Ю. В. Рогушина. – Ірпінь : Національний університет ДПС України, 2016. – 212 с.
2. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень : навч. посіб. / С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с. ISBN 978-966-7809-84-4
3. Зайченко Ю. П. Нечеткие модели и методы в интеллектуальных системах : учеб. пособие / Ю. П. Зайченко. – К. : Слово, 2008. – 341с.
4. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 167 с.
5. Tan P.-N. Introduction to Data Mining / P.-N. Tan, M. Steinbach, V. Kumar. – Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2005. – 365 p.
6. Gaber M. M. Scientific Data Mining and Knowledge Discovery – Principles and Foundations / M. M. Gaber. – Springer, New York, 2010. – 400 p. DOI 10.1007/978-3-642-02788-8
7. Поліщук В. В. Нечіткі моделі і методи оцінювання кредитоспроможності підприємств та інвестиційних проектів : монографія / М. М. Маляр, В. В. Поліщук. –

- Ужгород : РА «АУТДОР-ШАРК», 2018. – 174 с. ISBN 978-617-7132-85-0
8. Зайченко Ю. П. Анализ финансового состояния и оценка кредитоспособности заемщиков – юридических лиц в условиях неопределенности / Ю. П. Зайченко, Ови Нафас Агаи аг Гамиш // ITHEA International Journal "Information Theories and Applications". – 2014. – Vol. 21, No. 3. – С. 241–253.
 9. Model of start-ups assessment under conditions of information uncertainty / [M. Malyar, V. Polishchuk, M. Sharkadi, I. Liakh] // Eastern European Journal of Enterprise Technologies, Mathematics and Cybernetics – applied aspects. – 2016. – 3/4 (81). – P. 43–49. DOI: 10.15587/1729-4061.2016.71222.
 10. Поліщук В. В. Модель інформаційної технології оцінювання ризику фінансування проектів / М. М. Маляр, В. В. Поліщук, М. М. Шаркаді // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 44–52. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-5.
 11. Маляр М. М. Нечітка модель оцінки фінансової кредитоспроможності підприємств / М. М. Маляр, В. В. Поліщук // Східно-Європейський журнал передових технологій. Сер. Математика і кібернетика – фундаментальні і прикладні аспекти. – 2012. – №3/4 (57). – С. 8–16.
 12. Литвин Б. М. Фінансовий аналіз : навч. посібник / Б. М. Литвин, М. В. Стельмах. – К. : «Хай-Тек Прес», 2008. – 336 с.
 13. Malyar M. Choice and evaluation methodics of investment projects / M. Malyar, V. Polishchuk // Košická bezpečnostná revue, Košice, 2013. – No. 1. – P. 117–126.
 14. Матвійчук А. В. Моделювання фінансової стійкості підприємств із застосуванням теорій нечіткої логіки, нейронних мереж і дискримінантного аналізу / А. В. Матвійчук // Вісн. НАН України. – 2010. – № 9. – С. 24–46.
 15. Верес О. М. Технології підтримання прийняття рішень: навч. посібник / О. М. Верес ; за заг. ред. В. В. Пасічника. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 252 с. ISBN 978-966-533-975-9
 16. Kelemen M. Problems of Protected Interests in the Security Sectors / M. Kelemen. – Warszaw: Wydawnictwo Wyższej szkoły menedżerskiej w Warszawie im. Prof. Leszka J. Krzyzanowskiego, 2015. – 114 p. ISBN 978-83-7520-203-8.
 17. Kelemen, M. Využitie technológie LVA (vrstvená analýza hlasu) v bezpečnostnej praxi, na prevenciu proti podvodom u poistovacích a finančných spoločností / M. Kelemen, S. Križovský, Š. Kočan, 1. vyd. – Košice : VSBM, 2012. – 100 p. ISBN 9788089282807.

Стаття надійшла до редакції 14.03.2018.
Після доробки 25.05.2018.

УДК 519.86

ИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЧЕТКИХ ЗНАНИЙ

Волошин А. Ф. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры моделирования сложных систем Киевского национального университета имени Тараса Шевченко, Киев, Украина.

Маляр Н. Н. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики Ужгородского национального университета;

Поліщук В. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры программного обеспечения систем Ужгородского национального университета, Ужгород, Украина.

Шаркаді М. Н. – канд. экон. наук, доцент кафедры кибернетики и прикладной математики Ужгородского национального университета, Ужгород.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Проведено исследование актуальной задачи разработки информационных моделей представления нечетких знаний для информационных технологий на примере различных прикладных задачах, которые встречаются при функционировании социо-экономических систем по применению аппарата нечетких множеств, нечеткой логики и системного подхода.

Целью данной работы является разработка информационных моделей представления нечетких знаний для принятия управленческих решений при функционировании социо-экономических систем в условиях неопределенности по входным экспертным оценкам.

Объектом исследования является процесс моделирования нечетких знаний на основе функций принадлежности для входных экспертных оценок по критериям.

Предметом исследования являются методы и модели представления нечетких знаний для принятия решений в условиях неопределенности.

Метод. Впервые предложено информационное моделирование нечетких знаний на основе функций принадлежности оценок по критериям и их возможностью применения для различных прикладных задач. Усовершенствована модель представления нечетких знаний для оценки платежеспособности предприятий и инвестиционных проектов, сформировав множество критериев для оценки и приведены примеры построений функций принадлежности для сравнения входных данных. Впервые предложена информационная модель представления нечетких знаний в входных экспертным оценкам, на примере оценки стартапов проектов, что позволит получить лингвистическое значение и оценку достоверности альтернативных вариантов.

Результаты. Полученным результатом исследования является информационное моделирование представления нечетких знаний на примерах построения моделей оценки платежеспособности предприятий, инвестиционных и стартапов проектов по входным экспертными оценками. Разработанная модель дает возможность для набранных экспертных баллов слабо структурированной или неструктурированной задачи получать толкование, раскрывая субъективизм экспертов и иметь количественную оценку в неформализованных задачах. Рациональность оценки доказывает преимущество разработанных моделей.

Выводы. В работе решено научно-прикладную задачу разработки информационных моделей представления нечетких знаний для информационной технологии на примерах построения моделей оценки платежеспособности предприятий, инвестиционных проектов и стартапов проектов по входным экспертными оценками. Разработка моделей нечетких знаний, позволит адекватно подойти к оценке альтернативных решений, повышая при этом степень обоснованности принятия решений. Предложенные информационные модели нечетких знаний оценке платежеспособности предприятий, инвестиционных и стартапов проектов могут быть воплощены в работу инвестиционных учреждений.

Ключевые слова: информационная модель, нечеткие знания, нечеткие множества, функция принадлежности, экспертная оценка, принятие решений.

INFORMATION MODELING FUZZY KNOWLEDGE

Voloshyn O. F. – Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of the Department of Complex Systems Modelling in Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine;

Malyar N. N. – PhD, Associate Professor, Associate professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine.

Polishchuk V. V. – PhD, Associate Professor of Department of Software Systems, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine.

Sharkadi M. N. – PhD, Associate Professor of Department of Cybernetics and Applied Mathematics, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The research of the actual problem of the development of information models for the presentation of fuzzy knowledge for information technologies has been carried out on the example of various applied problems that occur during the functioning of socioeconomic systems with the use of fuzzy sets, fuzzy logic and system approach.

The purpose of this work is the development of information models for the presentation of fuzzy knowledge for the adoption of managerial decisions in the functioning of socio-economic systems in the conditions of uncertainty for incoming expert assessments.

Objective. The object of the research is the process of modeling fuzzy knowledge based on membership functions for incoming expert evaluations according to the criteria.

The subject of the research is the methods and models of presentation of fuzzy knowledge for making decisions in conditions of uncertainty.

Method. For the first time a representation information modeling fuzzy knowledge based functions of assessments on the criteria and their possible use for different applications. The model representation of fuzzy knowledge for evaluating the solvency of enterprises and investment projects, forming a set of evaluation criteria and examples of constructions membership functions for comparing input. For the first time a representation of the information model of fuzzy knowledge input to expert estimates, the example of a startup evaluation of projects that will provide linguistic value and reliability assessment of alternatives.

Results. The result of the study is the information modeling of the presentation of fuzzy knowledge on examples of construction of models for assessing the solvency of enterprises, investment and startup projects on incoming expert assessments. The developed model gives an opportunity for the recruited expert points of a weakly structured or unstructured task to receive interpretations, revealing the subjectivity of experts and having a quantitative assessment in non-formalized problems. The rationality of the assessment proves the advantages of the developed models.

Conclusions. The scientific and applied task of developing informational models of presentation of fuzzy knowledge for information technology is solved in the work on examples of construction of models of solvency assessment of enterprises, investment projects and startup of projects according to incoming expert assessments. The development of models of fuzzy knowledge will provide an opportunity to adequately approach the evaluation of alternative solutions, while increasing the degree of validity of decision-making. The proposed information models of fuzzy knowledge of the assessment of enterprises' solvency, investment and startup projects can be implemented into the work of investment institutions.

KEYWORDS: information model, fuzzy knowledge, fuzzy sets, membership function, expert judgment, decision making.

REFERENCES

1. Antonenko V. M. Mamchenko S. D., Rohushyna YU. V. Suchasni informatsiyni sistemy i tekhnolohiyi: upravlinnyy znanymyam: navchalnyy posibnyk. Irpin, Natsionalnyy universytet DPS Ukrayiny, 2016, 212 p.
2. Subbotin S. O. Podannya ta obrabka znan u sistemakh shtuchnoho intelektu ta pidtrymky prynnyattyva rishen: navch. posib. Zaporizhzhya, ZNTU, 2008, 341 p. ISBN 978-966-7809-84-4
3. Zaychenko YU. P. Nechetkiye modeli i metody v intellektualnykh sistemakh: ucheb. posobiye. Kiev, Slovo, 2008, 341 p.
4. Zade L. Poniatyie lingvisticheskoy peremennoy i yego primeniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy. Moscow, Mir, 1976, 167 p.
5. Tan P.-N., Steinbach M., Kumar V. Introduction to Data Mining. Addison-Wesley, Upper Saddle River, NJ, 2005, 365 p.
6. Gaber M. M. Scientific Data Mining and Knowledge Discovery – Principles and Foundations. Springer, New York, 2010, 400 p. DOI 10.1007/978-3-642-02788-8
7. Polishchuk V. V., Malyar M. M., Nechitki modeli i metody otsinyuvannya kredytospromozhnosti pidpryyemstv ta investytsiynyk proekтив: monohrafiya. Uzhhorod, RA «AUTDOR-SHARK», 2018, 174 p. ISBN 978-617-7132-85-0
8. Zaychenko YU. P., Ovi Nafas Agai ag Gamish Analiz finansovogo sostoyaniya i otsenka kreditospособностi zayemshchikov – yuridicheskikh lits v usloviyakh neopredelennosti, *ITHEA International Journal "Information Theories and Applications"*, 2014, Vol. 21, No. 3, pp. 241–253.
9. Malyar M., Polishchuk V., Sharkadi M., Liakh I. Model of startups assessment under conditions of information uncertainty, *Eastern European Journal of Enterprise Technologies*,
10. Polishchuk V. V., Malyar M. M., Sharkadi M. M. Model informatsiynoyi tekhnolohiyi otsinky ryzyku finansuvannya proekтив, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2017, No. 2 (41), pp. 44–52. DOI: 10.15588/1607-3274-2017-2-5.
11. Malyar M. M., Polishchuk V. V. Nechitka model otsinky finansovoyi kredytospromozhnosti pidpryyemstv, *Skhidno-Yevropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohiy. Ser. Matematyka i kibernetika – fundamentalni i prykladni aspekty*, 2012, No. 3/4(57), pp. 8–16.
12. Lytvyn B.M. Finansovyy analiz: Navch. posibnyk. Kiev, «Khay-Tek Press», 2008, 336 p.
13. Malyar M., Polishchuk V. Choice and evaluation methodics of investment projects, *Košická bezpečnostná revue*, Košice, 2013, No. 1/2013, pp. 117–126.
14. Matviychuk A. V. Modeluvannya finansovoyi stiykosti pidpryyemstv iz zastosuvannym teoriy nechitkoyi lohiky, nevronnykh merez i dyskryminantnoho analizu, *Visn. NAN Ukrayiny*, 2010, No. 9, pp. 24–46.
15. Veres O. M. za zah. red. V. V. Pasichnyka Tekhnolohiyi pidtrymannya prynnyattyva rishen: navch. Posibnyk, 2-he vyd. Lviv, Vyadvnytstvo Lvivskoyi politekhniki, 2013, 252 p. ISBN 978-966-533-975-9
16. Kelemen M. Problems of Protected Interests in the Security Sectors. Warszaw, Wydawnictwo Wyzszej szkoly menedzerskiej w Warszawie im. Prof. Leszka J. Krzyzanowskiego, 2015, 114 p. ISBN 978-83-7520-203-8.
17. Kelemen M., Križovský S., Kočan Š., 1. vyd. Využitie technológie LVA (vrstvená analýza hlasu) v bezpečnostnej praxi, na prevenciu proti podvodom u pojsovacích a finančných spoločností. Košice, VSBM, 2012, 100 p. ISBN 9788089282807.

THE CRITERION FOR FEATURE INFORMATIVENESS ESTIMATION IN MULTI ROBOT TEAMS CONTROL

Humeniuk M. O. – PhD, Associate Professor of Department of Unmanned Aircraft Systems Applications, Zhytomyr Military Institute named after S. P. Koroliov, Zhytomyr, Ukraine.

Sashchuk I. M. – PhD, Senior Research Fellow, Deputy Chief of the Institute for Academic and Scientific Work, Zhytomyr Military Institute named after S. P. Koroliov, Zhytomyr, Ukraine.

Zhuravsky Yu. V. – Dr.Sc., Senior Research Fellow, Leading Researcher at the Scientific Center, Zhytomyr Military Institute named after S. P. Koroliov, Zhytomyr, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The task of automation of feature set informativeness estimation process in multi robot teams control is solved. The object of the research is the process of multi robot teams control. The subject of the research is the criterion of feature set informativeness estimation.

Objective. The research objective is to develop the criterion for feature set informativeness estimation in multi robot teams control.

Method. The criterion for feature set informativeness estimation is proposed. The developed criterion is based on the idea that feature set informativeness is computed according to values of the prior probabilities of finding features in the descriptions of the environment states. The use of the proposed criterion allows to efficiently solve the problem of feature set informativeness estimation, leading to effective solution of the multi robots control task. The developed criterion is based on the maximizing mutual information criterion and can be applicable when measurements are interdependent and environment has a variable number of states. The criterion doesn't require to construct models based on the estimated feature combinations, in such a way considerably reducing time and computing costs for multi robot teams control. Application of the proposed criterion for feature set informativeness estimation allows to make a decision how much a new observation will increase the certainty of the robots' beliefs about the environment state which is observed.

Results. The software which implements the proposed criterion for feature set informativeness estimation and allows to manage multi robot teams has been developed.

Conclusions. The conducted experiments have confirmed operability of the proposed criterion for feature set informativeness estimation and allow to recommend it for multi robot teams control in practice. The prospects for further researches may include the modification of the known multi robot teams control methods and the development of new ones based on the proposed criterion for feature set informativeness estimation.

KEYWORDS: multi robot teams control, mutual information, informativeness criterion, feature set informativeness.

NOMENCLATURE

$p(L_i)$ is a prior probability of the environment state L_i ;

$p(x_{kj})$ is the prior probability of the situation when a feature k has value j ;

$p(x_{kj} / L_i)$ is a probability of the situation when a feature k has value j on condition that output parameter has value L_i ;

N is a number of possible environment states $i = \overline{1, N}$;

$p(L_i / x_{kj})$ is a probability of the situation when the environment state has value L_i on condition that feature has value x_{kj} ;

J is a number of feature values $j = \overline{1, J}$;

n is a number of features $k = \overline{1, n}$;

a_c is a possible robots action;

D is a number of possible robots actions $c = \overline{1, D}$;

$H_0(L)$ is a prior entropy of the environment state;

$I_k(L)$ is a informativeness of the k -th feature;

$I(L)$ is a informativeness of the feature set;

$E(L)$ is a relative informativeness of the feature set;

$I_\beta(L)$ is a informativeness of the β feature;

$(I_\beta(L))_{\max}$ is a maximum possible informativeness of the β feature;

$\gamma_{k\beta}$ is a coefficient characterizing the statistical connection between k and β -th features;

$p_e(L)$ is a classification error of the environment state;

p_e^r is a required classification error of the environment state;

$M_j(x_{2q}), M_\phi(x_{1J})$ are the frequencies of the values of the features;

W is a sum of all measured frequencies of the consistent occurrence of the feature values;

$[M_{j\phi}^0]$ are hypothetical frequencies;

$H_r(L)$ is the required entropy of the environment state;

$I_r(L)$ is the required amount of mutual information of the environment state;

$I^*(L)$ is an amount of mutual information which multi robot teams receive from action;

I_r^* and I^* are amounts of information that can be determined based on the value of the required probability of the classification error.

INTRODUCTION

Multi robot teams that intelligently gather information have the potential to transform industries as diverse as agriculture, space exploration, mining, environmental monitoring, search and rescue, and construction. Despite large amounts of research effort on active perception problems, there still remain significant challenges.

The ultimate goal of an active perception problem is to estimate some unknown quantity of interest. Most modern perception approaches are probabilistic [1]; instead of forming a single concrete guess of what something is, they determine a probability distribution over possible values that it could be. Consequently, the goal of an active perception strategy is to reduce the uncertainty of the probabilistic estimate as quickly as possible. To formally define this goal of “uncertainty reduction,” a lot of modern approaches use information theory. According to them the robots are controlled to seek informative observations by moving along the gradient of mutual information at each time step. Mutual information is a quantity from information theory that predicts how much a new observation will increase the certainty of the robots’ beliefs about the environment state. Thus by moving along the mutual information gradient, the robots maximally increase the informativeness of their next observation.

To control this complex process we have to use feature set informativeness estimation methods that allows us to make a decision how much a new observation will increase the certainty of the robots’ beliefs about the environment state.

Feature set informativeness estimation methods generally use classification error obtained by the model which was constructed using estimated data set as criterion of feature set informativeness estimation [2, 3]. Such approach needs significant computational and time costs of resources, because it is connected with computationally complex procedure of model synthesis which should be performed for every estimated feature set [2, 3].

Informational criteria [2, 4] don’t require to perform computationally complex procedure of mathematical model synthesis for estimation of feature set informativeness. However, in the known approaches of multi robot teams control, such criteria suppose that features of initial data sample are independent. Therefore it is difficult to use such criteria in practice and it is unsuitable for situations when features in initial samples are interdependent.

Also, however there is a binding relationship between mutual information and classification error there is no functional relationship between these values. This does not allow us to make precise assessment of the classifica-

tion error in the known approaches of multi robot teams control.

The described shortcomings cause actuality of the development of the criterion for feature set informativeness estimation, which is free from these drawbacks.

The research objective is to develop the criterion for feature set informativeness estimation which enables to estimate the classification error in the task of multi robot teams control.

1 PROBLEM STATEMENT

Suppose we have prior probabilities $p(x_{kj} | L_i)$ and $p(L_i)$ for environment states $L = \{L_1, L_2, \dots, L_N\}$ and feature set $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. Every feature x_k is characterized by values of attributes $x_k = \{x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kJ}\}$. Given a set of possible robots actions $A = \{a_1, a_2, \dots, a_D\}$. Then the problem of multi robot teams control strategy can be ideally stated [1] as driving the team to obtain measurements which lead to maximize the mutual information $I^*(L) = \max_{a \in A} I(L)$.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Bayesian approaches for estimation have a rich history in robotics, and mutual information has recently emerged as a powerful tool for controlling robots to improve the quality of the Bayesian estimation, particularly in multi robot systems. As an early example, in [5, 6] was proposed controlling multiple robot platforms so as to increase the mutual information between the robots sensors and the position of a target in tracking applications. In [7] was used a similar method for exploring and mapping uncertain environments. The problem of planning paths through an environment to optimize mutual information was investigated in [8–10].

In [11] was used mutual information for control with highly non Gaussian belief states, achieving scalability by using a pairwise approximation to mutual information. In [12] was used the identical gradient of mutual information to drive a network of robots for general environment state estimation tasks. In [13] was developed a consensus algorithm to achieve decentralization and a sampling strategy to reduce complexity.

Information theoretic costs metrics also have been used to manage sensors [14], and led to algorithms to control sensor networks for information gathering over an area by parameterizing the motion of collectives of vehicles [15]. The optimal probing control law to minimize Shannon entropy for the dual control problem was shown to be the input that maximizes mutual information [16]. A property relating probability distributions, the alpha-divergence, was computed for particle filters and applied to manage sensors with binary measurements, though scalability in sensor network size was not addressed, and Shannon entropy was only found in the limit of the presented equations [17]. Probability-of-detection was computed using both grid cell and particle filter estimators,

and experimentally demonstrated [18]. An approximate method was used to estimate the expected entropy for particle filters over a finite horizon [19]. Gaussian particle filtering was used with a mutual information objective function, though the technique approximates the posterior probability distribution as Gaussian at every update [20]. The version of mutual information approximation techniques was presented in [21].

For planning approaches that seek to maximize mutual information, in [22] derived approximation guarantees for greedy maximizations of mutual information and other submodular set functions. These results were applied to mobile robot environmental monitoring problems in [23, 24]. These guarantees only hold in offline settings where teams do not update their actions based on measurements they receive. In [25] was developed a sampling based strategy for maximizing a variety of information metrics with asymptotic optimality guarantees. However, they assume that information is additive across multiple measurements (i.e., measurements are independent). This assumption limits cooperation in multi-robot settings [1] and can lead to overconfidence when considering multiple measurements of the same quantity.

Information-theoretic objectives have also been used for planning and control in robotics for related information rich tasks involving uncertainty such as inspection [26], environment modeling [27], extrinsic calibration of LIDAR sensors [28], visual servoing [29], and active object modeling [30]. They have also been used for applications outside of active perception. For example, Kretzschmar and Stachniss [31] use mutual information as a criterion for storing a minimal number of laser scans toward map reconstruction.

It is necessary to admit that classification methods generally use classification error obtained by the model which was constructed using estimated data set as criterion of statistic effectiveness estimation [2, 3]. But such approach needs significant computational and time costs of resources, because it is connected with computationally complex procedure of model synthesis which should be performed for every estimated feature set [2].

Although there is a binding relationship between mutual information and prognostication or classification error there is no functional relationship between these values. This does not allow to make reliable assessment of the classification error [32] and to estimate the ratio of incorrectly recognized measurements to the total number of measurements for multi robot teams.

It means that for planning approaches to multi robot teams control which seek to maximize mutual information the increasing of the mutual information is not the same as decreasing the ratio of incorrectly recognized measurements to the total number of measurements.

Thus disadvantages of the known criteria for feature set informativeness estimation in robotics cause actuality of the development of criterion which should be free from the discovered drawbacks.

The described shortcomings cause actuality of the development of the criterion for feature set informativeness estimation, which is free from these drawbacks.

3 MATERIALS AND METHODS

The entropy of the environment state L on condition that output parameter x_k has value x_{kj} can be defined as:

$$H(L/x_{kj}) = -\sum_{i=1}^N p(L_i/x_{kj}) \log_N p(L_i/x_{kj}).$$

Use Bayes' Rule:

$$\begin{aligned} H(L/x_{kj}) &= -\frac{1}{p(x_{kj})} \sum_{i=1}^N p(L_i) p(x_{kj}/L_i) \log_N \frac{p(L_i) p(x_{kj}/L_i)}{\sum_{i=1}^N p(L_i) p(x_{kj}/L_i)} = \\ &= -\frac{1}{p(x_{kj})} \left(\sum_{i=1}^N p(L_i) p(x_{kj}/L_i) \log_N p(L_i) p(x_{kj}/L_i) - \right. \\ &\quad \left. - \sum_{i=1}^N p(L_i) p(x_{kj}/L_i) \log_N \sum_{i=1}^N p(L_i) p(x_{kj}/L_i) \right). \end{aligned}$$

To obtain an entropy solution, we find the sum of values $H(L/x_{kj})$ for all values with weights, proportional to the probability of occurrence of each values $p(x_{kj})$. Then

$$\begin{aligned} H(L/x_k) &= -\sum_{j=1}^J p(x_{kj}) H(L/x_{kj}) = -\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N p(L_i, x_{kj}) \times \\ &\quad \times \log_N p(L_i, x_{kj}) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^N p(L_i, x_{kj}) \sum_{i=1}^N \log_N p(L_i, x_{kj}). \end{aligned}$$

The value of the prior entropy of the solution will be found by expression $H_0(L) = -\sum_{i=1}^N p(L_i) \log_N p(L_i)$.

The mutual information of the environment state on condition that measurements are independent is defined as

$$I(L) = \sum_{k=1}^n I_k(L).$$

However, to estimate the informativeness of a group of statistically related features using the Shannon measure is rather difficult. Therefore it is difficult to estimate mutual information for situations when measurements are interdependent.

To solve this problem we use method which was defined in [33]. According to this method informativeness for situations when features are interdependent can be estimated as

$$I(L) = \sum_{k=1}^n I_k(L) \left[1 - \sum_{\beta=0}^{k-1} \gamma_{k\beta} \frac{I_\beta(L)}{(I_\beta(L))_{\max}} \right]. \quad (1)$$

The statistical relationships between features in (1) are taken into account in all of their pair combinations. The connections of higher orders were not taken into account because of their non-essentialness for practical calculations [33]. As can be seen from (1), in order to find the informativeness of the feature set, it is necessary to estimate the statistical relationships between them, which are characterized by the coefficient $\gamma_{k\beta}$. To do this we use the criterion, which are based on the measured frequencies differences of the consistent occurrence of the features discrete values with a hypothetical distribution of frequencies, which corresponds to the condition of the features independence.

First, assume that the features are statistically independent. The hypothetical frequency distribution, which corresponds to this condition, needs to be verified statistically. To do this, use the Pearson criterion.

Assume that it is necessary to quantify the statistical relationship between the features x_1 and x_2 , which in general can have several values x_{1j} and $x_{2\phi}$ ($\phi=1, q$, q – maximum number of values for the feature ϕ).

In Table 1 shows the distributions of the measured frequencies $M_{j\phi}$ of the compatible appearance of the j value of the x_1 feature and the ϕ value of the x_2 feature.

In this table ($M_j(x_{2q}) = \sum_{\phi=1}^q M_{j\phi}$ for $j = const$);

$$(M_\phi(x_{1J}) = \sum_{j=1}^J M_{j\phi} \text{ при } \phi = const).$$

$$W = \sum_{j=1}^J M_j(x_{2\phi}) = \sum_{\phi=1}^q M_\phi(x_{1j}).$$

$$\left[M_{j\phi}^0\right] = \left[M_j(x_{2q})\right] \left[M_\phi(x_{1J})\right] / W.$$

From hypothetical frequencies $\left[M_{j\phi}^0\right]$ we can find

$$v^2 = \sum_{j=1}^J \sum_{\phi=1}^q \frac{\left(M_{j\phi} - \left[M_{j\phi}^0\right]\right)^2}{\left[M_{j\phi}^0\right]} . \quad (2)$$

The double sum (2) is distributed approximately $\chi_{k\beta}^2$ with the number of degrees of freedom $\xi = (J-1)(q-1)$ [33]. Therefore, we will assume that $\chi_{k\beta}^2 = v^2$.

The larger the value $\chi_{k\beta}^2$ for each pair of feature x_k and x_β , the greater the statistical relationship between them (for a statistically independent pair of features $M_{j\phi} = \left[M_{j\phi}^0\right]$ and $\chi_{k\beta}^2 = 0$).

Table 1 – Frequencies of compatible appearance of the j value of the x_1 feature and the ϕ value of the x_2 feature

x_1	Value x_2				
	x_{21}	x_{22}	...	x_{2q}	Σ
x_{11}	$\left[M_{11}^0\right]$ M_{11}	$\left[M_{12}^0\right]$ M_{12}	...	$\left[M_{1q}^0\right]$ M_{1q}	$M_1(x_{2q})$
x_{12}	$\left[M_{21}^0\right]$ M_{21}	$\left[M_{22}^0\right]$ M_{22}	...	$\left[M_{2q}^0\right]$ M_{2q}	$M_2(x_{2q})$
...	$\left[M_{j\phi}^0\right]$ $M_{j\phi}$
x_{1J}	$\left[M_{J1}^0\right]$ M_{J1}	$\left[M_{J2}^0\right]$ M_{J2}	...	$\left[M_{Jq}^0\right]$ M_{Jq}	$M_J(x_{2q})$
Σ	$M_1(x_{1J})$	$M_2(x_{1J})$...	$M_q(x_{1J})$	W

When using Pearson's criterion in expression (1), the value $\chi_{k\beta}^2$ for the pairs of features should be normalized by dividing them by $(\chi_{k\beta}^2)_{max}$ for this pair of features, that is, one has to find $\gamma_{k\beta} = \chi_{k\beta}^2 / (\chi_{k\beta}^2)_{max}$ where $(\chi_{k\beta}^2)_{max} = W$.

However, the value of the mutual information depends on the number of the investigated system states. However, when conducting robots measurements we can have different number of the explored environment state. Therefore, in practical calculations of informative it is expedient to use the relative mutual information received by the multi robots team, whose value does not depend on the number of the environment states.

We can find it as $E(L) = \frac{I(L)}{H_0(L)}$.

The required amount of mutual information of the environment state $I_r(L)$ to provide the required classification error $p_e^r(L)$ is defined as $I_r(L) = H_0(L) - H_r(L)$, where $H_r(L)$ is the required entropy of the environment state L .

To provide the required value of the feature set informativeness for multi robot teams control the condition

$$p_e(L) \leq p_e^r(L) \quad (3)$$

have to be met.

However, as noted in [32], there is no functional relationship between conditional entropy and classification error.

Therefore, the condition $I(L) \geq I_r(L)$ is necessary, but not sufficient to ensure the necessary probability of making a false decision about the state of environment.

So, if a decision is taken on one of the two states of the system, in order to unambiguously guarantee the necessary value of the average probability of making a false decision, it is enough to fulfill the condition

$$I(L) - I_r(L) \geq I^* \text{ or}$$

$$H_r(L) - H(L/x) \geq I^*, \quad (4)$$

where

$$\begin{aligned} I^* = & -H(L/x)(1 + 0.5 \log_2 0.5H(L/x)) - \\ & -(1 - 0.5H(L/x))\log_2(1 - 0.5H(L/x)) \end{aligned} \quad (5)$$

to ensure compliance with the condition (3).

We prove the sufficiency of the condition (4), for this we use the well-known expressions for the exact upper and lower bounds of the mean condition entropy $H(L/x)$ at a given average probability of error $p_e(L)$. These expressions in accordance with the theorem of Kovalevsky [32] is presented in this form

$$\begin{aligned} \sup H(L/x) = & -p_e(L)\log_2 p_e(L) - (1-p_e(L))\log_2(1-p_e(L)), \quad (6) \\ \inf H(L/x) = & 2p_e(L). \quad (7) \end{aligned}$$

On the basis of expression (7), we conclude that for a given average conditional entropy $H(L/x)$, for the average probability of recognition error $p_e(L)$, inequality holds true

$$p_e(L) \leq 0.5H(L/x). \quad (8)$$

Inequality (8) is correct, since assuming the opposite; we find that $H(L/x) < 2p_e(L)$ this contradicts the condition (7).

We will proceed from the fact that the condition (4) is fulfilled, then, taking into account (5), we obtain

$$H_r(L) < -0.5H(L/x)\log_2 0.5H(L/x) - \\ -(1 - 0.5H(L/x))\log_2(1 - 0.5H(L/x)). \quad (9)$$

Under this condition

$$p_e^r(L) < 0.5H(L/x). \quad (10)$$

Indeed, let's assume the opposite, that is $p_e^r(L) \geq 0.5H(L/x)$. With this assumption, taking into account that $H(L/x) \leq 1$, and $\sup H(L/x)$ according to (5) is monotonically increasing function from $p_e(L)$ when $p_e(L) \leq 0.5$, we obtain

$$H_r(L) \geq -0.5H(L/x)\log_2 0.5H(L/x) - \\ -(1 - 0.5H(L/x))\log_2(1 - 0.5H(L/x)).$$

However, this inequality contradicts (9). Thus, inequality is confirmed (10). Comparison (8) and (10) allow us to conclude that when the condition (4) is fulfilled so (3) is also fulfilled.

Thus, ensuring the required value of the entropy solution is a necessary, but not sufficient condition for the decision on the state of the environment with the required probability. In order to ensure a condition $p_e(L) \geq p_e^r(L)$, it is sufficient that the condition (3) is fulfilled.

However, the sufficiency of the condition (3) can be satisfied not only by the fulfillment of conditions (4), but also the fulfillment of the condition

$$H_r(L) - H(L/x) \geq I_r^*. \quad (11)$$

Thus, knowing the lower boundary of the required conditional entropy $H_r(L/x)$ at the given required probability of classification error p_e^r , the value I_r^* should be defined as the difference between the required entropy $H_r(L)$ and $\inf H_r(L/x)$ by the expression

$$I_r^* = H_r(L) - \inf H_r(L/x), \quad (12)$$

where

$$\inf H_r(L/x) = 2p_e^r. \quad (13)$$

Substituting the expressions (13) into expression (12) we obtain:

$$I_r^* = -p_e^r \log_2 p_e^r - (1 - p_e^r) \log_2(1 - p_e^r) - 2p_e^r. \quad (14)$$

Let us prove the condition (11). On the basis of expression (14), the condition (11) can be represented as $H_r(L) - H(L/x) \geq H_r(L) - 2p_e^r$. Or

$$H(L/x) < 2p_e^r. \quad (15)$$

We will show that under this condition $p_e < p_e^r$. Yes, in fact, assuming the opposite, that is, that $p_e \geq p_e^r$ on the basis of expression (7) we obtain $\inf H(L/x) \geq 2p_e^r$.

However, this condition contradicts the condition (15). Consequently, the sufficiency of the condition (11) is proved.

The value of the lower bound of the required conditional entropy in accordance with [32] can be found taking into account the a priori probabilities of in terms of expression

$$\inf H_r(L/x) = -p_0 \log_2 \left(\frac{p_0}{p_0 + p_e^r} \right) - p_e^r \log_2 \left(\frac{p_e^r}{p_0 + p_e^r} \right). \quad (16)$$

Where $p_0 = \min\{p(L_1), p(L_2)\}$.

Therefore, in accordance with (12), and taking into account (16), the value I_r^* can be determined by expression

$$I_r^* = -p_e^r \log_2 p_e^r - (1-p_e^r) \log_2 (1-p_e^r) + p_0 \log_2 \left(\frac{p_0}{p_0 + p_e^r} \right) + p_e^r \log_2 \left(\frac{p_e^r}{p_0 + p_e^r} \right). \quad (17)$$

4 EXPERIMENTS

Distribution of the entropy $H(L/x)$, depending on classification error p_e , is presented in the Fig. 1.

Distribution of mutual information I_r^* , depending on the entropy $H(L/x)$, is presented in the Fig. 2.

Distribution of I_r^* , depending on p_e^r with condition $p_0 = const$, is presented in the Fig. 3.

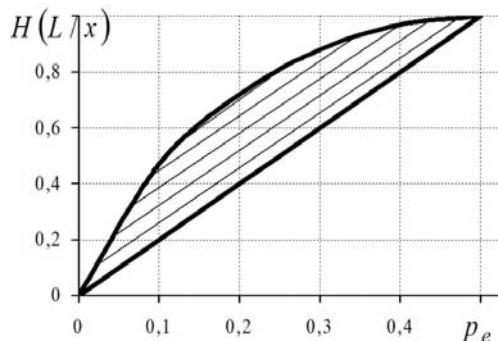


Figure 1 – Graph of dependence between $H(L/x)$ and p_e

Numerical study of the developed software system application based on the proposed estimation criterion and the traditional methods of effectiveness estimation shows that proposed criterion in average by 5% reduces the informativeness of the feature set.

For example in Tables 2–4 are presented probabilities of the situation when a features has different values on condition that output parameters has values L_1 and L_2 .

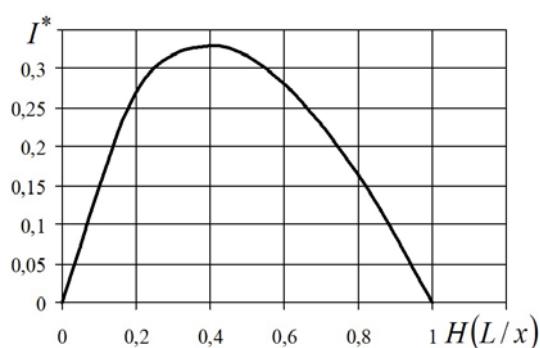


Figure 2 – Graph of dependence between I_r^* and $H(L/x)$

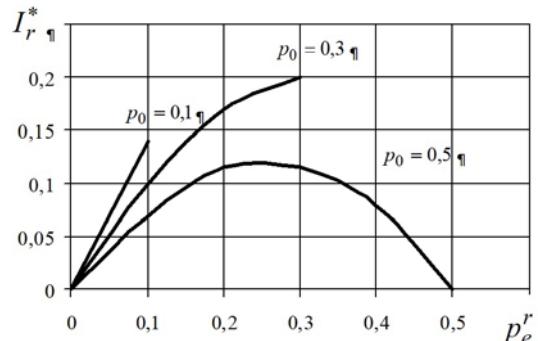


Figure 3 – Graph of dependence between I_r^* and p_e^r if $p_0 = const$

Table 2 – Probabilities $p(x_1 / L_i)$ of the feature x_1

state L_i	x_{11}	x_{12}	x_{13}
L_1	0,1	0,8	0,1
L_2	0,5	0,1	0,4

Table 3 – Probabilities $p(x_2 / L_i)$ of the feature x_2

state L_i	x_{11}	x_{12}	x_{13}
L_1	0,1	0,8	0,1
L_2	0,5	0,1	0,4

Table 4 – Probabilities $p(x_3 / L_i)$ of the feature x_3

state L_i	x_{11}	x_{12}	x_{13}
L_1	0,1	0,8	0,1
L_2	0,5	0,1	0,4

Further, in accordance with our approach we determine the values of the informativeness of each feature. As a result of calculations we obtain the values E_k that are presented in the Table 5.

Table 5 – The obtained values of the feature relative informativeness

E_1	E_2	E_3
0,40	0,10	0,15

On the basis of the obtained values of the feature relative informativeness we determine the relative informativeness of the feature set. Since the ignoring of the statistical relationships between the features overestimates the relative informativeness of the feature set, it leads to an incorrect definition of its informativeness of the feature set. Therefore, we will determine the relative informativeness of the feature set, taking into account the statistical relationships between the features. To do this

we will determine the value of the statistical coupling coefficients for each pair of signs $\gamma_{k\beta}$.

Further, we determine the relative informativeness of the feature set, taking into account the statistical relationships between the features $E(L) = 0.62$. Excluding $E(L) = 0.65$.

From the obtained results it is clear that the inclusion of statistical links between features by 5% reduces the informativeness of the feature set, which leads to a more accurate determination of the possible efficiency indicator.

6 DISCUSSION

As can be seen from the data shown in the Figure 1, there is an ambiguous relationship between the probability of classification error p_e and the entropy of the decision $H(L/x)$. Thus, ensuring the required value of the entropy solution is a necessary, but not sufficient condition for the decision on the state of the environment with the required probability. In order to ensure a condition $p_e(L) \geq p_e^r(L)$, it is sufficient that the condition (3).

From the analysis of the data shown in the Figure 2 and 3, it is evident that, with a constant value of the required probability of classification error $p_e^r = \text{const}$, the value I_r^* determined by the expression (17) is less than that determined by the expression (5). Therefore, in order to determine the sufficient condition for the feature set informativeness when recognizing the environment state, it is expedient to use value I_r^* , which is determined by expression (5). Since this will provide the required probability of error to recognize the environment state. It provides control of the multi robot teams which minimize the ratio of incorrectly recognized measurements to the total number of measurements.

Thus the proposed criterion for feature set informativeness estimation in the task of multi robot teams control allows to efficiently solve the problem of feature set informativeness estimation, leading to effective solution of the multi robots control task. At that in comparison with traditional feature set informativeness estimation approaches based on the maximizing mutual information criterion this process is applicable when measurements are interdependent, environment has a variable number of states and allow estimate the ratio of incorrectly recognized measurements to the total number of measurements.

CONCLUSIONS

In this paper the actual task of automation of feature set informativeness estimation process in the task of multi robot teams control was solved.

The scientific novelty of obtained results is that the method of feature set informativeness estimation is improved. The improved method enables to estimate feature set informativeness in classification problems in situations

when input data samples contain interdependent features and environment has a variable number of states. The proposed criterion is based on the idea that feature set significance is computed according to the mutual information of the multi robot teams next observation. The article defines a sufficient condition for ensuring the require probability of making a false decision on the environment state and proves it. The fulfillment of this condition guarantees a decision on the environment state with the required probability.

Application of the proposed criterion of features set informativeness estimation allows us to make a decision how much a new observation will increase the certainty of the robots' beliefs about the environment state. Practical significance of the paper consists in the solution of practical problems of multi robot teams control. Experimental results showed that the proposed criterion allowed to estimate feature set informativeness and it could be used in practice for solving of practical tasks of multi robot teams control.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed as part of the scientific research work № 4K13 "The information theoretic approach to multi robot teams control" at the department of unmanned aircraft systems applications of Zhytomyr Military Institute named after S.P.Koroliov by support of the department staff.

REFERENCES

1. Charrow B. Information-theoretic active perception for multi-robot teams, PhD thesis. Phi-ladelphi, University of Pennsylvania, 2015, 175 p.
2. Oliynyk A. A. Subbotin S. A., Lovkin V. M. et al. 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.
3. McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition. New Jersey, John Wiley & Sons, 2004, 526 p. DOI: 10.1002/0471725293.
4. Hyvonen A., Karhunen J., Oja E. Independent component analysis. New York, John Wiley & Sons, 2001, 481 p. DOI: 10.1002/0471221317.
5. Grocholsky B. Information-theoretic control of multiple sensor platforms, PhD thesis. Sydney, University of Sydney, 2002, 199 p.
6. Grocholsky B., Makarenko A., Durrant-Whyte H. Information theoretic control of multiple sensor platforms, *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, Vol. 1, pp. 1521–1526.
7. Bourgault F., Makarenko A., Williams S. B. Information based adaptive robotic exploration, *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2002, pp. 540–545.
8. Choi H. L., How J. P. Continuous trajectory planning of mobile sensors for informative forecasting. *Automatica*, 2011, 145 p.
9. Ny J. L., Pappas G. J. On trajectory optimization for active sensing in gaussian process models, *Proceedings of the Joint IEEE Conference on Decision and Control and Chinese Control Conference*, 2009, pp. 6282–6292.

10. Singh A., Krause A., Guestrin C. Efficient planning of informative paths for multiple robots, *Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2007, pp. 93–105.
11. Hoffmann G. M., Tomlin C. J. Mobile sensor network control using mutual information methods and particle filters, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2010, Vol. 55(1), pp. 32–47.
12. Julian B. J., Angermann M., Schwager M. et al. A scalable information theoretic approach to distributed robot coordination, *IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011, pp. 46–53.
13. Philip D. Schwager M., Kumar V. et al. A Decentralized Control Policy for Adaptive Information Gathering in Hazardous Environments, *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control*, 2012, pp. 74–86.
14. Zhao F., Shin J., Reich J. Information-driven dynamic sensor collaboration, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2002, pp. 61–72.
15. Leonard N. E., Paley D. A., Lekien F. et al. Collective motion, sensor networks, and ocean sampling, *Processing IEEE*, 2007, Vol. 95, No. 1, pp. 48–74.
16. Feng X., Loparo K. A., Fang Y. Optimal state estimation for stochastic systems: An information theoretic approach, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, Vol. 42, No. 6, pp. 771–785.
17. Kreucher C., Kastella K., Hero A. O. Information based sensor management for multitarget tracking, *Processing SPIE, Bellingham, WA*, 2003, Vol. 5204, pp. 480–489.
18. Tisdale J., Ryan A., Kim Z. et al. A multiple uav system for vision-based search and localization, *Processing AAC American Control Conference, Seattle, WA*, 2008, pp. 1985–1990.
19. Ryan A. Information-theoretic tracking control based on particle filter estimate, *Processing AIAA Guidance, Navigation, Control Conference, Honolulu, HI, Aug.*, 2008, pp. 346–358.
20. Williams J. L. Information Theoretic Sensor Management, PhD dissertation. MITEE, Cambridge, MA, 2007, 181 p.
21. Hoffmann G. M., Waslander S. L. and Tomlin C. J. Mutual information methods with particle filters for mobile sensor network control, *Proceedings 45th IEEE Conference Decision Control, San Diego, CA*, 2006, P. 1019–1024.
22. Krause A., Guestrin C. Near-optimal nonmyopic value of information in graphical models, *In Uncertainty in AI*, 2005, pp. 324–331.
23. Singh A., Krause A., Guestrin C. et al. Efficient informative sensing using multiple robots, *Journal of AI Research*, 2009, No. 34(1), pp. 707–755.
24. Binney J., Krause A., Sukhatme G. S. Optimizing waypoints for monitoring spatiotemporal phenomena, *International Journal Robotics Research*, 2013, No. 32(8), pp. 873–888.
25. Hollinger G., Sukhatme G. Sampling-based motion planning for robotic information gathering, *In Proceedings of Robotics: Science and Systems, Berlin, Germany*, 2013, pp. 207–219.
26. Hollinger G. Englot B., Hover F. S. et al. Active planning for underwater inspection and the benefit of adaptivity, *International Journal Robotics Research*, 2003, No. 32(1), pp. 3–18.
27. Kretzschmar H., Stachniss C. Information-theoretic compression of pose graphs for laser-based slam, *International Journal Robotics Research*, 2012, № 31(11), pp. 1219–1230.
28. Dame A., Marchand E. Mutual Information-based Visual Servoing, *IEEE Transactions on Robotics*, 2011, No. 27(5), pp. 958–969.
29. Maddern W., Harrison A., Newman P. Lost in translation (and rotation): Rapid extrinsic calibration for 2d and 3d lidars, *Processing of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2012, pp. 3096–3102.
30. Whaite P., Ferrie F. P. Autonomous Exploration: Driven by Uncertainty, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1997, No. 19(3), pp. 193–205.
31. Kretzschmar H., Stachniss C. Information-theoretic compression of pose graphs for laser-based slam, *International Journal Robotics Research*, 2012, No. 31(11), pp. 1219–1230.
32. Fainzillberg L. S. Mathematical methods for evaluating the usefulness of diagnostic features: monograph. Kiev, “Osvita Ukrainu”, 2010, P. 152.
33. Anisimov B. V., Kurganov V. D., Zlobin V. K. Recognition and digital image processing: study way for college student. Moscow, Vushchaya shkola, 1983, 295 p.

Received 25.09.2018.
Accepted 16.10.2018.

УДК 004.93

КРИТЕРІЙ ОЦІНЮВАННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ОЗНАК ПРИ УПРАВЛІННІ ГРУПОЮ РОБОТІВ

Гуменюк М. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри застосування безпілотних авіаційних комплексів, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир, Україна.

Сашчук І. М. – канд. техн. наук, старший науковий співробітник, заступник начальника інституту з навчальної та наукової роботи, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир, Україна.

Журавський Ю. В. – д-р техн. наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник наукового центру, Житомирський військовий інститут імені С. П. Корольова, Житомир, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено задачу автоматизації процесу оцінювання інформативності ознак при управлінні групою роботів. Об’єкт дослідження – управління групою роботів. Предмет дослідження – критерій оцінювання інформативності ознак. Мета роботи полягає в розробці критерію оцінювання інформативності ознак при управлінні групою роботів.

Метод. Запропоновано критерій оцінювання інформативності ознак на основі значень априорних ймовірностей середовища. Використання запропонованого критерію дозволяє ефективно вирішувати завдання щодо оцінювання інформативності ознак. Це надає змогу приймати ефективні рішення при управлінні групою роботів. Розроблений критерій базується на критерії максимальної кількості інформації та може бути застосований в ситуаціях, коли отримані вимірювання не є незалежними, а навколошнє середовище має зміну кількість станів. Запропонований критерій не вимагає побудови моделей на основі оцінюваних комбінацій ознак, що істотно знижує часові та обчислювальні витрати при управлінні групою

роботів. Використання запропонованого критерію для оцінювання інформативності набору ознак дозволяє приймати рішення наскільки нове спостереження збільшить обізнаність роботів щодо стану досліджуваного навколошнього середовища.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропонований критерій оцінювання інформативності ознак та дозволяє управляти групою роботів.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованого критерію оцінювання інформативності ознак і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при управлінні групою роботів. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в модифікації існуючих і розробці нових методів управління групою роботів на основі запропонованого критерію оцінювання інформативності ознак.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: управління групою роботів, взаємна інформація, критерій інформативності, інформативність групи ознак.

УДК 004.93

КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ ИНФОРМАТИВНОСТИ ПРИЗНАКОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ГРУППОЙ РОБОТОВ

Гумениук М. А. – канд. техн. наук, доцент кафедры использования беспилотных авиационных комплексов, Житомирский военный институт имени С. П. Корольова, Житомир, Украина.

Сашук И. М. – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель начальника института с учебной и научной работы, Житомирский военный институт имени С. П. Корольова, Житомир, Украина.

Журавський Ю. В. – д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научного центра, Житомирский военный институт имени С. П. Корольова, Житомир, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решена задача автоматизации процесса оценки информативности признаков управлении группой роботов. Объект исследования – управление группой роботов. Предмет исследования – критерий оценки информативности признаков. Цель работы заключается в разработке критерия оценки информативности признаков для группы роботов.

Метод. Предложен критерий оценки информативности признаков. Разработанный критерий предполагает определение информативности набора признаков на основе значений априорных вероятностей нахождения признаков в описаниях состояний окружающей среды. Использование предложенного критерия позволяет эффективно решать задачи по оценке информативности признаков. Это дает возможность принимать эффективные решения при управлении группой роботов. Разработанный критерий базируется на критерии максимального количества информации и может быть применен в ситуациях, когда получение измерения не являются независимыми, а окружающая среда имеет переменное количество состояний. Предложенный критерий не требует построения моделей на основе оцениваемых комбинаций признаков, существенно снижает временные и вычислительные затраты при управлении группой роботов. Использование предложенного критерия для оценки информативности набора признаков позволяет принимать решения насколько новое наблюдение увеличит осведомленность роботов по состоянию исследуемой окружающей среды.

Результаты. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный критерий оценки информативности признаков и позволяет управлять группой роботов.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного критерия оценки информативности признаков и позволяют рекомендовать его для использования на практике при управлении группой роботов. Перспективы дальнейших исследований могут заключаться в модификации существующих и разработке новых методов управления группой роботов на основе предложенного критерия оценки информативности признаков.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: управление группой роботов, взаимная информация, критерий информативности, информативность группы признаков.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Charrow B. Information-theoretic active perception for multi-robot teams, PhD thesis / Benjamin Charrow. – Philadelphia: University of Pennsylvania, 2015. – 175 p.
2. The system of criteria for feature informativeness estimation in pattern recognition / [A. A. Oliynyk, S. A. Subbotin, V. M. Lovkin et al.] // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 4. – С. 85–96. DOI 10.15588/1607-3274-2017-4-10.
3. McLachlan G. Discriminant Analysis and Statistical Pattern Recognition / G. McLachlan. – New Jersey : John Wiley & Sons. – 2004. – 526 p. DOI: 10.1002/0471725293.
4. Hyvärinen A. Independent component analysis / A. Hyvärinen, J. Karhunen, E. Oja. – New York : John Wiley & Sons, 2001. – 481 p. DOI: 10.1002/0471221317.
5. Grocholsky B. Information-theoretic control of multiple sensor platforms, PhD thesis / Grocholsky Ben. – Sydney: University of Sydney, 2002. – 199 p.
6. Grocholsky B. Information theoretic control of multiple sensor platforms. / B. Grocholsky, A. Makarenko, H. Dur-
- rant-Whyte // Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2003. – Vol. 1. – P. 1521–1526.
7. Bourgault F. Information based adaptive robotic exploration. / F. Bourgault, A. Makarenko, S. B. Williams // In Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. – 2002. – P. 540–545.
8. Choi H. L. Continuous trajectory planning of mobile sensors for informative forecasting / H. L. Choi, J. P. How // Automatica. – 2011. – 145 p.
9. Ny J. L. On trajectory optimization for active sensing in gaussian process models / J. L. Ny, G. J. Pappas // In Proceedings of the Joint IEEE Conference on Decision and Control and Chinese Control Conference. – 2009. – P. 6282–6292.
10. Singh A. Efficient planning of informative paths for multiple robots / A. Singh, A. Krause, C. Guestrin // Proceedings of the International Joint Conference on Artificial Intelligence. – 2007. – P. 93–105.

11. Hoffmann G. M. Mobile sensor network control using mutual information methods and particle filters / G. M. Hoffmann, C. J. Tomlin // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2010. – Vol. 55(1). – P. 32–47.
12. A scalable information theoretic approach to distributed robot coordination / [B. J. Julian, M. Angermann, M. Schwager et al.] // IEEE/RSJ Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). – 2011. – P. 46–53.
13. Philip D. A Decentralized Control Policy for Adaptive Information Gathering in Hazardous Environments / [D. Philip, M. Schwager, V. Kumar et al.] // 2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control. – 2012. – P. 74–86.
14. Zhao F. Information-driven dynamic sensor collaboration / F. Zhao, J. Shin, J. Reich // IEEE Signal Processing Magazine. – 2002. – P. 61–72.
15. Collective motion, sensor networks, and ocean sampling / [N. E. Leonard, D. A. Paley, F. Lekien et al.] // Processing IEEE. – 2007. – Vol. 95, № 1. – P. 48–74.
16. Feng X. Optimal state estimation for stochastic systems: An information theoretic approach / X. Feng, K. A. Loparo, Y. Fang // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1997. – Vol. 42, № 6. – P. 771–785.
17. Kreucher C. Information based sensor management for multitarget tracking / C. Kreucher, K. Kastella, A. O. Hero // Processing SPIE, Bellingham, WA. – 2003. – Vol. 5204. – P. 480–489.
18. A multiple uav system for vision-based search and localization / [J. Tisdale, A. Ryan, Z. Kim et al.] // Processing AACC American Control Conference, Seattle, WA. – 2008. – P. 1985–1990.
19. Ryan A. Information-theoretic tracking control based on particle filter estimate / A. Ryan // Processing AIAA Guidance, Navigation, Control Conference, Honolulu, HI, Aug. – 2008. – P. 346–358.
20. Williams J. L. Information Theoretic Sensor Management, Ph.D. dissertation / J. L. Williams. – MITEE, Cambridge, MA, 2007. – 181 p.
21. Hoffmann G. M. Mutual information methods with particle filters for mobile sensor network control / G. M. Hoffmann, S. L. Waslander, and C. J. Tomlin // Proceedings 45th IEEE Conference Decision Control, San Diego, CA. – 2006. – P. 1019–1024.
22. Krause A. Near-optimal nonmyopic value of information in graphical models / A. Krause, C. Guestrin // In Uncertainty in AI. – 2005. – P. 324–331.
23. Singh A. Efficient informative sensing using multiple robots / [A. Singh, A. Krause, C. Guestrin et al.] // Journal of AI Research. – 2009. – № 34(1). – P. 707–755.
24. Binney J. Optimizing waypoints for monitoring spatiotemporal phenomena / J. Binney, A. Krause, G. S. Sukhatme // International Journal Robotics Research. – 2013. – № 32(8). – P. 873–888.
25. Hollinger G. Sampling-based motion planning for robotic information gathering / G. Hollinger, G. Sukhatme // In Proceedings of Robotics: Science and Systems. – Berlin, Germany. – 2013. – P. 207–219.
26. Active planning for underwater inspection and the benefit of adaptivity / [G. Hollinger, B. Englot, F. S. Hover et al.] // International Journal Robotics Research. – 2003. – № 32 (1). – P. 3–18.
27. Kretzschmar H. Information-theoretic compression of pose graphs for laser-based slam / H. Kretzschmar, C. Stachniss // International Journal Robotics Research. – 2012. – № 31(11). – P. 1219–1230.
28. Dame A. Mutual Information-based Visual Servoing / A. Dame, E. Marchand // IEEE Transactions on Robotics. – 2011. – № 27(5). – P. 958–969.
29. Maddern W. Lost in translation (and rotation): Rapid extrinsic calibration for 2d and 3d lidars / W. Maddern, A. Harrison, P. Newman // Processing of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2012 – P. 3096–3102.
30. Whaite P. Autonomous Exploration: Driven by Uncertainty / P. Whaite, F. P. Ferrie // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – № 19(3). – P. 193–205.
31. Kretzschmar H. Information-theoretic compression of pose graphs for laser-based slam / H. Kretzschmar, C. Stachniss // International Journal Robotics Research. – 2012. – № 31(11). – P. 1219–1230.
32. Файнзильберг Л. С. Математические методы оценки полезности диагностических признаков : монография / Л. С. Файнзильберг. – К. : «Освіта України», 2010. – 152 с.
33. Анисимов Б. В. Распознавание и цифровая обработка изображений : учеб. пособ. для студентов вузов / Б. В. Анисимов, В. Д. Курганов, В. К. Злобин. – М. : Высшая школа, 1983. – 295 с.

A MODIFIED CASE-BASED REASONING METHOD BASED ON THE ROUGH SET THEORY

Kovalenko I. I. – Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.

Shved A. V. – PhD, Associate Professor of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.

Koval N. V. – Post-graduate student of the Department of Software Engineering, Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolayiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Knowledge bases are the main element of artificial intelligence systems. They are formed on the basis of two generally accepted approaches: the object-oriented approach and object-structural approach. Knowledge structuring through its ordering, classification and typing of selected classes is the main operation that is implemented in both approaches. Quite often there are situations when data or knowledge is not exact and it is impossible to perform their exact classification. These features necessitate the development of new approaches aimed at solving problems of extracting knowledge from large arrays of unordered data, structuring, presenting and analytical processing of inexact knowledge in automated construction of knowledge bases.

Objective. The objective of this paper is a research of new approaches for solving problems of representation of knowledge about cases in intellectual decision support systems.

Method. An approach aimed at modifying Case-Based Reasoning method on the basis of Rough Set Approach has been proposed in this paper. The proposed method forms a partition of cases to determine the degree of their belonging to the goal classes using upper and lower approximations of goal classes, considering the relative importance of classification attributes and formed equivalence classes.

Results. The proposed modification of Case-Based Reasoning method allows extracting knowledge about cases from arrays of unordered data with the purpose of the case base construction, and handling the inconsistent (in cases where for the same values of attributes cases belong to different classes), and incomplete (in cases where the values of some attributes or information of the case belonging to the given class is missing or unreliable) information about cases.

Conclusions. The proposed method of representation knowledge about cases, their adaptation and subsequent search in the case base formed under uncertainty and existence of inexact, rough, inconsistent initial data constitutes a theoretical basis for constructing intellectual decision support systems.

KEYWORDS: Rough Set Theory, Case-Based Reasoning, case (precedent), knowledge base, case base, classification.

ABBREVIATIONS

CB is a case base;
CBR is a case-based reasoning;
DM is a decision-maker;
RST is a rough set theory;

x_i is a parameter (characteristic) of the case;

X_i is a category in universe U ;

$[x]_R$ is represented an equivalence class in R containing an element $x \in U$;

U is a finite set of considered objects (universe).

NOMENCLATURE

α_R is a degree of completeness of existing knowledge;
 ρ_R is a degree of incompleteness of existing knowledge;

A is a set of case attributes;
 a_i is a value of case attributes;
 $BN_R(X)$ is a R -boundary region of X ;
 $card(Y)$ is a cardinality of Y ;
 CX_i is a region of acceptability of the corresponding case parameters x_i ;

D are recommendations to the decision-maker;
 E_j is a class of equivalence relations over U ;
 $IND(R)$ is a family of all equivalence classes of R ;
 K is a relational system (knowledge base);
 n is a number of case parameters;
 $NEG_R(X)$ is a R -negative region of X ;
 $POS_R(X)$ is a R -positive region of X ;
 R is a family of equivalence relations over U ;
 RX is a R -lower approximation of rough set X ;
 \bar{RX} is a \bar{R} -upper approximation of rough set X ;

INTRODUCTION

CBR method based on use of previous experience in decision-making became widespread recently for various problems solving. A case (precedent) is a structured representation of accumulated experience in the form of data and knowledge, ensuring its subsequent automated processing with the help of specialized software systems [1, 2].

In general, the case model is represented as follows:

$$Case(x_1, x_2, \dots, x_n, D). \quad (1)$$

In the process of CBR implementation the following basic tasks should be solved: choice of the form of knowledge representation about the case, identification and extraction of the case from the generated knowledge base (case base) and adaptation of computed solutions [3].

To solve the first problem, traditional methods of knowledge extraction and presentation are widely used,

such as commutative and textual methods, product models, semantic networks, frames, formal logic models, etc. The search and extraction of cases is performed using fuzzy sets and fuzzy relationships, decision trees, neural networks, and others.

Along with that to solve this problem method of search for the nearest neighbor and its modification became widespread. As for the task of adapting decisions based on cases, very few works have been devoted to its analysis.

The object of study is the process of structuring of case knowledge derived from large arrays of raw, rough data, by ordering and classifying them in the knowledge base using equivalence relations.

The subject of study are the models and methods of modeling reasoning on the basis of precedents, and their modifications based on the mathematical apparatus of the rough set theory.

The purpose of the work is to consider possibilities of RST for solving problems of representation knowledge about cases, their search and adaptation for subsequent decision-making.

1. PROBLEM STATEMENT

Let the initial set of knowledge about cases X be represented by two classes of cases: $Case_{S1} = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ and $Case_{S2} = \{x_5, x_6, x_7\}$, where x_i is some parameter (characteristic) of the case $x_i \in CX_i$, and CX_i is a region of acceptability of the corresponding case parameters. And let $X_0 = \{x_3, x_4, x_7, x_8\}$ be some set of knowledge, which must be attributed to one of the indicated classes $Case_{S1}$ and $Case_{S2}$. However, it can be seen that elements of this set $\{x_3, x_4\} \in Case_{S1}$ and, $\{x_7\} \in Case_{S2}$, but the element $\{x_8\} \notin (Case_{S1}, Case_{S2})$. This characterizes the situation when it is not possible to perform an exact classification.

Suppose given a set of cases $SC = \{Case_{Sj}\}$, $j = 1, 2, \dots, k$, where $Case_{Sj} = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$, and some set of knowledge $X_0 = \{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, p$ ($p \geq n$).

The problem of classification can be presented as the problem of choosing the correct class $Case_{Sj}$ for an each given input element $x_i \in X_0$ from the original set of knowledge X_0 .

2 REVIEW OF THE LITERATURE

There are a lot of works devoted to models and methods of analyzing cases [1–7, etc.]. For example, in [1, 2] issues of CBR modeling in intelligent decision support systems are considered. The paper [3] is devoted to the description of case extraction approaches using fuzzy sets and fuzzy relations. In [4, 5] issues of practical application of the nearest neighbor search method and its modifications are considered as well as problems connected with its use in the task of cases extracting are noted. The analysis of listed publications allows for the conclusion that existing methods of representation and structuring of knowledge about cases use strict models determined by the relevance (certainty) of considered elements.

At the same time in real situations it is quite often necessary to solve problems of extracting knowledge from arrays of unordered (raw, rough) data. The knowledge thus obtained is not accurate and it is impossible to perform its exact classification (establish a classification category). This is mainly due to the fact that the “rigidity” of existing models of knowledge representation forces developers to combine or cut down the real knowledge of experts [3].

To analyze such situations the author of [8] has proposed RST, which allows processing implicit arrays of disordered data and, on this basis, to extract new knowledge.

3. MATERIALS AND METHODS

Let's first consider RST basic concepts, which are necessary for presentation knowledge about cases, forming the CB and subsequent searching of cases (for complete information on RST, see [8, 9, 10]).

The rough set approach is considered as a concept and theoretical basis of reasoning about knowledge, when it is not exact (inexact or rough knowledge). This theory is based on the fact that knowledge is deeply embedded in the ability of people to classify subjects, phenomena, objects, situations, etc. In other words, knowledge is based on the ability to classify the objects. Therefore, knowledge in RST is necessarily associated with a multitude of patterns of classification, called the universe of discourse. In fact, knowledge consists of a family of different samples of element classification that make up the domain of interest to us.

Let $U \neq \emptyset$ be a finite set of considered objects (universe). Each subset $X_i \subseteq U$ of the universe is called a category in U and any family of subsets of the universe U is considered as abstract knowledge about U (the empty set \emptyset is also a category). RST is based on concepts which form a partition (classification) of the certain universe U , i.e. on gaining of the family $C = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, such that $X_i \subseteq U$, $X_i \neq \emptyset$, $X_i \cap X_j = \emptyset$ for $i \neq j$, $(i, j = 1, \dots, n)$ and $\bigcup X_i = U$.

Such family is called a knowledge base on U , which represents a set of basic aspects of classification (color, temperature, etc.) [10].

It is proposed in RST to perform the classification procedures using equivalence relations, which are simpler when dealing with them than with known decisive rules [8, 9].

If R denotes the equivalence relation then the relation $IND(R)$ denotes the family of all equivalence classes of R or classifications of U , and $[x]_R$ is represented an equivalence class in R containing an element $x \in U$.

Formally, a knowledge base, is seen as a relational system $K = (U, R)$, where $U \neq \emptyset$ is a finite set of objects (universe), R is a family of equivalence relations over U .

If to consider the goal set of elements $X \in U$, than the following situations can be considered with respect to $IND(R)$ classification [8, 9]:

- 1) The set X is the union of certain categories of $IND(R)$. In this case the set X is called R -exact.

2) The set X cannot be expressed as the union of certain categories of $IND(R)$. In this case the set X is called R -inexact or R -rough.

3) \underline{R} -lower approximation of rough set X is a subset of all elements of U , which can be certainly classified as belonging to the goal set X :

$$\underline{RX} = \{x \in U : [x]_R \subseteq X\}, \text{ or } x \in \underline{RX}, \quad (2)$$

if and only if $[x]_R \subseteq X$.

\underline{R} -lower approximation of X is also defined as R -positive region of X :

$$POS_R(X) = \underline{RX}. \quad (3)$$

4) \overline{R} -upper approximation of rough set X is called the subset of all elements of U , which can be possibly classified as belonging to the goal set X :

$$\overline{RX} = \{x \in U : [x]_R \cap X \neq \emptyset\}, \text{ or } x \in \overline{RX}, \quad (4)$$

if and only if $[x]_R \cap X \neq \emptyset$.

5) Negative region of X is a subset of all elements of universe U , which certainly do not belong to the set X :

$$NEG_R(X) = U - \overline{RX}. \quad (5)$$

6) The boundary region of X is a subset of all elements of U , which belong to \overline{R} -upper approximation and do not belong to \underline{R} -lower approximation of X :

$$BN_R(X) = \overline{RX} - \underline{RX}. \quad (6)$$

Let, for example [8], there be a knowledge base $K=(U, R)$, where $U=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$, is the universe of elements x_i ; R is the equivalence relation upon which the following equivalence classes (categories) were selected on U : $U/IND(R)=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_7, x_{10}\}, \{x_4\}, \{x_5\}, \{x_6\}, \{x_8\}, \{x_9\}\}$.

Let goal sets $X_1=\{x_1, x_2, x_4, x_5\}$ and $X_2=\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ be given. Let us compute the characteristics considered above for sets X_1 and X_2 .

Thus, we have:

$$\underline{RX}_1 = \{x_1, x_2\} \cup \{x_4\} \cup \{x_5\} = \{x_1, x_2, x_4, x_5\};$$

$$\overline{RX}_1 = \{x_1, x_2, x_4, x_5\};$$

$$NEG_R(X_1) = \{x_3, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\};$$

$$BN_R(X_1) = \emptyset;$$

$$\underline{RX}_2 = \{x_1, x_2\} \cup \{x_4\} = \{x_1, x_2, x_4\};$$

$$\overline{RX}_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_7, x_{10}\};$$

$$NEG_R(X_2) = \{x_5, x_6, x_8, x_9\};$$

$$BN_R(X_2) = \{x_3, x_7, x_{10}\}.$$

RST assumes that rough sets simulate the uncertainty regarding the belonging of some elements of the universe to a given goal set. Therefore, for evaluating the degree of such uncertainty, an assessment of approximation accuracy has been introduced [8, 9, 10]:

$$\alpha_R(X) = \frac{\text{card } \underline{RX}}{\text{card } \overline{RX}}, \quad X \neq \emptyset, \quad \alpha_R(X) \in [0,1]. \quad (7)$$

This assessment defines the degree of knowledge completeness.

If $BN_R=\emptyset$, i.e. $\overline{RX}=\underline{RX}$, then $\alpha_R(X)=1$ and the set X is considered as R -definable. If $BN_R \neq \emptyset$, then $\text{card } \overline{RX} > \text{card } \underline{RX}$ and $\alpha_R(X) < 1$. Such values of $\alpha_R(X)$ characterize R -undefinable or rough sets.

As an alternative measure, in RST a roughness measure of the goal set X has been introduced:

$$\rho_R(X) = 1 - \alpha_R(X). \quad (8)$$

The roughness assessment, in contrast to the accuracy assessment, characterizes the degree of incompleteness of existing knowledge.

4 EXPERIMENTS

Let's consider an example of using RST for implementation of CBR method in terms of presenting knowledge about cases, the CB creation, and also adapting and searching cases in the CB. To solve the first problem, RST uses a data table whose rows correspond to elements (cases), and columns correspond to features (attributes) of these cases.

A cell located at the intersection of i -th row and j -th column contains the value of the j -th characteristic (attribute, feature) for the i -th element. This makes it possible to obtain a simple form of the initial data representation (Table. 1).

Table 1 – The universe of cases and the values of their attributes

The universe of cases	Values of case attributes				
	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
x_1	1	2	0	1	2
x_2	1	2	0	1	2
x_3	2	0	0	0	1
x_4	0	0	1	1	1
x_5	2	1	0	2	1
x_6	0	0	1	1	1
x_7	2	0	0	0	1
x_8	0	1	2	1	0
x_9	2	1	0	2	1
x_{10}	2	0	0	0	1

We denote a universe as $U=\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}\}$ and a set of attributes as $A=\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$.

Using the equivalence relation, let us divide the set U into subsets of attributes like $\{a_1\}$, $\{a_1, a_2\}$, $\{a_1, a_2, a_3\}$, $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$, $\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}$.

So we have:

$$U/IND(R_1)\{a_1\}=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_5, x_7, x_9, x_{10}\}, \{x_4, x_6, x_8\}\};$$

$$U/IND(R_2)\{a_1, a_2\}=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_7, x_{10}\}, \{x_4, x_6\}, \{x_5, x_9\}, \{x_8\}\};$$

$$U/IND(R_3)\{a_1, a_2, a_3\}=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_7, x_{10}\}, \{x_4, x_6\}, \{x_5, x_9\}, \{x_8\}\};$$

$$U/IND(R_4)\{a_1, a_2, a_3, a_4\}=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_7, x_{10}\}, \{x_4, x_6\}, \{x_5, x_9\}, \{x_8\}\};$$

$$U/IND(R_5)\{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5\}=\{\{x_1, x_2\}, \{x_3, x_7, x_{10}\}, \{x_4, x_6\}, \{x_5, x_9\}, \{x_8\}\}.$$

This allows us to write an expression for the CB for this example:

$$CB = (U, E_1, E_2, E_3, E_4, E_5),$$

where: $E_1=\{x_1, x_2\}$, $E_2=\{x_3, x_7, x_{10}\}$, $E_3=\{x_4, x_6\}$, $E_4=\{x_5, x_9\}$, $E_5=\{x_8\}$ are the family of equivalence relations over U (elements in each class are considered indistinguishable).

Let $X_1=\{x_4, x_6, x_8\}$, $X_1 \subseteq U$ and $X_2=\{x_1, x_2, x_3, x_5, x_9\}$, $X_2 \subseteq U$, be goal subsets which need to be checked against selected classes of cases.

The first set X_1 can be uniquely represented as the union of classes E_3 and E_5 , i.e. $X_1=E_3 \cup E_5=\{x_4, x_6\} \cup \{x_8\}=\{x_4, x_6, x_8\}$. Therefore, X_1 is R-exact set.

The set X_2 includes classes E_1 , E_4 and one element from the class E_2 . Therefore, X_2 is R-rough set.

Using expressions (2)–(6) let's represent the following approximations of goal sets X_1 and X_2 in the following form:

$$\underline{R}X_1 = \overline{R}X_1 = POS_R(X_1) = \{x_4, x_6, x_8\};$$

$$POS_R(X_1) = \underline{R}X_1 = \{x_4, x_6, x_8\};$$

$$NEG_R(X_1) = U - \overline{R}(X_1) = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_7, x_9, x_{10}\};$$

$$BN_R(X_1) = \overline{R}X_1 - \underline{R}X_1 = \emptyset;$$

$$\overline{R}X_2 = \{x_1, x_2, x_3, x_5, x_7, x_9, x_{10}\};$$

$$POS_R(X_2) = \underline{R}X_2 = \{x_1, x_2, x_5, x_9\};$$

$$NEG_R(X_2) = U - \overline{R}(X_2) = \{x_4, x_6, x_8\};$$

$$BN_R(X_2) = \overline{R}X_2 - \underline{R}X_2 = \{x_3, x_7, x_{10}\}.$$

Based on the above calculations, we can confidently state that the elements $\{x_4, x_6, x_8\}$ completely belong to the goal subset X_1 and the elements $\{x_1, x_2, x_5, x_9\}$ completely belong to the goal subset X_2 .

R -boundary region of a goal subset X_2 contains three elements $BN_R(X_2)=\{x_3, x_7, x_{10}\}$. These elements can potentially belong to the goal subset X_2 .

Despite the fact that the element x_3 is specified as belonging to the goal subset X_2 ($X_2=\{x_1, x_2, x_3, x_5, x_9\}$), element x_3 cannot be uniquely classified as element from the class X_2 , because it belongs to the boundary region of X_2 . We can only talk about its potential membership to the goal subset X_2 .

The elements x_7 and x_{10} were not assigned to any goal subset, however they, like the element x_3 , belong to the same equivalence class E_2 .

Recall that elements, which belong to the same equivalence category are considered indistinguishable, that is why the elements x_7 and x_{10} , like the element x_3 , were included in the R -upper approximation of the goal subset X_2 .

Let $X_7=\{x_7, x_{10}\}$, $X_7 \subseteq U$. Using expressions (2)–(6) let's represent the following approximations of goal set X_7 in the following form:

$$POS_R(X_7) = \underline{R}X_7 = \emptyset;$$

$$\overline{R}X_7 = E_2 = \{x_3, x_7, x_{10}\};$$

$$NEG_R(X_7) = U - \overline{R}(X_7) = \{x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_8, x_9\};$$

$$BN_R(X_7) = \overline{R}X_7 - \underline{R}X_7 = \{x_3, x_7, x_{10}\}.$$

As can be seen, from the above calculations, it is fundamentally impossible to conclude that elements x_7 and x_{10} belong to one of the classes using the information on classification attributes, because $\underline{R}X_7 = \emptyset$.

The considered elements require an increase in a priori knowledge regarding their belonging to given set of classes.

Using expressions (7) and (8) let us calculate assessments for considered goal sets $X_1=\{x_4, x_6, x_8\}$ and $X_2=\{x_1, x_2, x_3, x_5, x_9\}$: $a_R(X_1)=3 / 3 = 1$; $p_R(X_1) = 0$; $a_R(X_2)=4 / 7$; $p_R(X_2)=1 - 4 / 7 = 3 / 7$.

It should be noted that elements with unknown membership to classes and belonging to the R -boundary region of classifications performed on the basis of all other elements, do not affect the classification of the original universe.

5 RESULTS

As can be seen from the above expressions the goal set X_1 completely belongs to the union of classes E_3 and E_5 ($a_R=1$). The set X_2 cannot be uniquely classified because $p_R(X_2)=3 / 7$ (elements $\{x_3, x_7, x_{10}\}$).

Taking into account the considered situation, RS theory proposes next strict rules for the classification of goal sets, which can characterize cases:

- if $x_i \in POS_R(X_j)$, then $x_i \in X_j$;
- if $x_i \in NEG_R(X_j)$, then $x_i \notin X_j$;
- if $x_i \in BN_R(X_j)$, then $x_i \in X_j$.

The above records are interpreted as follows [10]:

- if x_i belongs to the R -positive region, then it is identified with complete certainty as belonging to this class;
- if x_i belongs to the R -negative region of a particular class, it is identified with complete certainty as not belonging to this class;
- if x_i belongs to the R -boundary region of a particular class, it is impossible to say anything definite about the belonging or not belonging of the case to a particular class.

It follows that for a confident search of cases in the CB by procedure of their classification only the first decision rule can be used.

6 DISCUSSION

The proposed approach, aimed at modifying CBR method using RST, allows processing of arrays of unordered (rough) data, and on the basis of such processing to extract new knowledge. The rough set approach is based on conclusion that knowledge is reflected in ability to classify objects and is associated with a plurality of classification samples. The main feature of RST is that it uses a kind of “inaccurate” (“inexact”) classification, which in practice can look more real than an exact classification, for which it is often impossible to establish a classification category.

CONCLUSIONS

A modification of CBR method by using RST has been considered in this paper. In order to solve problems underlying this method, it is proposed to apply the following procedures of the RST: representation, structuring and case base construction, which is performed by means of a relational table and forming a family of equivalence relations (classes); for adapting cases and their search in the case base special approximations and corresponding classification rules are used.

The scientific novelty of obtained results consists in the fact that for processing and presentation of case (precedent) knowledge it is offered to use the mathematical apparatus of the Rough Set Theory. The fundamental concept of RST lies in fact that knowledge is reflected in the separation (classification) of relevant elements. Unlike existing approaches, the RST allows to correctly handle data that are rough in the sense of unordered and inaccuracy. The proposed modification of the CBR method allows solving the problems of presentation and structuring of knowledge about cases (precedents), their adaptation and subsequent search in a case base formed in the conditions of uncertainty and the incompleteness of expert information about cases.

The practical significance of obtained results indicate the possibility of forming a set of decision rules (classifier) for classification of new data samples that are not part of the original training universe. That enables to perform the description and presentation of knowledge by highlighting their properties and attributes, and creates the basis for structuring and analytical processing of inaccurate knowledge in the artificial intelligence systems design.

Prospects for further research are to develop methods to improve a classification accuracy of knowledge under incompleteness of expert information.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is supported by the state budget scientific research project of Petro Mohyla Black Sea National University “Development of information and communication decision support technologies for strategic decision-making with multiple criteria and uncertainty for military-civilian use” (state registration number 0117U007144).

REFERENCES

1. Varshavskij P. R., Eremeev A. P. Modelirovanie rassuzhdenij na osnove precedentov v intellektual'nyx sistemax podderzhki prinyatiya reshenij, *Iskusstvennyj intellekt i prinyatie reshenij*, 2009, No. 2, pp. 45–57.
2. Varshavskij P. R., Eremeev A. P. Metody pravdopodobnyx rassuzhdenij na osnove analogij i precedentov dlya intellektual'nyx sistem podderzhki prinyatiya reshenij, *Novosti iskusstvennogo intellekta*, 2006, No. 3, pp. 39–62.
3. Eremenko T. K., Pilipenko Yu. G. Ispol'zovanie CBR-podxoda dlya baz znanij situacionnyx centrov, *Systemy pidtrymky pryniattia rishen. Teoriia i praktika*, 2010, pp. 151–153.
4. Klymchuk S. A. Primenenie precedentov dlya diagnostiki kranov mostovogo tipa, *Systemni doslidzhennia ta informatsiini tekhnolohii*, 2012, No. 4, pp. 17–22.
5. Ulshyn V. O., Klymchuk S. O. Modeli predstavlenija znan ekspertnykh system pidtrymky pryniattia rishen pry diagnostuvanni / V. O. Ulshyn, // Visnyk SNU im. V. Dalia. – Vol. 135, № 5. – S. 21–25.
6. Nefedov L. I., Fil' N. Yu., Gubin Yu. L. Metod poiska precedentov proektorov likvidacii chrezvychajnyx prirodnyx situacij na magistral'nyx avtomobil'nyx dorogax, *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyx texnologij*, 2010, No. 1, pp. 50–52.
7. Haritonov Yu. N. Upravlenie proektami rekonstrukcii na osnove artefaktnyx platform, *Aviacionno-kosmicheskaya texnika i texnologiya*, 2008, No. 8, pp. 189–192.
8. Pawlak Z. Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data. Boston/London, Academic Publishers, 1991, 229 p.
9. Uzhga-Rebrov O. Osobennosti predstavleniya znanij v teorii grubyx mnozhestv, *Environment. Technology. Resources: 7th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, 25–27 June, 2009: proceedings*. Latvia, Izdevnieciba, 2009, Vol. 2, P. 169–176.
10. Uzhga-Rebrov O. I. Upravlenie neopredelenostyami. Sovremennye neveroyatnostnye metody. Latvia, RA Izdevnieciba, 2010, Vol. 3, 560 p.

Received 21.05.2018.
Accepted 14.06.2018.

УДК 681.03.016

МОДИФІКОВАНИЙ МЕТОД МІРКУВАНЬ ЗА ПРЕЦЕДЕНТАМИ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГРУБИХ МНОЖИН

Коваленко І. І. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Черноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Швед А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Черноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

Коваль Н. В. – аспірант кафедри інженерії програмного забезпечення Черноморського національного університету імені Петра Могили, Миколаїв, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Основним елементом систем штучного інтелекту є бази знань, які формуються на основі двох загальноприйнятих підходів: об'єктно-орієнтованого та об'єктно-структурного підходів. При цьому основною операцією, яка реалізується в обох підходах, є структуризація знань за допомогою їх упорядкування та класифікації, типізації виділених класів. Достатньо часто виникають ситуації, коли дані або знання не є точними і неможливо виконати точну класифікацію. Зазначені особливості обумовлюють необхідність розробки нових підходів спрямованих на вирішення завдань вилучення знань з великих масивів невпорядкованих (необроблених, грубих) даних, структурування, подання та аналітичної обробки неточних знань при автоматизованій побудові бази знань.

Метод. В роботі запропоновано підхід, спрямований на модифікацію методу міркувань за прецедентами на основі математичного апарату теорії грубих множин. Запропонований підхід дозволяє виконувати розбиття множини прецедентів для встановлення ступеня їх приналежності до заданих цільових класів на основі операції верхньої та нижньої апроксимацій цільових класів, враховуючи відносну важливість класифікаційних атрибутів та виділені класи еквівалентності, з метою їх подальшої адаптації та пошуку в базі прецедентів.

Результати. Запропонована модифікація методу міркувань за прецедентами дозволяє добувати знання про прецеденти з масивів невпорядкованих даних, з метою формування бази прецедентів, та обробляти суперечливу інформацію про прецеденти, у випадку коли при однакових значеннях атрибутів, прецеденти відносяться до різних класів, та неповну інформацію про прецеденти, якщо значення деяких атрибутів або інформація про приналежність прецедентів до заданого класу відсутня або недостовірна.

Висновки. Запропонований підхід представлення знань про прецеденти, їх адаптацію та подальший пошук в базі прецедентів, сформованих в умовах невизначеності та наявності неточних, необроблених, суперечливих вихідних даних складає теоретичну підставу для побудови інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: теорія грубих множин, метод міркувань за прецедентами, база знань, база прецедентів, класифікація.

УДК 681.03.016

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД РАССУЖДЕНИЙ ПО ПРЕЦЕДЕНТАМ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ГРУБЫХ МНОЖЕСТВ

Коваленко И. И. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры инженерии программного обеспечения Черноморского национального университета имени Петра Могили, Николаев, Украина.

Швед А. В. – канд. техн. наук, доцент кафедры инженерии программного обеспечения Черноморского национального университета имени Петра Могили, Николаев, Украина.

Коваль Н. В. – аспирант кафедры инженерии программного обеспечения Черноморского национального университета имени Петра Могили, Николаев, Украина.

АНОТАЦИЯ

Актуальность. Основным элементом систем искусственного интеллекта являются базы знаний, которые формируются на основе двух общепринятых подходов: объективно-ориентированный подход и объективно-структурный подход. При этом основной операцией, которая реализуется в обоих подходах, является структуризация знаний посредством их упорядочения и классификации, типизации выделенных классов. Достаточно часто возникают ситуации, когда данные или знания не являются точными и невозможно выполнить их точную классификацию. Указанные особенности обуславливают необходимость разработки новых подходов направленных на решение задач извлечения знаний из больших массивов неупорядоченных (необработанных, грубых) данных, структурирования и аналитической обработки неточных знаний при автоматизированном построении баз знаний.

Метод. В работе предложен подход, направленный на модификацию метода рассуждений по прецедентам на основе математического аппарата теории грубых множеств. Предложенный подход позволяет производить разбиение прецедентов для установления степени их принадлежности к заданным целевым классам, используя операции верхних и нижних аппроксимаций, учитывая относительную важность классификационных атрибутов и выделенные классы эквивалентности.

Результаты. Предложенная модификация метода рассуждений по прецедентам позволяет извлекать знания о прецедентах из массивов неупорядоченных данных, с целью формирования базы прецедентов, и обрабатывать противоречивую (при одних и тех же значениях классификационных атрибутов, прецеденты относятся к различным

классам) и неполную (значения некоторых атрибутов или информация о принадлежности прецедента к целевому классу отсутствует) информацию о прецедентах.

Выводы. Предложенный подход представления знаний о прецедентах, их адаптации и последующего поиска в базе прецедентов, сформированных в условиях неопределенности и наличия неточных, необработанных, противоречивых исходных данных составляет теоретическое основание для построения интеллектуальных систем поддержки принятия решений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: теория грубых множеств, метод рассуждений по прецедентам, база знаний, база прецедентов, классификация.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Варшавский П. Р. Моделирование рассуждений на основе прецедентов в интеллектуальных системах поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2009. – № 2. – С. 45–57.
2. Варшавский П. Р. Методы правдоподобных рассуждений на основе аналогий и прецедентов для интеллектуальных систем поддержки принятия решений / П. Р. Варшавский, А. П. Еремеев // Новости искусственного интеллекта. – 2006. – № 3. – С. 39–62.
3. Еременко Т. К. Использование CBR-подхода для баз знаний ситуационных центров / Т. К. Еременко, Ю. Г. Пилипенко // Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика. – 2010. – С. 151–153.
4. Климчук С. А. Применение прецедентов для диагностики кранов мостового типа / С. А. Климчук // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2012. – № 4. – С. 17–22.
5. Ульшин В. О. Моделі представлення знань експертних систем підтримки прийняття рішень при діагностуванні / В. О. Ульшин, С. О. Климчук // Вісник СНУ ім. В. Даля. – 2009. – Том 135, № 5. – С. 21–25.
6. Нефедов Л.И. Метод поиска прецедентов проектов ликвидации чрезвычайных природных ситуаций на магистральных автомобильных дорогах / Л.И. Нефедов, Н. Ю. Филь, Ю. Л. Губин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – № 1. – С. 50–52.
7. Харитонов Ю. Н. Управление проектами реконструкции на основе артефактных платформ / Ю. Н. Харитонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 8. – С. 189–192.
8. Pawlak Z. Rough Sets Theoretical Aspects of Reasoning about Data / Z. Pawlak. – Boston/London: Academic Publishers, 1991. – 229 p
9. Ужга-Ребров О. Особенности представления знаний в теории грубых множеств / О. Ужга-Ребров // Environment. Technology. Resources: 7th International Scientific and Practical Conference, Rezekne, 25–27 June, 2009: proceedings. – Latvia : Izdevnieciba, 2009. – Vol. 2 – P. 169–176.
10. Ужга-Ребров О. И. Управление неопределенностями. Современные невероятностные методы / О. И. Ужга-Ребров. – Латвия: RA Izdevnieciba, 2010. – Ч. 3. – 560 с.

UDC 004.93

METHODS OF LARGE-SCALE SIGNALS TRANSFORMATION FOR DIAGNOSIS IN NEURAL NETWORK MODELS

Lymariev I. O. – Student of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Subbotin S. A. – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Oliynyk A. A. – PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Software Tools, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Drokin I. V. – Chief of the Research Department of General Constructor's Administration, "Motor Sich" JSC, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of dimensionality reduction of diagnosis signals for their use in neural network models is considered. The object of the study was the process of transformation of diagnosis input signals for their subsequent use in the synthesis of predictive models.

Objective. The goal of the work is the creation of the methods for the conversion of diagnosis signals as a result of the application of which new signals will be obtained, which in turn will be used in the construction of neural network predictive models and will significantly reduce the synthesis time of the model by reducing their dimension and the allocation of the necessary components that characterize the state of the individual elements of the object of diagnosis.

Method. The methods of reducing the dimension of the input signals of diagnosis and isolation of their components, which characterize the state of the individual elements of the object of diagnosis on the basis of expert knowledge about the process of diagnosis are proposed. The developed methods are based on the methods of digital signal processing. Based on the expert knowledge of the object and the process of diagnosis, the necessary signal conversion procedures and their parameters are selected. In accordance with the requirements for the desired accuracy and detail of the forecast, the optimal degree of averaging of the signal is selected, which directly affects the speed of constructing the predictive model. The proposed methods can be used in the transformation of diagnosis signals of various diagnostic processes where there is a need to build neural network predictive models based on high-dimensional signals. The developed methods were investigated for the conversion of diagnostic signals obtained on a complex object of technical diagnostics, namely, on the transmission of the helicopter. On the basis of the received signals, a neural network model was synthesized, the training of which requires much less computational resources, while the prediction accuracy remains optimal.

Results. The developed methods are implemented programmatically and investigated in solving the problem of predicting the future state of the helicopter transmission during the diagnosis process.

Conclusions. The experiments have confirmed the effectiveness of the developed methods and allow us to recommend them for use in practice in solving diagnostic problems. The conducted experiments have confirmed the proposed software operability and allow recommending it for use in practice for solving the problems of diagnosis and automatic classification on the features. The prospects for further research may include the search for the best parameters of the developed methods, optimization of their software implementations, as well as experimental study of the proposed methods on a large set of practical problems of diagnosing complex objects of different nature by their diagnostic signals.

KEYWORDS: signal processing, neural network, instance, feature, data dimensionality reduction.

ABBREVIATIONS

GRU is a gated recurrent unit;
HUMS is a Health and Usage Monitoring Systems;
LSTM is a long short-term memory;
NN is a neural network;
RNN is a recurrent neural network;

NOMENCLATURE

C is a condenser capacity;
 ϵ is a ripple factor;
 $F()$ is a neural network model structure;
 $f()$ is a user criterion characterizing the argument quality relatively to the problem being solved;
 H is a sampling rate of the signal envelope;
 N is a number of time steps in signal;
 n is an order of the filter;
 R is a resistance of the resistor;
 σ is a sigmoid activation function;
 $T_n(x)$ is a Chebyshev polynomial of the n -th order;

τ is an averaging time of the signal;
 \tanh is a hyperbolic tangent activation function;
 ω_0 is a cutoff frequency;
 $\omega(t)$ is a signal envelope;
 w is a set of controlled (adjusted) parameters of the neural network model;
 x_j^s is a value of j -th input feature x_j , characterizing the instance x^s ;
 y^s is an output feature value associated with the instance x^s ;
 y^{s*} is a calculated output feature value for the s -th instance on the neural model output;
 x^s is s -th instance of a sample;
 $x(t)$ is an input signal;
 $x_f(t)$ is a signal received as a result of the recursive filtering stage;
 $\psi(t)$ is a Hilbert transform of signal.

INTRODUCTION

To automate decision making and forecasting in the tasks of technical and medical diagnostics, it is necessary to have a model of dependence of the solution on the descriptive features characterizing the recognized instance (observation of the state of the object or process at a certain point in time). As a rule, the modern diagnostic process is carried out over a period of time, during which observations are recorded and can be presented in the form of sets of diagnostic signals.

One of the most popular and powerful tools for constructing models based on diagnostic signals is artificial radial basis NN and RNN [1], which can learn by precedents, providing their generalization and knowledge extraction from data.

The object of study was the process of transformation of diagnosis input signals for their subsequent use in the synthesis of predictive models.

The process of neural model building is typically time-consuming and highly iterative. This is caused by that training time and accuracy of the NN model are essentially dependent on the dimensionality and quality of the used training sample. Therefore, to improve the speed of construction and quality of the neural model, it is necessary to reduce the dimension of the input signals of diagnosis, by isolating the necessary components from them and further averaging them, thereby ensuring the preservation of their basic properties.

The subject of study is the methods of reducing the dimension of the input signals of diagnosis and isolation of their components, which characterize the state of the individual elements of the object of diagnosis.

The known methods of reducing the training sample [2] aren't optimal for applying them to diagnostic signals with a high sampling rate due to the large requirements for time and computational resources and the complexity of their implementation in practice.

The purpose of the work is the conversion of diagnosis signals as a result of which new signals will be obtained, which in turn will be used in the construction of NN predictive models and will significantly reduce the synthesis time of the model by reducing their dimension and the allocation of the necessary components that characterize the state of the individual elements of the object of diagnosis.

1 PROBLEM STATEMENT

Consider the problem of diagnosing the helicopter transmission. Preventing machinery failure is an important component of the maintenance activities of most engineering systems. Helicopters are constantly exposed to periodic loads and vibrations that initiate and propagate the occurrence of damage in many components of the equipment. This is due to the design of the helicopter and the presence of complex mechanical systems, such as the inventive rotor, control rotor, main gearbox and other transmission elements. In most cases, the failure of these systems lead to catastrophic situations.

© Lymariev I. O., Subbotin S. A., Oliynyk A. A., Drokin I. V., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-11

HUMS are used to monitor the technical condition of the helicopter [3]. These systems make possible to detect damage in the transmission components and predict their residual life.

In this paper, we set the task of long-term forecasting of the state of the helicopter transmission during the ground test. This type of test allows the use of significant computing power, which is important when working with a large number of signals, which are measured at a high sampling rate and for significant periods of time. However, with this type of test, it is necessary to build predictive models that will work correctly on long-term periods of time.

Formally, the problem of neuromodels synthesis can be presented in this form.

Suppose given the original sample as a set of precedents (instances) $\langle x_t, y_t \rangle$ is a set of S precedents characterized dependence $y_t(x_t)$, at the moment t , $t = 1, 2, \dots, T$, where $x_t = \{x^s_t\}$, $y_t = \{y^s_t\}$, $s = 1, 2, \dots, S$, characterized by the set of N input features $\{x_j^t\}$, $j = 1, 2, \dots, N$, where j is a number of feature, and output feature y . Each s -th precedent can be noted as $\langle x^s_t, y^s_t \rangle$, where $x^s_t = \{x^s_j\}$.

Then the problem of model synthesis of dependence $y_t(x_t)$ will be considered in search of such structure $F()$ and adjusting such values of parameters w of a model which will satisfy the model quality criterion $f(F(), w, \langle x_t, y_t \rangle) \rightarrow opt$, where opt – is a symbol of optimum.

In case when the original sample has a big dimensionality before model building we need to decide a problem of less size subsample selection from the original sample (given: $X = \langle x_t, y_t \rangle$, $t = 1, 2, \dots, T$, needed: $X' = \langle x'_p, y'_p \rangle$, $p = 1, 2, \dots, P$, where $P \ll T, f(\langle x'_p, y'_p \rangle, \langle x_t, y_t \rangle) \rightarrow opt$).

To build the model in the problem we used the data of vibration diagnostics of the helicopter transmission containing fifteen piezoelectric sensors to monitor the level of vibration mounted on the transmission components, such as: rotor shaft cover, coupling flange of the upper and lower part of the gearbox, drive flange of main rotor, intermediate gearbox and tail gearbox. At the mounting point, there are 3 sensors that allow monitoring vibration parameters in mutually perpendicular planes.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The problem of long-term forecasting of the state of the helicopter transmission includes the solution of a complex of subtasks of forecasting the state of individual elements of the transmission [4]. Usually this problem is solved by predicting the next N values of a certain diagnostic signal [5].

However, this approach has shortcomings that make it difficult to put into practice. First, the input signal has low informativeness regarding the state of a particular transmission element. Secondly, the condition of the transmission element is usually characterized not by one, but by several different diagnostic signals. Third, the input signals have a large sampling rate.

At the same time, there is a need to build predictive models based on big data to ensure satisfactory prediction accuracy. These limitations make the process of synthesis

and training of models based on computational intelligence such time-consuming and computational resources.

Signal transformation is an important problem in the construction of analytical and predictive models that work based on computational intelligence. The development of such models is associated with the need to process big data [1–2, 6]. Typically, the input selection data which represent the signals which describe the investigated processes may contain redundant and uninformative information [7–8]. The use of such information in the synthesis of models leads to an increase in their complexity, redundancy, reduction of generalizing capabilities and can make the synthesized model unusable due to the need for large computational resources.

Usually, to solve this problem, the data is pre-processed to exclude from the training sample redundant features and instances. Most of the known methods use a greedy or stochastic search strategy [9]. Both of these strategies aren't optimal for working with time sequences that are represented by signals with a high sampling rate due to the large time and computational resources and the complexity of their implementation in practice.

One of the most effective tools for data analysis is signal processing [10]. It has a large number of means to allocate the necessary components of the signal, its normalization and averaging.

3 MATERIALS AND METHODS

To solve these problems, two methods for converting input signals based on signal processing methods have been developed and can be used to monitor and predict the state of a certain transmission element when specifying the signal processing parameters.

The method of signal transformation to obtain values for the vibration overload parameter is proposed to be used to obtain an assessment of the state of the transmission element with the vibration overload parameter.

Initialization stage. Set input signal $x(t)$.

Recursive filtering stage. To apply to the input signal $x(t)$ type I Chebyshev filter to select from it the necessary frequency band, which characterizes the state of the transmission element. According to [10] the amplitude frequency characteristic of the type I Chebyshev filter is defined as (2):

$$K(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\omega/\omega_0)}}. \quad (1)$$

Selection of the signal envelope stage. Select the signal envelope to obtain the absolute value of the signal. For this, according to [11], the signal received as a result of the previous stage can be represented as an analytical signal with addition to the real signal $x_f(t)$ of its Hilbert transformation as imaginary part (2):

$$\psi(t) = x_f(t) + j\hat{x}_f(t), \quad (2)$$

from here signal envelope is defined as (3):

$$\omega(t) = |\psi(t)| = \sqrt{x_f^2(t) + \hat{x}_f^2(t)}. \quad (3)$$

Selection of the envelope signal is carried out using a peak detector [12], which is used to allocate the maximum and minimum values of the signal envelope.

Signal averaging stage. Get the average value of the signal amplitude over τ seconds by the formula (4):

$$x'(p) = \frac{\sum_{i=1}^{H\tau} \omega(i)}{H\tau}, \quad p = 1, 2, \dots, P. \quad (4)$$

The method of signal transformation to obtain values for the vibration speed parameter is proposed to be used to obtain an assessment of the state of the transmission element with the vibration speed parameter.

Initialization stage. Set input signal $x(t)$. Recursive filtering stage. To apply to the input signal $x(t)$ type I Chebyshev filter to select from it the necessary frequency band, which characterizes the state of the transmission element.

Signal integration stage. To integrate the signal by the method of RC-circuit [13] with the number of averaging points N to change the parameter to the vibration speed parameter. An RC circuit is an electrical circuit consisting of a resistor R and a capacitor C . Integration is performed by the formula:

$$x_{\text{int}}(t) \approx \frac{1}{RC} \int_0^t x_f(t) dt, \quad x_{\text{int}}(t) \ll x_f(t). \quad (5)$$

Selection of the signal envelope stage. Select the signal envelope (2)–(3) to obtain the absolute value of the signal. Selection of the envelope signal is carried out using a peak detector which is used to allocate the maximum and minimum values of the signal envelope.

Signal averaging stage. Get the average value of the signal amplitude over τ seconds by the formula (4).

The developed methods of signal transformation allow selecting the necessary components from the input signals. After the necessary components are selected, the signal is averaged.

With the use of a band-pass filter, signals are cleared of low-frequency and high-frequency components, which have low informativeness in the original signals. Further averaging of the signal allows to reduce the influence of random amplitude and noise components of the signal, as well as to reduce its dimension.

This allows the use of processed signals in NN models more efficiently than the original signals. In practice, this will increase the speed of predictive models.

After the transformation of the original input data, a predictive model can be synthesized based on them.

In most HUMS as the predictive model used a feed-forward NN [3–4]. These models demonstrate their per-

formance for short-term forecasting, but as the time window between the input data and the target value of the forecast increases, the quality of the models decreases.

Models of RNN have connections between elements that create a directed sequence. This makes it possible to process successive series of events in time. Unlike multi-layer perceptrons, RNN can use their internal memory to process sequences of arbitrary length.

At the moment, there are a large number of models of RNN and new architectures are being developed to solve various problems. In [14] analyzes the main models of RNN to solve the problem of long-term forecasting of the state of the helicopter transmission.

A four – layer recurrent neuron network with an input layer, two hidden layers with GRU-cell (Fig. 1) and an output layer with one linear neuron was chosen as a neural network model. GRU [15] is a simplified model of a well – known LSTM cell with significantly fewer parameters. Through this, learning GRU is easier than LSTM, so it is gaining popularity in many real-world tasks.

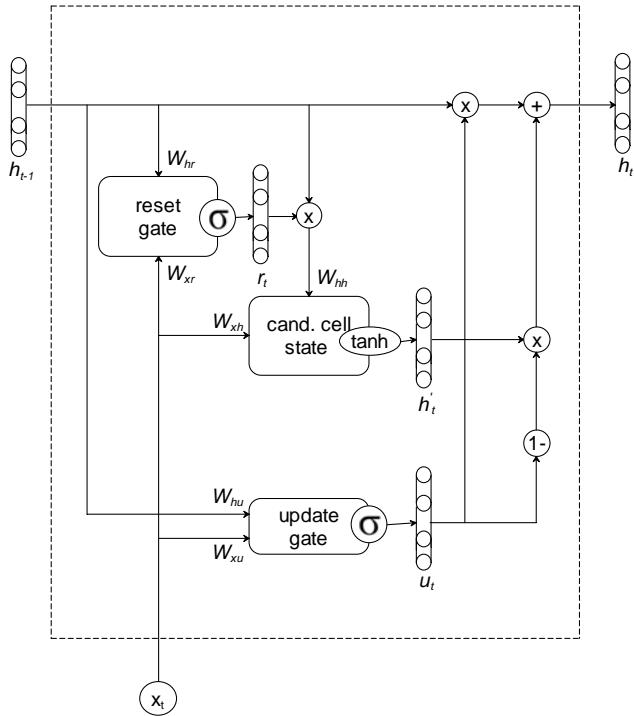


Figure 1 – The structure of the GRU-cell

At the input of the GRU-cell receives a vector x , which contains the current values of the signals. The output of the cell is calculated by the following formulas (6)–(9):

$$u_t = \sigma(W_{xu}x_t + W_{hu}h_{t-1} + b_u), \quad (6)$$

$$r_t = \sigma(W_{xr}x_t + W_{hr}h_{t-1} + b_r), \quad (7)$$

$$h'_t = \tanh(W_{xh'}x_t + W_{hh'}(r_t \otimes h_{t-1})), \quad (8)$$

$$h_t = (1 - u_t) \otimes h'_t + u_t \otimes h_{t-1}, \quad (9)$$

4 EXPERIMENTS

To study the proposed methods of signal transformation, they were implemented in software using WinPOS data processing procedures [16]. The NN model was implemented in Python using the PyTorch library [17].

During the experiment, from 15 original input signals, 22 artificial (calculated) signals were isolated and obtained using the proposed methods, which show the state of such transmission elements, such as: the first tooth of the main gear, rotor blade, tail shaft, the first tooth of the intermediate gearbox, the first tooth of the tail gearbox, tail rotor blade, tail rotor. Information about transformed signals is given in the Table 1.

Table 1 – Information about the signals obtained by the proposed methods

Input measurement location	Direction of measurement	The signal obtained by the proposed methods	
		Name of the transmission element	Controlled parameter
Rotor shaft cover	Vertical	First gear drive of the main gearbox	Vibration overload
		Rotor blade	Vibration speed
Coupling flange of the upper and lower part of the gearbox	Vertical		
	Axial		
Drive flange of main rotor	Vertical		
	Horizontal		
	Axial		
Intermediate gearbox	Vertical		
	Horizontal		
	Axial		
Tail shaft	Vertical		
	Horizontal		
	Axial		
First gear drive of the intermediate gearbox	Vertical		
	Horizontal		
	Axial		
Tail gearbox	Vertical	First gear drive of the tail gearbox	Vibration overload
	Horizontal		
	Axial		
Tail rotor blade	Vertical	First gear drive of the tail gearbox	Vibration overload
	Horizontal		
	Axial		
Tail rotor	Vertical		
	Horizontal		
	Axial		

For recursive filtering in the proposed methods of signal conversion, a filter of 4-th order with the value of ripple factor $\varepsilon = 0,3$ dB was used. To integrate the signal by the method of RC-circuit, the number of averaging points is $N = 800$. The signals were averaged over time $\tau = 1$ s.

Four-layer RNN with GRU-cells were used in the experiments. It had 30 neurons in the first hidden layer and 15 neurons in the second. It was trained using the RMSprop method with learning rate 0.01, one train batch contained 40 values [18].

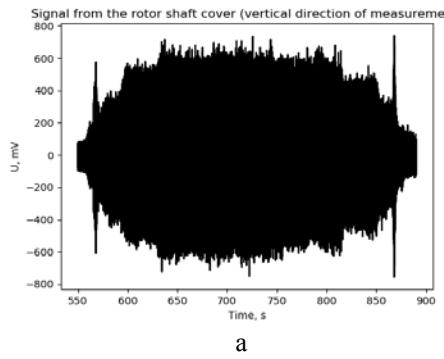
Experiments were conducted during which the historical information on the progress of the 18 cycles of transmission tests (cycle duration $t = 150$ s) was used as a training sample. The input signals were transformed by the proposed methods into signals characterizing the state of individual transmission elements.

The purpose of building a predictive model was to obtain a forecast of the state of the transmission element on the next test cycle based on a set of values of time steps (time window) on the current cycle. The size of the sliding time window equal to 3 was used in the experiments.

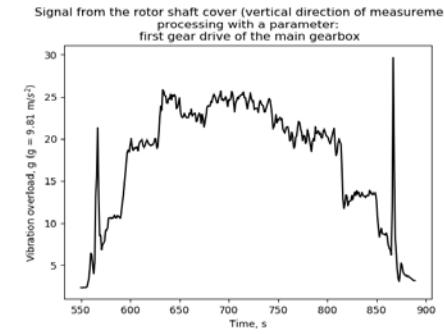
Data about signals of the first 14 cycles were used as training data. Data about the signals of the last 4 cycles were used as test data.

5 RESULTS

The frequency band was determined separately for each transmission element, according to its physical parameters. For example, for signal processing by the rotor blade parameter, the filter bandwidth of 1000–2750 Hz was used (Fig. 2).



a



b

Figure 2 – The example of using the proposed methods for processing the signal from the rotor shaft cover (vertical direction of measurement): a – original signal; b – processed signal

For signal processing by the tail rotor blade parameter, the filter bandwidth of 20–45 Hz was used. The results of the proposed methods are shown in Fig. 3.

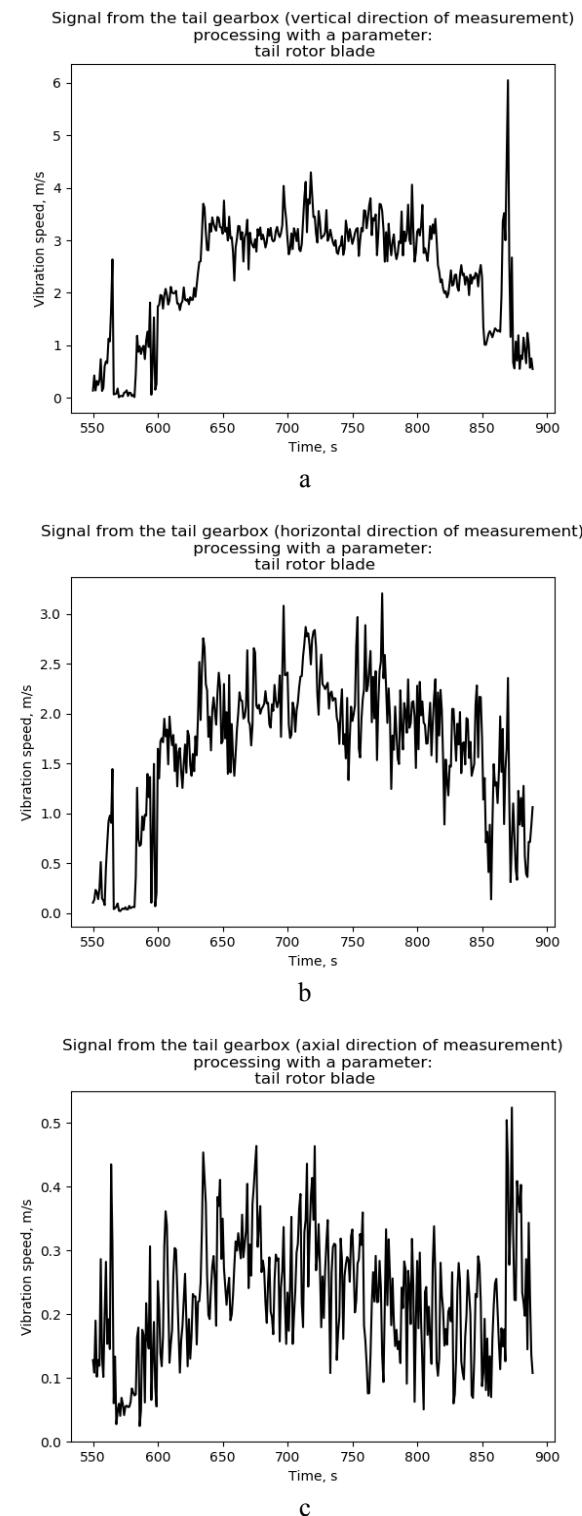


Figure 3 – The results of using the proposed methods the signal from the tail gearbox processing with a parameter: tail rotor blade: a – vertical direction of measurement; b – horizontal direction of measurement; c – axial direction of measurement

Predictive models were synthesized on the basis of the processed signals. As output signals, during the experiment, all received signals were used alternately.

To assess the quality of the forecast, we used the mean squared error of the forecast of the signal by the formula (10):

$$E = \frac{1}{N} \sum_{s=1}^S (y^s - F(\omega, x^s))^2. \quad (10)$$

Predictive models were synthesized on the basis of the processed signals. As output signals, during the experiment, all received signals were used alternately.

Predictive models were synthesized on the basis of the processed signals. As output signals, during the experiment, all received signals were used alternately.

For example, the prediction error for the signal received on the intermediate gearbox (axial direction of measurement) and processed with a parameter: first gear drive of the intermediate gearbox is 0.0167, which corresponds to 13.45%. According to expert estimates, this error is acceptable for the problem of predicting the transmission of the helicopter.

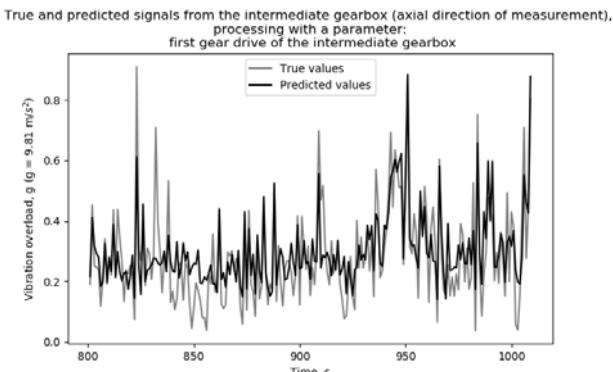


Figure 4 – The example of prediction signal values received on the intermediate gearbox (axial direction of measurement) and processed with a parameter: first gear drive of the intermediate gearbox

The fragment of the results of conducted experiments for this and other examples is presented in the Table 2.

Table 2 – Information about the signals obtained by the proposed methods

Input measurement location	Direction of measurement	Forecast error (percent), %
Rotor shaft cover	Vertical	13.20
Tail gearbox	Vertical	9.58
	Horizontal	12.95
	Axial	15.64
Intermediate gearbox	Axial	13.45

6 DISCUSSION

The use of the proposed methods made it possible to obtain a set of signals for effective prediction of the state of the object of diagnosis. The general condition of the diagnostic object is characterized by a multivariate time series. The most flexible tool for forecasting such series is NN forecasting models. The results shown in table 2 demonstrate that the model built on the basis of the received signals provides the necessary forecasting accuracy.

The advantage of using processed signals is that their dimension is many times smaller than the dimension of the input signals. Also, these signals are more informative for the expert and don't require further processing after receiving the forecast.

The disadvantages of the proposed methods are that in order to obtain high prediction accuracy it is necessary to have a large set of input signals. However, the modern process of diagnosis often has a large amount of historical information in the form of signals with a high sampling rate.

Also, the developed methods can be basic for the development of more specialized methods for predicting individual characteristics of the diagnosis signal. For example, to predict the sharp vibration jumps about the diagnosis of technical objects, which often leads to the failure of the object.

The results of the experiments shown in Fig. 4 and table 2 demonstrate the efficiency and flexibility of the developed methods. Based on this, the proposed methods can be effectively used in practice to predict the state of the object of diagnosis.

CONCLUSIONS

The urgent problem of reducing the dimension of diagnosis signals for the synthesis of data-driven neural network diagnosis models is considered.

The scientific novelty of obtained results is the methods of signal transformation based on signal processing are proposed. They are based on the methods of signal processing, solve the problem of selecting the desired components of the signal, and reduce its dimension. The developed methods can significantly reduce the dimension of the input signals, without reducing their informativeness. This allows to increase the speed of synthesis of NN models based on transformed signals.

The practical significance of obtained results is that the software realizing and used to solve practical regression problems. The experiments have confirmed the efficiency of the developed proposed software and allow us to recommend it for use in practice for the problems of synthesis of models based on precedents, which are presented as signals.

Prospects for further research are parallelization of calculations and optimization of software implementation of the proposed methods, also as experimental study of the proposed methods with different internal parameters of the settings on the larger complex of practical problems having different nature and dimension.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed with partial support of international project “Internet of Things: Emerging Curriculum for Industry and Human Applications” (Reference number 573818-EPP-1-2016-1-UK-EPPKA2-CBHE-JP) by the Erasmus+ programme of the European Union.

REFERENCES

1. Shin Y. C., Xu C. Intelligent systems: modeling, optimization, and control. Boca Raton, CRC Press, 2009, 456 p.
2. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning. New York, Springer, 2006, 738 p.
3. Giurgiutiu V., Cuc A., Goodman P. Review of vibration-based helicopters health and usage monitoring methods, *55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, 2–5 April 2001 : proceedings*. Virginia Beach, 2001, pp. 34–44.
4. Kazlas P. T., Monsen P. T., LeBlanc M. J. Neural network-based helicopter gearbox health monitoring system, *Neural Networks for Signal Processing, Proceedings of the IEEE-SP Workshop, 6–9 September 1993, proceedings*, 1993, pp. 431–440.
5. Dempsey P., Lewicki D., Le D. Investigation of current methods to identify helicopter gear health, 7 IEEE Aerospace Conference, 3–10 March 2007, proceedings. Montana, 2007, pp. 81–87.
6. Subbotin S. A., Oliinyk A.A. The dimensionality reduction methods based on computational intelligence in problems of object classification and diagnosis, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2017, Vol. 543, pp. 11–19.
7. Jensen R., Shen Q. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches. Hoboken, John Wiley & Sons, 2008, 339 p.
8. Lee J. A. Nonlinear dimensionality reduction. New York, Springer, 2007, 308 p.
9. Guyon I., Elisseeff A. An introduction to variable and feature selection, *Journal of machine learning research*, 2003, No. 3, pp. 1157–1182.
10. Ukil A. Intelligent systems and signal processing in power engineering. Berlin, Springer, 2007, 378 p.
11. Feldman M. Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration. Chichester, John Wiley, 2011, 320 p.
12. Hagen J. B. Radio-Frequency Electronics: Circuits and Applications. New York, Cambridge University Press, 2009, 438 p.
13. Venkata R. Rama S., Manmadha R. Pulse and Digital Circuits. New Dehli, Pearson, 2010, 709 p.
14. Limarev I. O. Dovgoterminove prognozuvannya stany transmisii vertoletu na osnovi rekurentnih neyronnih merezh, *Radioelektronika i molod v XXI st. : Mizhnarodniy molodizhniy forum*. Harkiv, 2018, Vol. 5, pp. 223–224 (in Ukrainian).
15. Cho K. et al. On the Properties of Neural Machine Translation [Electronic resource]. Access mode: <http://arxiv.org/abs/1409.1259>.
16. WinPOS Documentation [Electronic resource]. Access mode: <http://nppmera.ru/documentation/>.
17. PyTorch Tutorials [Electronic resource]. Access mode: <https://pytorch.org/tutorials/>.
18. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning [Electronic resource]. Access mode: <http://www.deeplearningbook.org>.

Received 22.08.2018.

Accepted 10.09.2018.

УДК 004.93

МЕТОДИ ПЕРЕТВОРЕННЯ СИГНАЛІВ ВЕЛИКОЇ РОЗМІРНОСТІ ДЛЯ ДІАГНОСТУВАННЯ У НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ МОДЕЛЯХ

Лимарев І. О. – студент 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.

Олійник А. О. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна.

Дрокін І. В. – начальник відділу досліджень УГК «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто задачу зменшення розмірності сигналів діагностування для їх використання у нейромережевих моделях. Об’єктом дослідження є процес перетворення вхідних сигналів діагностування для їх подальшого використання при побудові прогнозуючих моделей. Мета роботи – створення методів для перетворення сигналів діагностування у результаті використання яких будуть отримані нові сигнали, які у свою чергу будуть використані при побудові нейромережевих прогнозуючих моделей та дозволять значно скоротити час синтезу моделей за рахунок скорочення їх розмірності та виділення необхідних компонент, що характеризують стан окремих елементів об’єкту діагностування.

Метод. Запропоновано методи, що дозволяють одночасно скоротити розмірність вхідних сигналів діагностування та виділи з них компоненти, що характеризують стан окремих елементів об’єкту діагностування на основі експертних знань про процес діагностування. Розроблені методи базуються на основі методів цифрової обробки сигналів. Відповідно до експертних знань про об’єкт та процес діагностування обираються необхідні процедури перетворення сигналів та їх параметри. Відповідно вимогам до бажаної точності та детальноті отримуваного прогнозу обирається оптимальний ступінь усереднення сигналу, який напряму впливає на швидкість побудови прогнозуючої моделі. Запропоновані методи можуть бути використані для перетворення сигналів діагностування різноманітних діагностичних процесів де є потреба у побудові нейромережевих прогнозуючих моделей на основі сигналів великої розмірності. Були проведенні дослідження розроблених методів для перетворення сигналів діагностування отриманих на складному об’єкті технічної діагностики, а саме на трансмісії гелікоптера. На основі отриманих сигналів було синтезовано нейромережеву модель, навчання якої потребує набагато менших обчислювальних ресурсів, при цьому точність прогнозування залишається оптимальною.

Результати. Розроблені методи реалізовані програмно і досліджені при вирішенні задачі прогнозування майбутнього стану трансмісії гелікоптера під час процесу діагностування.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили ефективність розроблених методів і дозволяють рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні задач діагностування. Перспективи подальших досліджень можуть полягати в пошуку кращих параметрів розроблених методів, оптимізації їх програмних реалізацій, а також експериментальному дослідженні запропонованих методів на більшому комплексі практичних задач діагностування складних об’єктів різної природи за їх діагностичними сигналами.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: цифрова обробка сигналів, нейрона мережа, екземпляр, ознака, зменшення розмірності.

УДК 004.93

МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ ДЛЯ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ В НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЯХ

Лимарев И. О. – студент 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.

Олейник А. А. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина.

Дрокин И. В. – начальник отдела исследований УГК «Мотор Сич», Запорожье, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена задача уменьшения размерности сигналов диагностирования для их использования в нейросетевых моделях. Объектом исследования являлся процесс преобразования входных сигналов диагностирования для их последующего использования при построении прогнозирующих моделей. Цель работы – создание методов для преобразования сигналов диагностирования в результате применения которых будут получены новые сигналы, которые в свою очередь будут использованы при построении нейросетевых прогнозирующих моделей и позволят значительно сократить время синтеза модели за счет сокращения их размерности и выделения необходимых компонент, которые характеризуют состояние отдельных элементов объекта диагностирования.

Метод. Предложены методы, которые позволяют одновременно сократить размерность входных сигналов диагностирования и выделить из них компоненты, которые характеризуют состояние отдельных элементов объекта диагностирования на основании экспертных знаний про процесс диагностирования. Разработанные методы базируются на основе методов цифровой обработки сигналов. Исходя из экспертных знаний о объекте и процессе диагностирования выбираются необходимые процедуры преобразования сигналов и их параметры. В соответствии требованиям к желаемой точности и детальности прогноза выбирается оптимальная степень усреднения сигнала, которая напрямую влияет на скорость построения прогнозирующей модели. Предложенные методы могут быть использованы при преобразовании сигналов диагностирования разнообразных диагностирующих процессов где есть необходимость в построении нейросетевых прогнозирующих моделей на основе сигналов большой размерности. Были проведены исследования разработанных методов для преобразования сигналов диагностирования полученных на сложном объекте технического диагностирования, а именно на трансмиссии вертолета. На основе полученных сигналов было синтезировано нейросетевую модель, обучение которой требует намного меньших вычислительных ресурсов, при этом точность прогнозирования остается оптимальной.

Результаты. Разработанные методы реализованы программно и исследованы при решении задачи прогнозирования будущего состояния трансмиссии вертолета во время процесса диагностирования.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили эффективность разработанных методов и позволяют рекомендовать их для использования на практике при решении задач диагностирования. Перспективы дальнейших исследований могут состоять в поиске лучших параметров разработанных методов, оптимизации их программных реализаций, а также экспериментальному исследованию предложенных методов на большем комплексе практических задач диагностирования сложных объектов разной природы по их диагностическим сигналам.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цифровая обработка сигналов, нейронная сеть, экземпляр, признак, уменьшение размерности.

ЛИТЕРАТУРА / ЛИТЕРАТУРА

1. Shin Y. C. Intelligent systems: modeling, optimization, and control / Y. C. Shin, C. Xu. – Boca Raton : CRC Press, 2009. – 456 p.
2. Bishop C. M. Pattern recognition and machine learning / C. M. Bishop. – New York : Springer, 2006. – 738 p.
3. Giurgiutiu V. Review of vibration-based helicopters health and usage monitoring methods / V. Giurgiutiu, A. Cuc, P. Goodman // 55th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology, Virginia Beach, 2–5 April 2001 : proceedings. – Virginia Beach, 2001. – P. 34–44.
4. Kazlas P. T. Neural network-based helicopter gearbox health monitoring system / P. T. Kazlas, P. T. Monsen, M. J. LeBlanc // Neural Networks for Signal Processing, Proceedings of the IEEE-SP Workshop, 6–9 September 1993 : proceedings, 1993. – P. 431–440.
5. Dempsey P. Investigation of current methods to identify helicopter gear health / P. Dempsey, D. Lewicki, D. Le // 7 IEEE Aerospace Conference, 3–10 March 2007 : proceedings. – Montana, 2007. – P. 81–87.
6. Subbotin S. A The dimensionality reduction methods based on computational intelligence in problems of object classification and diagnosis / S. A. Subbotin, A. A. Oliynyk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 543. – P. 11–19.
7. Jensen R. Computational intelligence and feature selection: rough and fuzzy approaches / R. Jensen, Q. Shen. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2008. – 339 p.
8. Lee J. A. Nonlinear dimensionality reduction / A. J. Lee. – New York : Springer, 2007. – 308 p.
9. Guyon I. An introduction to variable and feature selection / I. Guyon, A. Elisseeff // Journal of machine learning research. – 2003. – No. 3. – P. 1157–1182.
10. Ukil A. Intelligent systems and signal processing in power engineering / A. Ukil. – Berlin : Springer, 2007. – 378 p.
11. Feldman M. Hilbert Transform Applications in Mechanical Vibration / M. Feldman. – Chichester : John Wiley, 2011. – 320 p.
12. Hagen J. B. Radio-Frequency Electronics: Circuits and Applications / J. B. Hagen. – New York : Cambridge University Press, 2009. – 438 p.
13. Venkata R. Pulse and Digital Circuits / R. Venkata, S. Rama, R. Mamadha. – New Dehli : Pearson, 2010. – 709 p.
14. Limarev I. O. Dovgoterminove prognozuvannya stany transmisii vertoletu na osnovi rekurentnih neyronnih merezh / I. O. Limarev // Radioelektronika i molod v XXI st. : Mizhnarodniy molodizhniy forum, Harkiv, 2018. – Vol. 5. – P. 223–224 (in Ukrainian).
15. Cho K. On the Properties of Neural Machine Translation [Electronic resource] / K. Cho et al. – Access mode: <http://arxiv.org/abs/1409.1259>.
16. WinPOS Documentation [Electronic resource]. – Access mode: <http://nppmera.ru/documentation/>.
17. PyTorch Tutorials [Electronic resource]. – Access mode: <https://pytorch.org/tutorials/>.
18. Goodfellow I. Deep Learning [Electronic resource] / I. Goodfellow, Y. Bengio, A. Courville. – Access mode: <http://www.deeplearningbook.org>.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА БИБЛИОГРАФИЧЕСКИХ ОПИСАНИЙ И РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ АНАЛИЗА СПИСКА ЛИТЕРАТУРЫ

Мельников А. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры интеллектуальных систем принятия решений, Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, Украина.

Комиссаров К. М. – студент, Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассмотрена задача анализа библиографического списка с целью автоматизации проверки правильности его составления. Объектом исследования являлся процесс формирования библиографических описаний на основе действующих стандартов. Предмет исследования – модели и методы интеллектуального анализа для проверки и исправлений библиографического описания. Цель работы – повышение эффективности научно-педагогической деятельности за счет применения интеллектуальной системы для проверки списка литературных источников в курсовых и дипломных работах студентов.

Метод. Проанализирован стандарт и перечислены элементы, составляющие библиографическое описание. Рассмотрены существующие инструменты для формирования и проверки списка литературных источников, выявлены их недостатки, обоснована необходимость создания программного средства для проверки библиографических описаний. Приведено исследование методов интеллектуального анализа: рассмотрены методы регулярных выражений, нечеткого поиска с применением нечетких регулярных выражений, конечного автомата и нейронной сети Хемминга. Создана ранее не существующая модель проверки библиографического описания на соответствие действующим стандартам, основанная на методах регулярных выражений, нечеткого поиска, конечного автомата и нейронной сети Хемминга. Представлена объектно-ориентированная модель проектируемой компьютерной системы на языке визуального моделирования UML. Описана работа компьютерной реализации программной системы, осуществленной в среде визуального программирования C#.

Результаты. Разработана программная система – интеллектуальная система принятия решений – для проверки библиографического описания и частично автоматизированного исправления с пользовательскими указаниями, сформированными на основе базы знаний.

Выводы. Разработанная интеллектуальная система позволяет выявить и исправить ошибки оформления библиографического описания. Основой программы является база знаний, которую можно дополнить при наличии каких-либо непредусмотренных ситуаций. Кроме этого, данная система дает возможность накапливать базу данных уже проверенными списками литературы. Разработанную систему можно улучшать без вмешательства в исходный код программы. При этом уровень ее возможностей и правильности исправлений, выдачи замечаний напрямую зависит от полноты и правильности составленной базы знаний. К перспективам дальнейших исследований можно отнести использование других стилей оформления списка литературы, отличных от ДСТУ 7.1:2006, таких, как IEEE.

Ключевые слова: библиографический список, библиографическое описание, ДСТУ 7.1:2006, ISBD, регулярные выражения, нечеткий поиск, расстояние редактирования, нечеткие регулярные выражения, конечный автомат, нейросеть Хемминга, Unified Modeling Language, C#, WorldAddIn.

ВВЕДЕНИЕ

Обязательной структурной частью любой научной работы является список использованной литературы, который служит источником информации об использованных (рассматриваемых, цитируемых, упоминаемых) в тексте работы документах. Библиографический список составляется из библиографических описаний, которые содержат совокупность сведений о документе, его части, или группе документов, приводимых в определенной последовательности и дающих возможность идентифицировать данный документ.

В нашей стране библиографическое описание необходимо составлять согласно действующему стандарту Украины – ДСТУ 7.1:2006 «Библиографическая запись. Библиографическое описание». Стандарт определяет достаточно много требований к оформлению библиографических описаний для различных видов источников, устанавливает разное количество обязательных элементов, в зависимости от вида источника, наличия сведений в предписанных источниках, спе-

цифики материала и т.д., является базовым для системы стандартов, правил, руководств, методических пособий по составлению библиографической записи [1–4]. Очевидно, что применение систем автоматизации и проверки составления библиографического списка позволит повысить эффективность научно-педагогической деятельности

Объектом исследования является процесс формирования библиографических описаний на основе действующих стандартов.

Предметом исследования являются модели и методы интеллектуального анализа для проверки и исправлений библиографического описания.

Цель – повышение эффективности научно-педагогической деятельности за счет применения интеллектуальной системы для проверки списка литературных источников в курсовых и дипломных работах студентов.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Дано описание структуры библиографического описания. На этой основе и результатах анализа часто допускаемых ошибок необходимо сформировать базу знаний для идентификации областей с целью исправления ошибок – приведения списка в соответствие со стандартом ДСТУ 7.1:2006.

База знаний должна быть самообучаемой, реализованной в виде программного приложения – интеллектуальной системы принятия решений.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Библиографическое описание – совокупность сведений о документе, приведенных по определенным правилам, устанавливающим наполнение и порядок следования областей и элементов, предназначенных для идентификации и общей характеристики документа [1–4].

Согласно ДСТУ 7.1–2006, в состав библиографического описания входит ряд обязательных областей и элементов: область заглавия и сведений об ответственности, область издания, область специфических сведений, область выходных данных, Область физической характеристики, область серии, область примечания, область стандартного номера (или его альтернативы) и условий доступности. Для более четкого разделения областей и элементов, а также для различия предписанной и грамматической пунктуации применяют пробелы в один печатный знак до и после предписанного знака. Исключение составляют точка и запятая – пробелы оставляют только после них [3–4].

Элементы могут быть обязательными и факультативными. Обязательные элементы обеспечивают идентификацию документа и поиск. Факультативные элементы дают дополнительные сведения о документе (параллельное заглавие, сведения, относящиеся к заглавию, сведения о сопроводительном материале, условия доступности, цена и т.п.). Наряду со стандартизацией общей структуры библиографического описания учитывалась специфика документов разных видов. Для каждого из них выявлен и установлен необходимый минимум обязательных элементов для идентификации. Например, для книг – пять обязательных элементов, а для стандартов – два. При необходимости библиографическое описание документа любого вида по ДСТУ 7.1–2006 можно составить только из обязательных элементов [5–6]. Пунктуация в библиографическом описании выполняет две функции – обычных грамматических знаков препинания и знаков предписанных (условно разделяющих области и аналогичные элементы описания) для распознавания отдельных элементов в любом ISBD, на любом языке [6]. В качестве предписанной пунктуации выступают знаки препинания и математические знаки.

В стандарте ГОСТ ДСТУ 7.1-2006 определены три вида библиографического описания: одноуровневое, многоуровневое и аналитическое. Будем рассматривать только одноуровневое и аналитическое библиографические описания, так любое многоуровневое

описание можно представить как несколько одноуровневых. На однотомное издание составляют одноуровневую запись, состоящую из одной части (одного уровня). Также одноуровневая запись может быть составлена на многотомное издание в целом, на отдельный том (часть, выпуск, номер и т. п.), на группу томов многотомного издания. Схема одноуровневого описания в наиболее полном варианте описана в стандарте [3].

В ходе анализа не удалось найти универсальных программных решений для проверки правильности оформления списка использованной литературы или библиографического описания как на соответствие стандарту ДСТУ 7.1:2006, так и на соответствие другим стандартам, в том числе международному ISBD. Наиболее распространены следующие программы и инструменты для формирования и проверки библиографического описания:

1. Встроенный инструмент для формирования библиографического списка в Microsoft Word, который появился с 2007 версии офисного пакета. Основными преимуществами данного инструмента являются простота в использовании, интуитивно понятный интерфейс, поддержка нескольких стандартов оформления библиографического описания [7]. Недостатком является несоответствие оформляемых описаний действующим стандартам, как ДСТУ 7.1:2006, так и ГОСТ 7.1:2003.

2. Интернет-ресурс для оформления списка литературных источников с названием vak.in.ua, который предоставляет возможность оформления научных источников в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Украины [8]. Основными преимуществами данного ресурса являются простота, высокая степень соответствия Украинскому стандарту ДСТУ 7.1:2006, большое количество готовых примеров. Несмотря на высокую степень соответствия ДСТУ 7.1:2006, при составлении библиографического описания иногда обнаруживаются грубые ошибки. Например, при составлении аналитического библиографического описания в область сведений об идентифицирующем документе могут попадать как фамилия автора, так и издание. Кроме этого, к недостаткам можно отнести отсутствие возможности формирования списка литературы без подключения к интернету, а так же проверки уже сформированного библиографического описания на его соответствие стандартам.

Рассмотрим несколько методов интеллектуального анализа библиографических описаний.

Так как области описания не могут быть однозначно определены только по их расположению, их можно идентифицировать по формату (предписанным шаблонам) и по ключевым словам, характерными для данной области. Для таких задач используется механизм регулярных выражений.

Регулярные выражения – это формальный язык поиска и осуществления манипуляций со строками, основанный на использовании метасимволов,

литералов, операторов или конструкций. Механизм регулярных выражений позволяет захватывать целевую строку по заданному шаблону [9-10].

Регулярные выражения могут состоять из обычных слов, символьных классов, множества символов или слов, диапазонов символов. Примеры единичных символов:

[set] – задание множества символов (соответствие символа из заданного набора – «s», «e», «t»).

[^set] – задание отрицания множества символов (соответствие любого символа, который не входит в заданный набор).

Классы символов соответствуют одному набору символов и состоят из языковых элементов, приведенных в таблице символьных классов [9–10].

Для управления элементами регулярных выражений используются квантификаторы. Квантификатор указывает количество вхождений предшествующего элемента (знака, группы или класса знаков), которое должно присутствовать во входной строке, чтобы было зафиксировано соответствие. Привязки (якоря) являются атомарными утверждениями нулевой ширины, добавляют условия для соответствия в зависимости от текущей позиции в строке, но не предписывают обработчику перемещаться по строке или обрабатывать символы. Элементы регулярных выражений можно группировать. Конструкции группирования отображают части выражений регулярных выражений и обычно захватывают части входной строки. Конструкции изменения позволяют объединять наборы для соответствий (регулярные выражения) в одно регулярное выражение, работают по принципу логического «или». Для выполнения операций поиска и замены с помощью регулярных выражений предусмотрен механизм подстановки. Подстановки – это языковые элементы регулярных выражений, которые поддерживаются в шаблонах замены. То есть группы выражений могут использоваться в качестве элементов подстановки при выполнении операции «поиска-замены».

Таким образом, с помощью регулярных выражений можно находить любые строковые конструкции в тексте, составленные по заранее известному шаблону. Однако они находят исключительно соответствия, которые строго соответствуют этому шаблону. В противном случае механизм регулярных выражений не захватывает целевую подстроку. Кроме того, составление регулярных выражений требует большой внимательности, на практике очень часто бывают ситуации, когда регулярные выражения захватывают строку, которая не предполагалась быть целевой.

Нечеткий поиск – это поиск информации, при котором выполняется сопоставление заданному образцу поиска или близкому к этому образцу значению. Алгоритмы нечеткого поиска используются в большинстве современных поисковых систем, например, для проверки орфографии. В

случае нечеткого поиска для оценки сходства используются специальные метрики нечеткого поиска. Метрикой нечеткого поиска называют функцию расстояния между двумя словами, позволяющую оценить степень их сходства в данном контексте. В качестве метрик используют расстояния Хемминга, Левенштейна, Дамерау-Левенштейна [11].

Расстояние Хемминга – это число позиций, в которых соответствующие символы двух слов одинаковой длины различны. Согласно определению, расстояние Хемминга имеет один существенный недостаток – сравнивать можно только слова одинаковой длины. Из-за этого данную метрику практически не применяют на практике.

Расстояние Левенштейна или расстояние редактирования – это минимальное количество операций (вставки одного символа и замены одного символа на другой), необходимых для преобразования одной строки в другую. Расстояние Левенштейна применяют для исправления ошибок в словах, биоинформатике для сравнения хромосом и для полнотекстового поиска. Данная метрика имеет следующие недостатки: при перестановке слов в предложении расстояние принимает большое значение; значительно зависит от длины слова. Для расчета расстояния Левенштейна используют метод Вагнера-Фишера.

Расстояние Дамерау-Левенштейна – это мера разницы двух строк символов, определяемая как минимальное количество операций вставки, удаления, замены и перестановки соседних символов, необходимых для перевода одной строки в другую. Данная метрика отличается от расстояния Левенштейна только добавлением новой операции (перестановки).

Недостатком применения нечеткого поиска является более низкая производительность по сравнению с обычным. Кроме этого, при использовании нечетких регулярных выражений вероятность нахождения неожидаемых соответствий намного выше. Поэтому в нечетких регулярных выражениях очень важно устанавливать минимально возможную дистанцию редактирования для каждой группы.

Для нечеткого поиска могут быть использованы широко известные алгоритмы и коды Хемминга. Коды Хемминга давно и успешно применяются при кодировании и декодировании информации, позволяя успешно восстановить утерянную при передачи информацию. Алгоритмы Хемминга могут быть применены в вопросах информационного поиска. Особенно эффективно коды Хемминга работают вместе с аппаратом нечеткой логики. Коды Хемминга – простейшие линейные коды с минимальным расстоянием 3, то есть способные исправить одну ошибку. Сети Хемминга представляют собой одну из разновидностей нейронных сетей. Принцип работы сетей Хемминга основан на определении расстояния Хемминга между объектами и нахождении наиболее близкого [12].

Для обнаружения ошибок в сетях Хемминга используют коды обнаружения ошибок, для исправления – корректирующие коды. Для этого при записи и передачи информации в полезные данные добавляют специальным образом структурированную избыточную информацию, а при чтении (приеме) ее используют для того, чтобы обнаружить или исправить ошибки. Число ошибок, которое можно исправить, ограничено и зависит от конкретного применяемого кода. Таким образом, алгоритмы Хэмминга могут быть использованы для поиска слов, которые в исходном запросе набраны с ошибками.

Однако необходимо учитывать одну особенность сетей Хемминга. Если при написании была опечатка или даже две, то алгоритм работает хорошо, но если был пропущен символ или добавлен лишний, то Хеммингово расстояние может оказаться слишком большим. Для того чтобы устранить этот недостаток, мы будем подавать на вход как само искомое слово, так и это же слово, исключая поочередно один символ в каждой позиции и добавляя одну букву в каждую позицию. Такой подход позволит найти практически все случаи ошибок – опечатка, пропуск символа, лишний символ.

Следует отметить, что, несмотря на большую эффективность кодов Хемминга, они не лишены определенных недостатков. Линейные коды, как правило, хорошо справляются с редкими и большими ошибками и опечатками. Однако их эффективность при сравнительно частых, но небольших ошибках менее высока.

Недостатки применения метрики Хемминга и применения нейронной сети Хемминга: отсутствие возможности поиска слов разной длины; размер нейронной сети Хемминга и производительность поиска зависит от объема словаря, которому обучается нейросеть, и в котором ищется слово; метод применим только для заранее известного алфавита, в противном случае поиск приводит к непредсказуемому результату.

Для выполнения некоторых проверок – таких, как наличие обязательных областей и правильность следования областей – целесообразно рассмотреть систему, поведение которой зависит от текущего состояния, и вариантами перехода из текущего состояния в новое состояние. Примером такой системы является конечный автомат [13].

Конечный автомат является некой абстрактной моделью, которая описывает дискретную систему, пове-

дение которой зависит от текущего состояния и функции перехода в новое состояние. С помощью конечно-го автомата обычно представляют некий алгоритм, который допускает или не допускает цепочки входных символов, принадлежащих входному алфавиту.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для осуществления проверки библиографического описания необходимо определить каждую его область, после чего возможно будет осуществить ряд таких проверок, как правильность расположения элементов, правильность следования областей, соответствие данных этим областям. Для решения этих задач будут использоваться регулярные выражения, так как они являются мощным инструментом и показывают высокую эффективность в задачах, связанных с обработкой строк.

Как уже упоминалось ранее, с помощью регулярных выражений можно определить область при наличии вхождения искомого шаблона, если это не противоречит ее расположению. Тем не менее, может возникнуть проблема неоднозначности. Например, фамилия и инициалы могут присутствовать в различных областях, таким образом, они не могут быть критериями для идентификации. Поэтому при формировании правил для идентификации следует выделять наиболее характерные признаки областей по их содержимому.

Диаграмма выражения для идентификации области физической характеристики представлена на рис. 1.

Согласно ДСТУ, область выходных данных является обязательной областью. Отсутствие места издания или издательства не могут быть причиной отсутствия приводимых сведений, которые формируются следующим образом: «. – Место издания : Издательство, Год». Для идентификации области выходных данных используется выражение и диаграмма, представленные на рис. 2.

Для идентификации области сведений об издании, используются наиболее характерные для нее словосочетания: «Издание», «Версия», «Ред.» (рис. 3).

Для идентификации области примечания, в качестве шаблона используются наиболее часто встречающиеся в ней словосочетания, такие как «Библиогр.:», «экз.», «Рез.», а также возможное указание страниц (рис. 4).

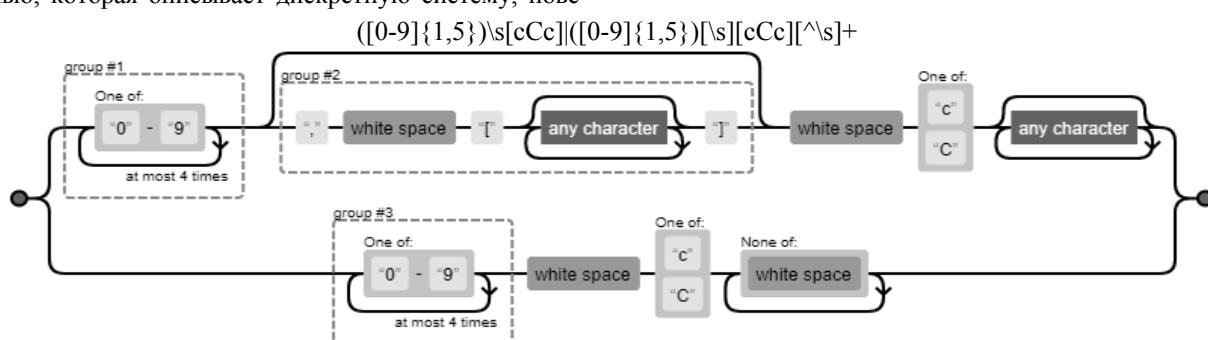


Рисунок 1 – Диаграмма выражения для идентификации области физической характеристики

[А-Яа-я][.][\s][:][^\n]+[^\s]+[,][\s][1-2][0-9][0-9][0-9][А-Я][а-я]+[\s]:[\s][А-Я]*[а-я]*[\s]*,[\s][0-9]{1,4}

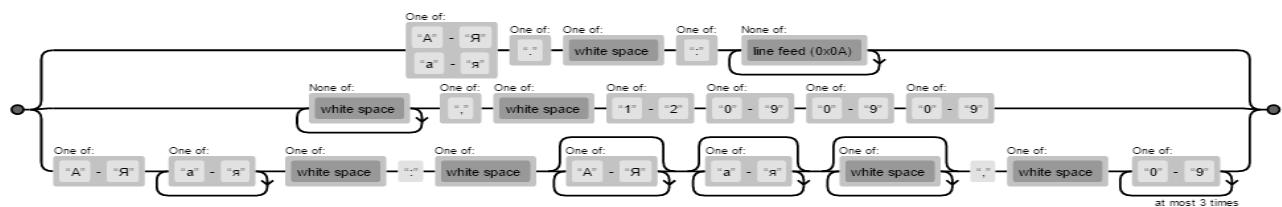


Рисунок 2 – Диаграмма выражения для идентификации области выходных данных

[^\n]+[Ии]зд[^\n]+|[Ии]зд[^\n]+|[^\n]+[Ии]зд[^\n]+[Вв]ерс[^\n]+|[^\n]+[Вв]аріант[^\n]ред.

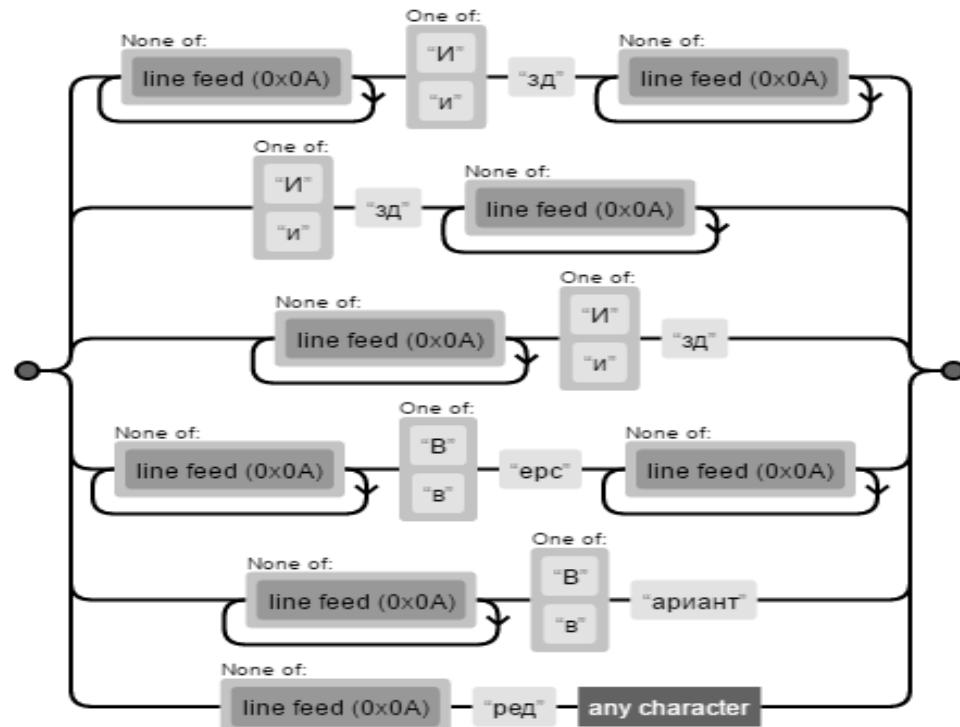


Рисунок 3 – Диаграмма выражения для идентификации области издания

[Бб]иблиог.:[\n]+|[0-9]+[\s]экз|Рез.:[\n]+|[^\n]+c.[\s][0-9]{1,5}[-][0-9]{1,5}.

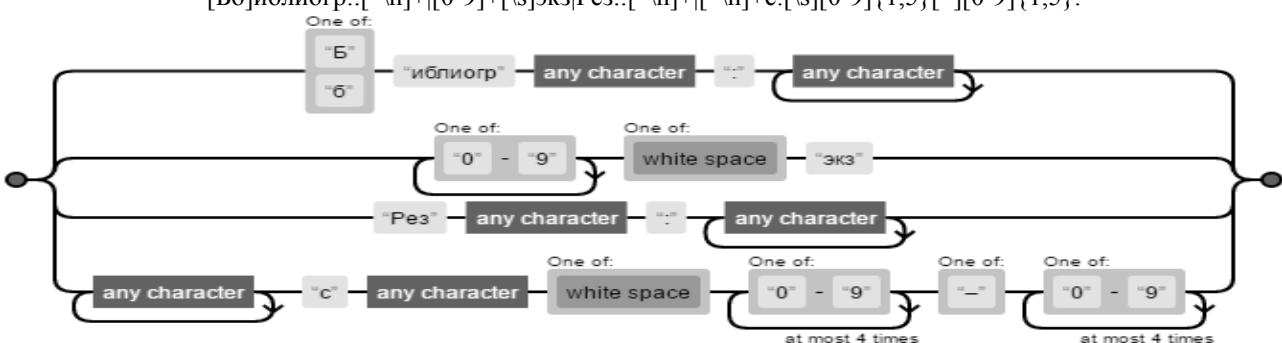


Рисунок 4 – Диаграмма выражения для идентификации примечания

Характерным признаком для области серии являются скобки, исходя из того что согласно ДСТУ, содержание серии приводится в скобках (диаграммы выражений далее не приводятся):

^\((.*))\$.

Вполне очевидно, что если область начинается с ISBN/ISSN или содержит словосочетания «Режим доступа», «URL», «http», то эта область является областью стандартного номера и условий доступности. Правило данной области выглядит следующим образом:

IS[SB]N[^\n]+|[^\n]+Режим
доступа:[^\n]+|[^\n]+http[^\n]+|[^\n]+URL[^\n]+

Область заглавия и сведений об ответственностих не нуждаются в идентификации, так как она всегда является началом библиографического описания, и является обязательной областью.

После того, как идентифицирован определенный набор областей, можно перейти к этапу исправления в областях. Правила для исправлений сформированы на основе анализа часто допускаемых ошибок при оформлении списка литературы в курсовых и дипломных работах. Для выполнения исправлений используются правила, хранящиеся в базе данных. Как уже было отмечено ранее, в базе данных составляются цепочки для исправления (или выдачи на них замечания) уже известных ошибок. Такая база данных называется базой знаний, так как содержит информацию о человеческом опыте и знаниях в некоторой предметной области.

Разрабатываемая система не является самообучающейся. Знания для такой системы формируются экспертом или инженером по знаниям, то есть человеком, который владеет знаниями об особенностях и требованиях составления списка литературы, и часто допускаемых ошибок на практике. Из этих знаний и формируются шаблоны для поиска и замены. Таким образом, необходимо составить правила для уже известных ошибок.

В сведениях об ответственности при наличии предписанного сокращения [и др.], должен быть указан только один автор, фамилии и инициалы всех остальных авторов опускаются. Для исправления таких случаев сформировано следующее правило для замены:

$([A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][a\text{-}я]+][,][\s]([A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][a\text{-}я]+)([,][\s])^*)+([\s][и\ dr\.\.]) \rightarrow \$1\$4$

Далее приведено нечеткое регулярное выражение для общего обозначения материала:

$\backslash((\{\sim1\}\text{Текст}\{\sim2\})(\text{Видеозапись}\|\text{Звукозапись}\|\text{Изоматериял}\|\text{Комплект}\|\text{Кинофильм}\|\text{Микроформа}\|\text{Мультимедиа}\|\text{Предмет}\|\text{Рукопись})\{\sim2\}(\text{Электронныйресурс}))$

Операторы нечеткого выражения $\{\sim1\}$ и $\{\sim2\}$ задают допустимое число ошибок – 1 и 2 соответственно, допустимое для захвата подстроки. Например, в качестве шаблона «Электронный ресурс» будут также захватываться «Электронный ресурс», «электронный ресурс», «Електронний ресурс»:

$([A\text{-}Яa\text{-}я][.][\s][.][\s][.][\s][1\text{-}2][0\text{-}9][0\text{-}9][0\text{-}9])|([A\text{-}Я][a\text{-}я]+[\s]:\s[A\text{-}Я]*[a\text{-}я]*[\s]*[\s][09]\{1,4\})|([\![Бб]\!].\s[\![Мм]\!].\s[\![\s]\!][.][\s][.][\s][1\text{-}2][0\text{-}9][0\text{-}9][0\text{-}9])|([\![A\text{-}Яa\text{-}я][.][\s][.][\s][A\text{-}Я][a\text{-}я]+[\s]:)\|([\![Бб]\!].\s[\![Ии]\!].\s[\![\s]\!])|([\![Бб]\!].\s[\![Мм]\!].\s[\![\s]\!][\![Бб]\!].\s[\![Ии]\!].\s[\![\s]\!])$

Если в области примечания следует указание страниц, при этом оно находится не в начале области, сокращение «с.» следует приводить с маленькой буквы:

$([^n\!]:[\s]\{0,1\})C.([\s]\{0\text{-}9\}\{1,4\}-[0\text{-}9]\{1,4\}) \rightarrow \$1c.\$2.$

Часто приводят несколько обозначений материала. Согласно ДСТУ необходимо общее обозначение материала приводится только один раз, и если их несколько, следует приводить наиболее общий:

$([(.*)])([\s]\{0,1\}[+]\{0,1\}[\s]\{0,1\})([(.*)]) \rightarrow \$1.$

В некоторых случаях потребуется выполнять исправления в несколько этапов из-за невозможности выполнить ряд исправляющих действий одним правилом. Например, если в области заглавия приводят несколько авторов, что не допускает стандарт. В этом случае необходимо выполнить всех приводимых авторов, кроме первого, в сведения об ответственности:

$([A\text{-}Я][a\text{-}я]+[\s][A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][.][\s](((.][\s]\{0,1\}[A\text{-}Я][a\text{-}я]+[\s][A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][.])+([\s][A\text{-}Я][^\n]+?) [\s]\{0,1\}((\backslash\{2\})[.][\s][-]) \rightarrow \$1\$5 / \$1, \$2 \$6.$

Также следует учесть, что в сведениях об ответственности инициалы идут в обратном порядке:

$([/][\s][.][\s])+([A\text{-}Я][a\text{-}я]+)[\s]([A\text{-}Я][.][\s][A\text{-}Я][.][\s]([\s][(\backslash\{2\})\{0,1\}) \rightarrow \$1\$3 \$2\$5.$

Бабенко Л. П. Метод нормализации знаний об инфраструктуре разработки программ / Поляничко С. Л., Мясников В. Н. // Кибернетика и системный анализ. — 2006. — № 1. — 167-174 с.

Бабенко Л. П. Метод нормализации знаний об инфраструктуре разработки программ / С. Л. Поляничко, В. Н. Мясников // Кибернетика и системный анализ. — 2006. — № 1. — 167-174 с.

Рисунок 5 – Перенос инициалов в области сведений об ответственности

Таким образом, создавая правила для исправлений с помощью регулярных выражений, можно выполнить любые исправления в оформлении элементов областей и даже переносить элементы в другую область. Так как исправления по правилам будут выполняться последовательно, большое внимание необходимо уделить порядку построению правил, которое должно соответствовать порядку их выполнения.

В качестве механизма проверки правильности следования областей и присутствия обязательных областей мы используем модель конечного автомата. В библиографическом описании мы имеем 8 областей, которые идут в строго установленной последовательности:

S1 – Область заглавия и сведений об ответственности;

S2 – Область издания;

S3 – Область специфических сведений;

S4 – Область выходных данных;

S5 – Область физической характеристики;

S6 – Область серии;

S7 – Область примечания;

S8 – Область стандартного номера и условий доступности.

В итоге мы имеем 8 состояний, из них 3 являются обязательными практически для всех видов документов – «Область заглавия (S1)», «Область выходных данных (S4)», «Область физической характеристики (S5)». Таким образом, можно допустить цепочку (набор областей в библиографическом описании) при достижении состояния S5. Модель конечного автомата в виде графа изображена на рисунке:

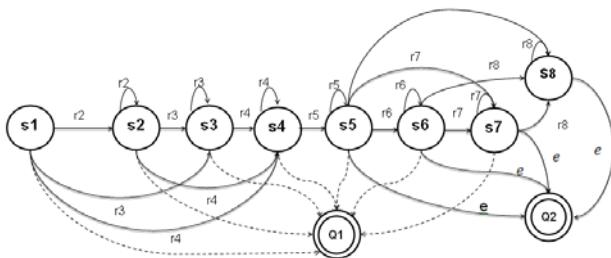


Рисунок 6 – Конечный автомат проверки в виде графа

На основе представленного графа получаем таблицу переходов данного конечного автомата. Строки соответствуют текущему состоянию, столбцы – выражению для перехода. На их пересечении – новое состояние, в которое попадает конечный автомат при соответствующем текущем состоянии и входному выражению.

Таблица 1 – Таблица переходов конечного автомата проверки

	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	E
S1	S2	S3	S4	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1
S2	S2	S3	S4	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1
S3	Q1	S3	S4	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1
S4	Q1	Q1	S4	S5	Q1	Q1	Q1	Q1
S5	Q1	Q1	Q1	S5	S6	S7	S8	Q2
S6	Q1	Q1	Q1	Q1	S6	S7	S8	Q2
S7	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	S7	S8	Q2
S8	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	Q1	S8	Q2

Таким образом, модель конечного автомата реализует последовательную проверку областей с помощью регулярных выражений. В данном конечном автомате обязательными областями являются состояния S1, S4 и S5. Остальные области могут являться обязательными только при наличии таких сведений в предписанных источниках информации.

При допустимом порядке и наборе областей конечный автомат попадает в терминальное состояние Q2, которое говорит о том, что цепочка допущена автоматом. В противном случае, мы попадаем в терминальное состояние Q1, которое не допускает заданную последовательность.

Для выполнения орфографических исправлений в названиях городов поиска будем использовать нейросеть Хемминга. На вход системы подается слово S, которое будем искать, и таблица базы данных со списком названий t, в которой будем осуществлять поиск.

На выходе получаем – номер n(t, S) слова в списке t, которое наиболее близко к исходному слову S.

```
'Ф' "00001" 'с' "01000" 'л' "10110"
'ы' "00011" 'а' "01001" 'щ' "10111"
...
```

Рисунок 7 – Коды символов

Входное слово из букв русского алфавита преобразуется в слово в алфавите 01, которое затем подается на вход нейронной сети, т.е. каждой букве в соответствии ставится слово из символов 0 и 1 длины 5. Кодирование строится таким образом, чтобы стоящие рядом на компьютерной клавиатуре символы имели близкие по Хеммингу коды. Таким образом, должно достигаться наиболее эффективное исправление ошибок.

тест	выход
Акмьлу	Акмола
Алмуты	Алматы
Архунгельск	Архангельск
...	...
Тъльяtti	Тольятти
Ткlu	Тула
Черкуссы	Черкассы
Ярьслувль	Ярославль

Рисунок 8 – Пример исправлений

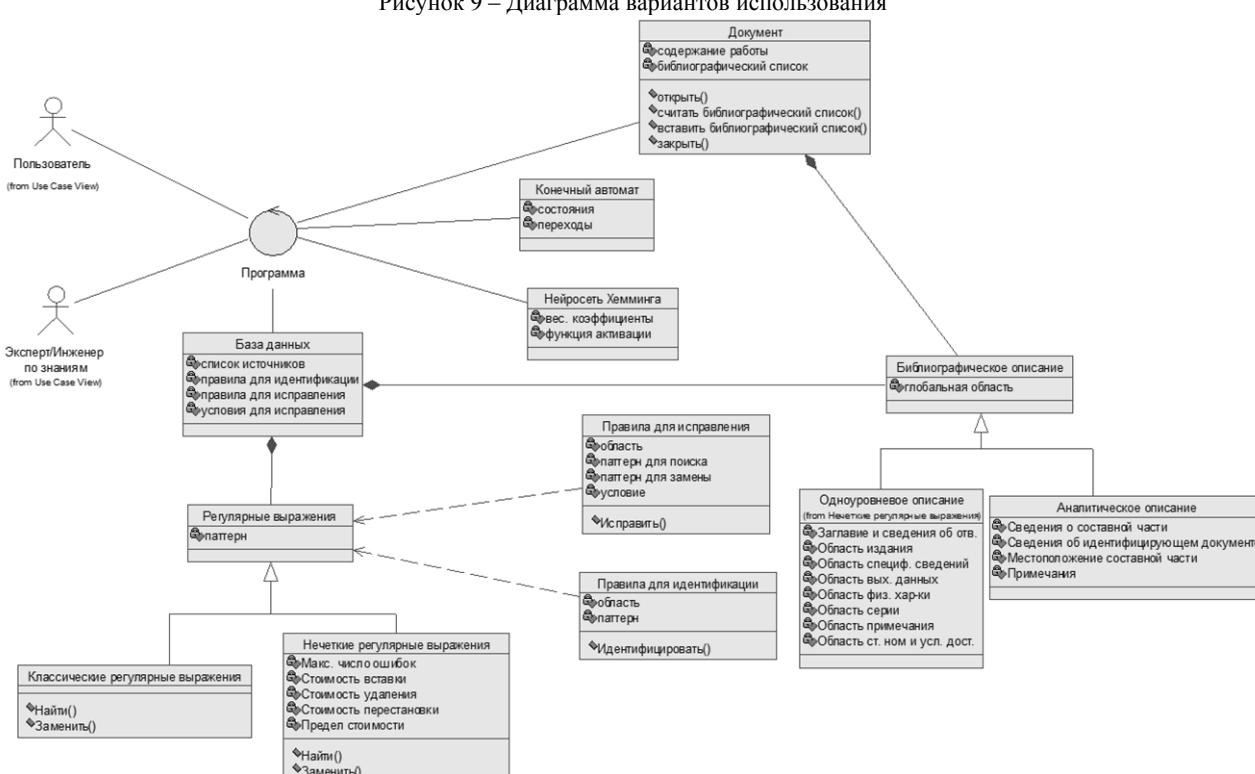
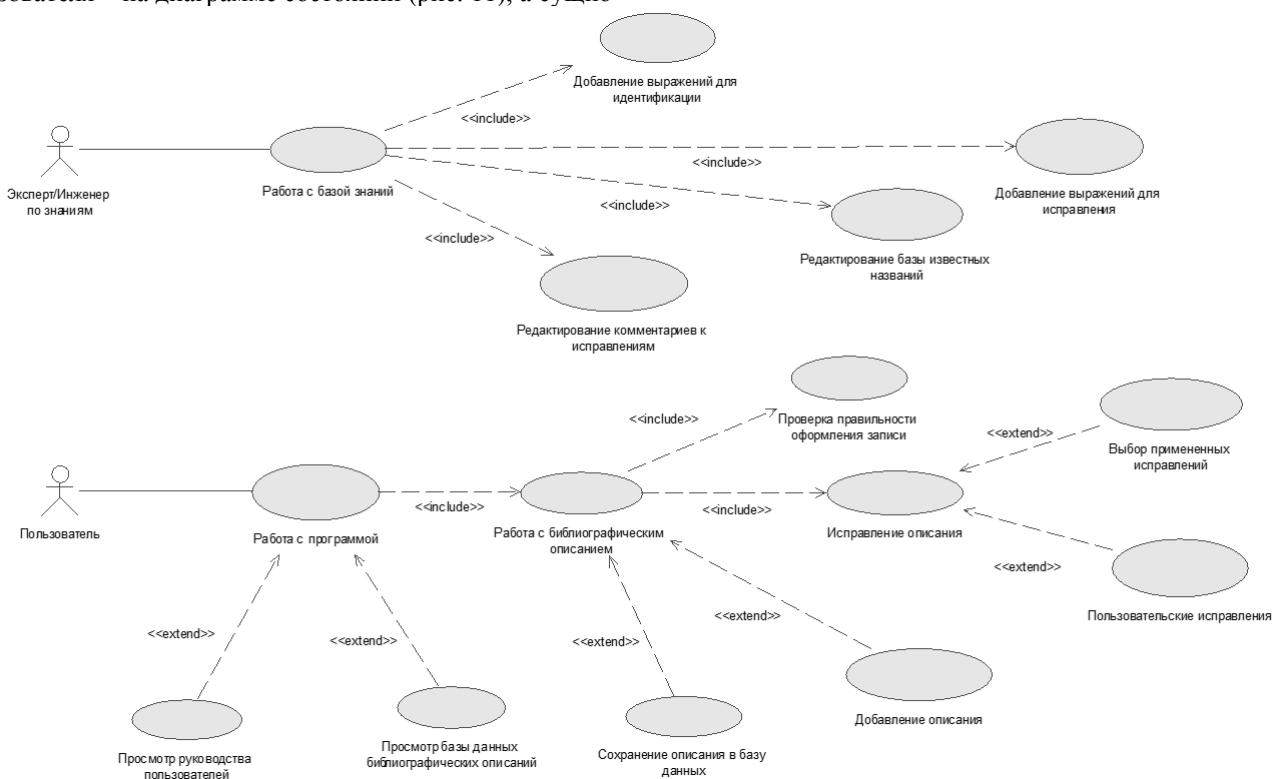
Информационная модель системы создавалась на унифицированном языке моделирования UML (Unified Modeling Language). Визуальное моделирование с помощью UML представляет собой поэтапный спуск от наиболее общей концептуальной модели системы к логической, а затем и к физической модели, причем модель представляет собой совокупность так называемых диаграмм [14].

Возможности системы представлены на диаграмме вариантов использования (use case diagram, диаграмма прецедентов), которая отображает концептуальную модель системы (рис. 9).

Программа предполагает два режима работы – работу с базой знаний и работу с программой (обычный режим работы). При работе с базой знаний предполагается, что в качестве пользователя будет выступать эксперт в данной предметной области или инженер по знаниям. Работа с базой знаний включает в себя добавление ключей для идентификации, с помощью которых будут идентифицироваться области, и добавление ключей для исправления, которые представляют собой правила для поиска и замены фрагментов в нужных областях библиографического описания.

Структура системи показана на диаграмме классов (рис. 10), типовая последовательность действий пользователя – на диаграмме состояний (рис. 11), а сущно-

сти программной системы – на диаграмме компонентов (рис. 12).



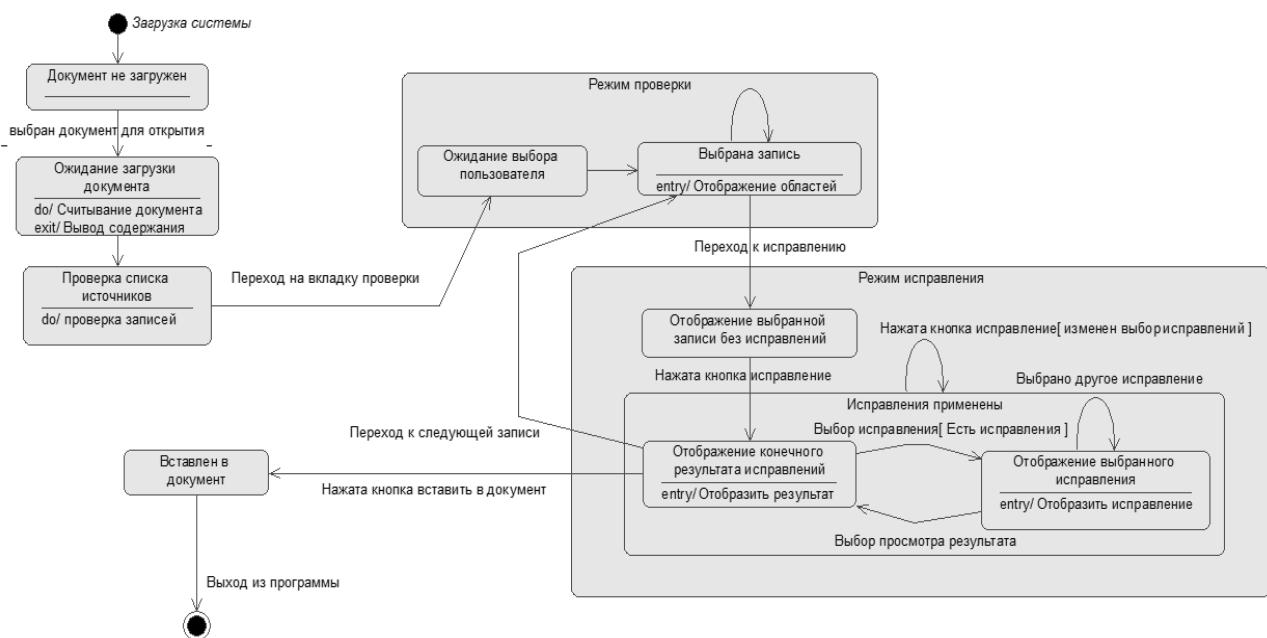


Рисунок 11 – Діаграмма состоянь

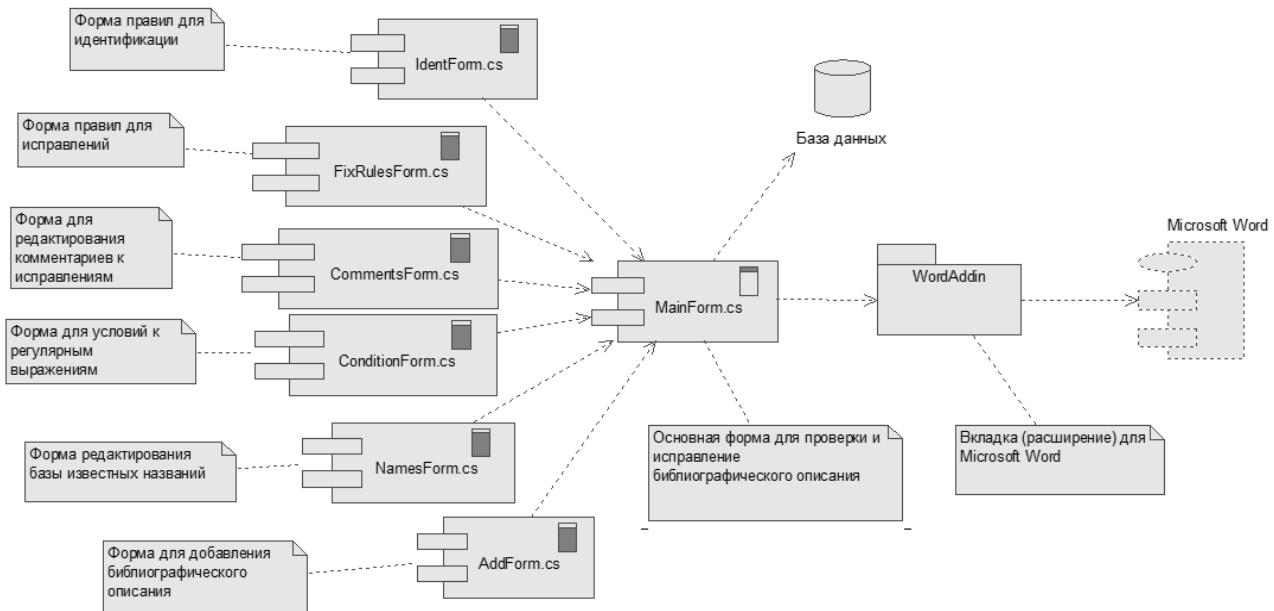


Рисунок 12 – Діаграмма компонентів

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Розробленна інформаційна модель інтелектуальної системи для аналізу бібліографічного опису була реалізована в середовищі візуального програмування Visual Studio 2017 C# на платформі Microsoft .NET Framework [15-18].

Для реалізації програмної системи використовуються такі вбудовані компоненти, як Regex – бібліотека регулярних виражень, яка містить методи Match, IsMatch та Replace.

Для роботи з документами пакета Microsoft Office використовується зовнішній пакет Interop.Office. Цей пакет включений в .NET Framework CLR (Common

Language Runtime) і включає в себе використання COM (Component Object Model) для взаємодействия з об'єктами .NET, в даному випадку з об'єктами приложения Office.Application та Office.Document.

Для роботи з базою даних використовується вбудований компонент OLE DB, який постачається платформою .NET Framework, і також використовує об'єктну модель компонентів COM.

Для реалізації нечіткого пошуку та нечітких регулярних виражень використовується пакет TRE. Цей пакет є реалізацією нечітких регулярних виражень на мові C, яка використовує метрики розташування Левенштейна.

Внешний вид программы состоит из пяти вкладок, которые включают разные этапы проверки и исправления списка литературных источников:

– Содержание – при работе здесь видно все загруженное в программу содержание области списка литературы;

– Проверка – здесь можно будет проверить список литературы в целом, при этом выделив нужное описание, и просмотреть его области;

– Исправление ошибок – здесь осуществляется исправление библиографического описания, которое было предварительно выбрано на вкладке проверки;

– Управление списком – здесь формируется список всех имеющихся (загруженных в программу) источников для обратной вставки в документ;

– База данных – взаимодействие с базой данных, то есть загрузка и сохранение библиографических описаний.

Для формирования базы знаний регулярных выражений выбрано хранилище в виде реляционной базы данных Microsoft Access. Структура разрабатываемой базы данных выглядит следующим образом:

– main – главная таблица, в которой предполагается хранение списка библиографии;

– ident – таблица, содержащая регулярные выражения для идентификации областей;

– rules – таблица, содержащая регулярные выражения в виде правил для исправлений (замены) фрагментов описания, как в целом, так и отдельных его областей;

– conditions – таблица, содержащая условия, необходимые для выполнения исправлений из набора правил rules;

– comments – таблица, содержащая комментарии, которые будут использоваться подсистемой объяснений при выполнении исправлений (замен) из набора правил rules.

Имея построенные правила для идентификации, сформируем базу знаний, добавляя для каждой области соответствующее регулярное выражение для идентификации. Для одной области может быть несколько

выражений идентификации. Окно редактора выражений для идентификации представлено на рис. 13.

Аналогичным образом формируются правила для исправлений, как показано на рис. 14.

Для сформированных правил необходимы комментарии, которые будут выводиться пользователю при наличии исправлений.

Для случаев, когда какие-либо фрагменты библиографического описания исправить невозможно, предусмотрена подсистема замечаний, которая вместо осуществления исправления выведет определенное замечание, и по возможности выделит фрагмент, к которому оно относится.

После того, как сформирована база знаний, можно перейти к работе программы в обычном режиме. Необходимо выбрать проверяемый документ, после чего он будет загружен в программу и отобразится во вкладке «Содержание». Перейдя на вкладку проверки, можно видеть, какие библиографические описания нуждаются в исправлениях. Зеленым цветом помечены описания, которые не нуждаются в исправлениях. Желтым цветом – описания, в котором предлагается не более одного исправления. Красным цветом подсвечены описания, для которых предлагается более одного исправления.

В случае аналитического библиографического описания разделы областей делятся на составную часть и идентифицирующий документ (рис. 15).

После нажатия кнопки «Исправить» в нижней таблице появится список выполненных исправлений с объяснениями к исправлениям, если они имеются в базе знаний. Номер исправления соответствует номеру правила, которое выполнило это исправление (рис. 16).

На вкладке исправления ошибок также предусмотрена возможность редактирования. Есть возможность отредактировать сам список, который показывается в верхней части программы, после чего программа просит подтверждение выполненных изменений. Кроме этого, предусмотрена возможность редактировать содержимое прямо в таблице. Для перехода в режим редактирования в таблице необходимо нажать кнопку «Редактировать».

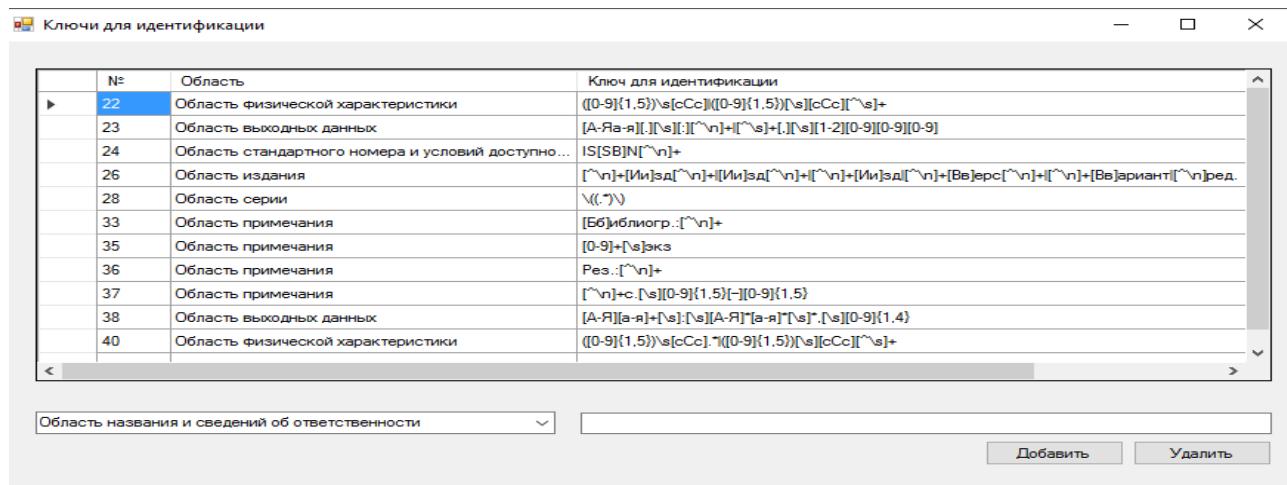


Рисунок 13 – Окно редактора регулярных выражений для идентификации областей

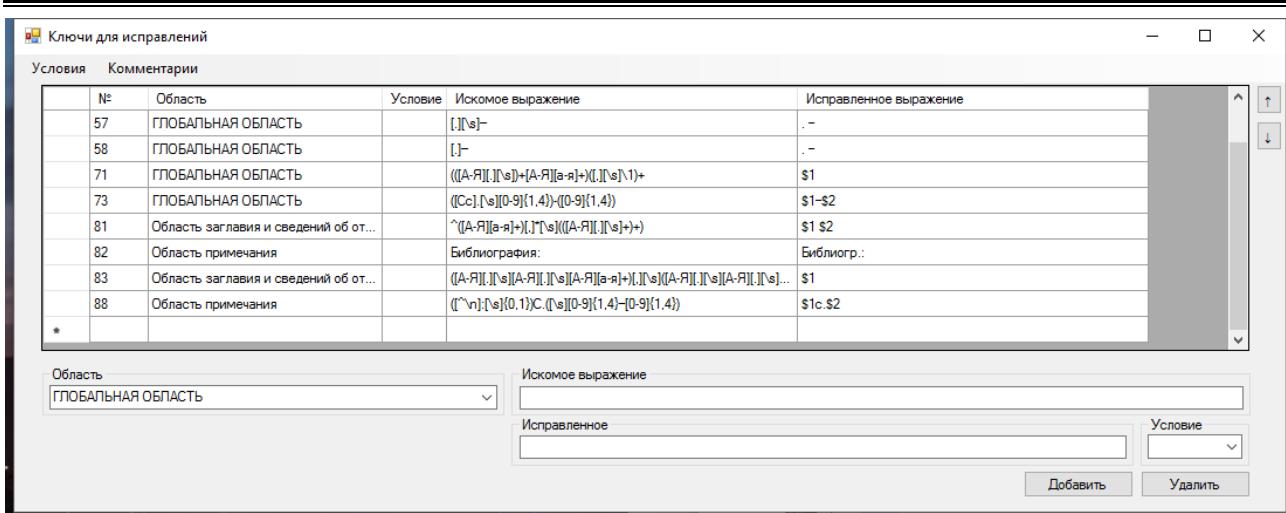


Рисунок 14 – Окно редактора с регулярными выражениями для исправлений

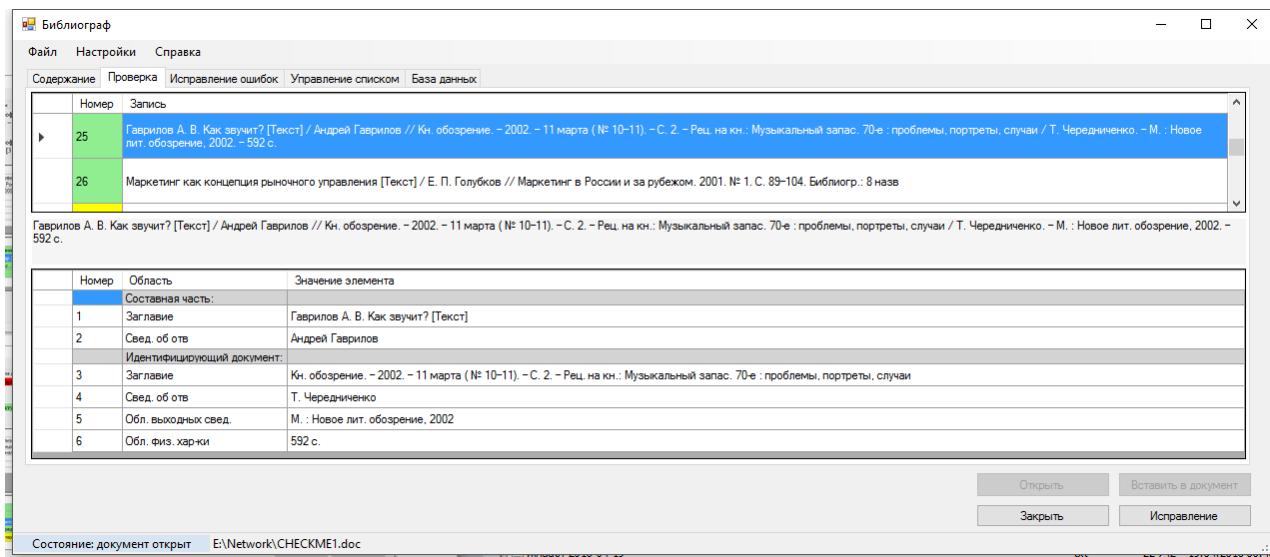


Рисунок 15 – Раздел проверки списка литературных источников

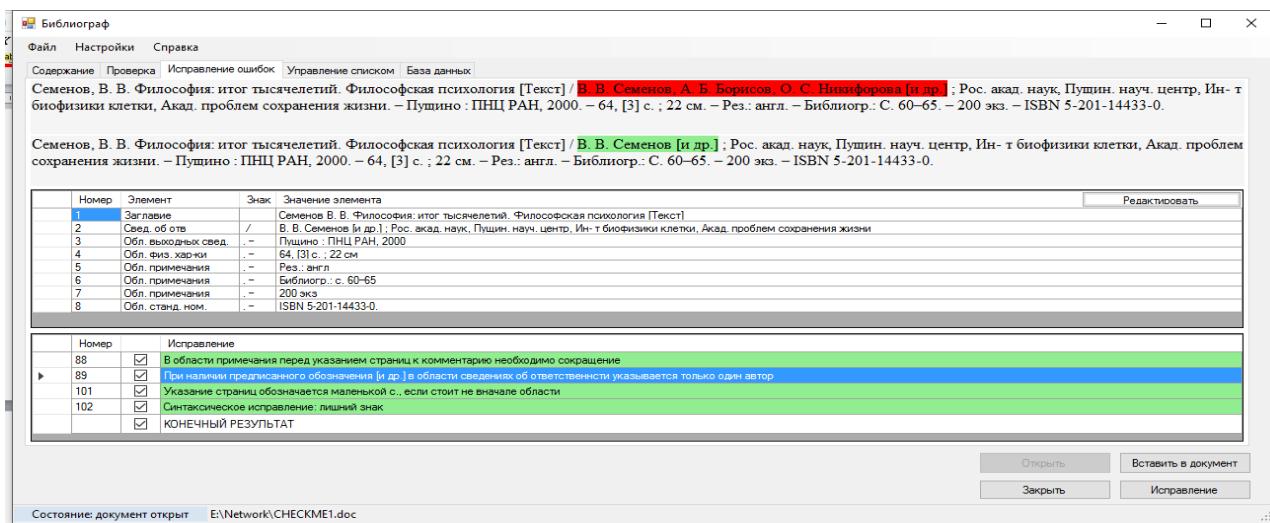


Рисунок 16 – Раздел исправления ошибок библиографического описания

В разделе «База данных» можно найти библиографическое описание по ключевым словам, а так же сохранить уже имеющиеся исправленные варианты библиографических описаний

После того как библиографические описания проверены и исправлены, их можно вставить обратно в документ. Для этого следует перейти в раздел «Управление списком». В этом разделе отобразятся готовые к вставке записи библиографических описаний. Выделив нужные (по умолчанию выделены все), нажать кнопку вставить, сформированный список вставится обратно в документ.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Были изучены требования к составлению библиографического описания, проанализированы существующие методы формирования списка литературных источников, выявлены их недостатки, обоснована необходимость создания программного средства для проверки библиографических описаний. Проведено исследование методов интеллектуального анализа, рассмотрены методы регулярных выражений, нечеткого поиска с применением нечетких регулярных выражений, конечного автомата и нейронной сети Хемминга.

В процессе проектирования информационной системы составлена модель в виде UML-диаграмм, которая описывает варианты использования системы, классы и объекты, с которыми работает система, ее основные состояния и алгоритм действий при выполнении исправления.

ВЫВОДЫ

Разработанная интеллектуальная система позволяет выявить и исправить ошибки оформления библиографического описания. Основой программы является база знаний, которую можно дополнить при наличии каких-либо непредусмотренных ситуаций. Кроме этого, данная система дает возможность накапливать базу данных уже проверенными списками литературы.

Таким образом, разработанную систему можно улучшать без вмешательства в исходный код программы. При этом уровень ее возможностей и правильности исправлений, выдачи замечаний напрямую зависит от полноты и правильности составленной базы знаний.

Научная новизна заключается в создании ранее несуществующей модели проверки библиографического описания на соответствие действующим стандартам библиографического описания, основанной на методах регулярных выражений, нечеткого поиска, конечного автомата и нейронной сети Хемминга.

Практическая ценность заключается в разработки интеллектуальной для проверки библиографического описания и частично автоматизированного исправления с пользовательскими указаниями, сформированными на основе базы знаний.

К перспективам дальнейших исследований можно отнести использование других стилей оформления списка литературы, отличных от ДСТУ 7.1:2006, таких, как IEEE.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Стрельникова А. Г. Дипломная работа: подготовка и оформление : пособие для студентов / А. Г. Стрельникова. – СПб. : СпецЛит, 2010. – 96 с.
- Научные работы : методика подготовки и оформления / [сост. И. Н. Кузнецов]. – Минск : Амалфея, 1998. – 272 с.
- Система стандартів з інформації та видавничої справи. Бібліографічний запис. Бібліографічний опис. Загальні вимоги та правила складання : ДСТУ ГОСТ 7.1:2006. – [Чинний від 2007-07-01]. – К. : Держспоживстандарт України, 2007. – 52 с. – (Національний стандарт України).
- Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления : ГОСТ 7.1-2003. – Взамен ГОСТ 7.1-84. – [Введен 01.07.2004]. – М. : Изд-во стандартов, 2004. – 47 с. – (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
- Калинина Г. П. Комментарии к ГОСТу 7.1-2003 / Г. П. Калинина // Библиография. – 2004. – № 4. – С. 65–66.
- Бахтурина Т. А. Новый стандарт по библиографическому описанию: к внедрению ГОСТ 7.1-2003 / Т. А. Бахтурина // Библиография. – 2004. – № 1. – С. 23–26.
- Добавление ссылки и создание списка литературы [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://support.office.com/ru-ru/article/Добавление-ссылки-и-создание-списка-литературы>
- Автоматичне оформлення джерел по ВАК України [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vak.in.ua/>
- Фридл Дж. Регулярные выражения : пер. с англ. / Дж. Фридл. – 3-е изд. – СПб. : Символ-Плюс, 2008. – 608 с.
- Форта Бен. Освой самостоятельно регулярные выражения : пер. с англ. / Бен Форта. – М. : Вильямс, 2005. – 184 с.
- Мосалев П. М. Обзор методов нечеткого поиска текстовой информации [Электронный ресурс] / П. М. Мосалев. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-nechetkogo-poiska-tekstovoy-informatsii>
- Харитоненков А. В. Поиск на неточное соответствие: коды Хемминга [Электронный ресурс] / А. В. Харитоненков, Л. П. Вершинина. – Режим доступа: <http://www.jurnal.org/articles/2009/inf32.htm>
- Белевцов Л. В. Введение в дискретную математику : учебное пособие / Л. В. Белевцов, Е. Ю. Гудкова. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 144 с.
- Мельников А. Ю. Объектно-ориентированный анализ и проектирование информационных систем : учебное пособие / А. Ю. Мельников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 172 с.
- Марченко А. Л. Введение в программирование C# / А. Л. Марченко. – М. : МГУ, 2005. – 216 с.
- Стиллмен Э. Изучаем C# / Э. Стиллмен, Дж. Грин. – СПб. : Питер, 2012. – 256 с.
- Гуннерсон Э. Введение в C# : Библиотека программиста / Э. Гуннерсон. – СПб., М., Харьков, Минск : Питер, 2001. – 304 с.

18. Шилдт Г. С# 4.0. Полное руководство / Г. Шилдт. – М. : Вильямс, 2011. – 1056 с.
19. Комисаров К. М. Разработка системы проверки правильности оформления списка литературных источников в курсовых и дипломных работах / К. М. Комисаров, А. Ю. Мельников // Молодежь в науке: Новые аргументы: Сборник научных работ III-го Международного молодежного конкурса (Россия, г. Липецк, 29 февраля 2016 г.). Часть II / Отв. ред. А. В. Горбенко. – Липецк : Научное партнерство «Аргумент», 2016. – С. 75–80.
20. Мельников А.Ю. Разработка системы проверки списка литературных источников на основе базы знаний в виде правил на языке регулярных выражений / А. Ю. Мельников, К. М. Комисаров // Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку : Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції. – Черкаси, 2017. – С. 208–210.

Received 27.05.2018.

Accepted 11.06.2018.

УДК 004.4:004.89:006.72

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ОПИСІВ ТА РОЗРОБКА ПРОГРАМНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ СПИСКУ ЛІТЕРАТУРИ

Мельников О. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інтелектуальних систем прийняття рішень, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна.

Комісаров К. М. – магістрант спеціальності «Системний аналіз», Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто завдання аналізу бібліографічного списку з метою автоматизації перевірки правильності його складання. Об'єктом дослідження був процес формування бібліографічних описів на основі діючих стандартів. Предмет дослідження – моделі й методи інтелектуального аналізу для перевірки й виправлень бібліографічного опису. Ціль роботи – підвищення ефективності науково-педагогічної діяльності за рахунок застосування інтелектуальної системи для перевірки списку літературних джерел у курсових і дипломних роботах студентів.

Метод. Проаналізовано стандарт і наведено елементи, що становлять бібліографічний опис. Розглянуто існуючі інструменти для формування й перевірки списку літературних джерел, виявлені їхні недоліки, обґрунтована необхідність створення програмного засобу для перевірки бібліографічних описів. Наведено дослідження методів інтелектуального аналізу: розглянуті методи регулярних виражень, нечіткого пошуку із застосуванням нечітких регулярних виражень, кінцевого автомата й нейронної мережі Хемінга. Створено раніше не існуюча модель перевірки бібліографічного опису на відповідність діючим стандартам, заснована на методах регулярних виражень, нечіткого пошуку, кінцевого автомата й нейронної мережі Хемінга. Представлено об'єктно-орієнтовану модель проектованої комп’ютерної системи мовою візуального моделювання UML. Описано роботу комп’ютерної реалізації програмної системи, здійсненої в середовищі візуального програмування C#.

Результати. Розроблено програмну систему – інтелектуальну систему прийняття рішень – для перевірки бібліографічного опису й частково автоматизованого виправлення з користувальничьими вказівками, сформованими на основі бази знань.

Висновки. Розроблена інтелектуальна система дозволяє виявити й виправити помилки оформлення бібліографічного опису. Основою програми є база знань, яку можна доповнити при наявності яких-небудь непередбачуваних ситуацій. Крім цього, дана система дає можливість накопичувати базу даних вже перевіреними списками літератури. Розроблену систему можна поліпшувати без втручання у код програми. При цьому рівень її можливостей і правильності виправлень, видачі зауважень прямо залежить від повноти й правильності складеної бази знань. До перспектив подальших досліджень можна віднести використання інших стилів оформлення списку літератури, відмінних від ДСТУ 7.1:2006, таких, як IEEE.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: бібліографічний список, бібліографічний опис, ДСТУ 7.1:2006, ISBD, регулярні вираження, нечіткий пошук, відстань редактування, нечіткі регулярні вираження, кінцевий автомат, нейросеть Хемінга, Unified Modeling Language, C#, WorldAddIn.

UDC 004.4:004.89:006.72

INVESTIGATION OF METHODS OF INTELLECTUAL ANALYSIS OF BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTIONS AND DEVELOPMENT OF PROGRAM SYSTEM FOR ANALYSIS OF LITERATURE LIST

Melnykov O. Y. – PhD, Department of Intelligence Systems of Decision Making, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine.

Komissarov K. M. – Student, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of analyzing a bibliographic list is examined with the purpose of automating the verification of the correctness of its compilation. The object of the study was the process of creating bibliographic descriptions based on existing standards. The subject of the study is models and methods of intellectual analysis for checking and correcting bibliographic descriptions.

Objective. The goal of the work is to increase the effectiveness of scientific and pedagogical activity through the use of an intellectual system to check the list of literary sources in the students' course and diploma papers.

Method. The standard is analyzed and the elements composing the bibliographic description are listed. Existing tools for forming and checking the list of literature sources are considered, their shortcomings are revealed, the necessity of creating a software tool for checking bibliographic descriptions is grounded. The research of methods of intellectual analysis is given: methods of regular expressions, fuzzy search with application of fuzzy regular expressions, finite automaton and neural network of Hamming are considered. A

previously existing model for checking the bibliographic description for compliance with existing standards was created, based on the methods of regular expressions, fuzzy search, the finite automaton and the neural network of Hamming. An object-oriented model of the projected computer system in the language of visual modeling of UML is presented. The work of computer implementation of the software system implemented in the C # visual programming environment is described.

Results. A software system was developed – an intelligent decision-making system – to check the bibliographic description and partially automated correction with user instructions generated based on the knowledge base.

Conclusions. The developed intellectual system allows to reveal and correct mistakes of registration of the bibliographic description. The basis of the program is the knowledge base, which can be supplemented if there are any unforeseen situations. In addition, this system makes it possible to accumulate a database of already verified lists of literature. The developed system can be improved without interfering with the source code of the program. At the same time, the level of its capabilities and correctness of corrections, the issuance of comments directly depends on the completeness and correctness of the compiled knowledge base. The prospects for further research include the use of other styles for the design of a list of literature other than DSTU 7.1: 2006, such as the IEEE.

KEYWORDS: bibliographic list, DSTU 7.1: 2006, ISBD, regular expressions, fuzzy search, editing distance, fuzzy regular expressions, finite state machine, Hamming neural network, Unified Modeling Language, C #, WorldAddIn.

REFERENCES

1. Strel'nikova A. G. Diplomnaja rabota: podgotovka i oformlenie, posobie dlja studentov. Sankt-Peterburg, SpecLit, 2010, 96 p.
2. Nauchnye raboty : metodika podgotovki i oformlenija [sost. I. N. Kuznecov]. Minsk, Amalfeja, 1998, 272 p.
3. DSTU GOST 7.1:2006. Sistema standartiv z informacijí ta vidavnichoї spravi. Bibliografichnj zapis. Bibliografichnj opis. Zagal'ni vimogi ta pravila skladannja. Vved. 2007-07-01. Kyiv, Derzhspozhivstandart Ukrainsi, 2007, 52 p.
4. Bibliograficheskaja zapis'. Bibliograficheskoe opisanie. Obshchie trebovaniya i pravila sostavlenija, GOST 7.1–2003. – Vzamen GOST 7.1–84 ; vved. 01.07.2004. Moscow, Izd-vo standartov, 2004, 47 p.
5. Kalinina G. P. Kommentarii k GOSTu 7.1–2003, *Bibliografija*, 2004, No. 4, pp. 65–66.
6. Bahturina T. A. Novyj standart po bibliograficheskому opisaniju: k vnedreniju GOST 7.1–2003, *Bibliografija*, 2004, No. 1, pp. 23–26.
7. Dobavlenie ssylki i sozdanie spiska literatury [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <https://support.office.com/ru-ru/article/Dobavlenie-ssylki-i-sozdanie-spiska-literatury>
8. Avtomatichne oformlennja dzerel po VAK Ukrainsi [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://vak.in.ua/>
9. Fridl Dzh. Reguljarnye vyrazhenija : per. s angl. 3-e izd., Sankt-Peterburg, Simvol-Pljus, 2008, 608 p.
10. Forta Ben. Osvoy samostojatel'no reguljarnye vyrazhenija : per. s angl. Moscow, Vil'jams, 2005, 184 p.
11. Mosalev P. M. Obzor metodov nechetkogo poiska tekstovoy informacii [Jelektronnyj resurs]// Rezhim dostupa: <https://cyberleninka.ru/article/n/obzor-metodov-nechetkogo-poiska-tekstovoy-informatsii>
12. Haritonenkov A. V., Vershinina L. P. Poisk na netochnoe sootvetstvie: kody Hemminga [Jelektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.jurnal.org/articles/2009/inf32.htm>
13. Belevcov L. V., Gudkova E. Ju. Vvedenie v diskretnuju matematiku: uchebnoe posobie. Kramatorsk, DGMA, 2013, 144 p.
14. Mel'nikov A. Ju. Ob#ektno-orientirovannyj analiz i proektruvanije informacionnyh sistem: uchebnoe posobie. 2-e izd., pererab. i dop. Kramatorsk, DGMA, 2013, 172 p.
15. Marchenko A. L. Vvedenie v programmirovanie C#. Moscow, MGU, 2005, 216 p.
16. Stillmen Je., Grin Dzh Izuchaem C#. Sankt-Peterburg, Piter, 2012, 256 p.
17. Gunnerson Je. Vvedenie v C# : Biblioteka programmista / Je. Gunnerson. Sankt-Peterburg, Moscow, Har'kov, Minsk, Piter, 2001, 304 p.
18. Shildt G. S# 4.0. Polnoe rukovodstvo. Moscow, Vil'jams, 2011, 1056 p.
19. Komissarov K. M., Mel'nikov A. Y. Razrabotka sistemy proverki pravil'nosti oformlenija spiska literaturnyh istochnikov v kursovyh i diplomnyh rabotah, *Molodezh' v nauke: Novye argumenty: Sbornik nauchnyh rabot III-go Mezhdunarodnogo molodezhnogo konkursa (Rossija, g. Lipeck, 29 fevralja 2016 g.)*. Chast' II. Otv. red. A. V. Gorbenko. Lipeck, Nauchnoe partnerstvo «Argument», 2016. – S. 75–80.
20. Mel'nikov A. Ju., Komissarov K. M. Razrabotka sistemy proverki spiska literaturnyh istochnikov na osnove bazy znanij v vide pravil na jazyke reguljarnyh vyrazhenij, *Avtomatizacija ta kompjuterno-integrovani tehnologii u virobnictvi ta osviti: stan, dosjagnennja, perspektivi rozvituksu : materiali Vseukraïns'koї naukovo-praktichnoї Internet-konferencii*. Cherkasi, 2017, pp. 208–210.

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.412.3

МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПОКАЗНИКІВ ОЦІНКИ ПРОЕКТУ ПРИ ВИКОНАННІ РЕІНЖИНІРІНГУ ПРОГРАМНИХ СИСТЕМ

Великодний С. С. – канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій Одеської національної академії зв’язку ім. О. С. Попова; доцент кафедри інформаційних технологій Одеського державного екологічного університету, Одеса, Україна.

Тимофесєва О. С. – аспірант кафедри інформаційних технологій Одеського державного екологічного університету, Одеса, Україна.

Зайцева-Великодна С. С. – технік лабораторії інформатики та чисельних методів Одеського державного екологічного університету, Одеса, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Програмні системи настільки щільно увійшли до нашого життя, що неможливо уявити собі існування та розвиток людства без них. Але під впливом чинників технічної еволюції відбувається старіння програмних систем із погіршенням їх характеристик. Тут у пригоді стає докорінна переробка із наслідуванням позитивних якостей програмної системи та відділенням негативних, тобто реінжинірингу. Подібні процеси, що починаються з перепроектування, вимагають обов’язкової аналітичної оцінки показників проекту, адже існують випадки, коли реінжиніринг нерентабельний стосовно конкретної програмної системи. У статті розглянуто комплексний інструмент оцінки програмного проекту, що прогнозує працемісткість перепрограмування об’єктів, у сполученні із іншими показниками проектів, які визначають складність реінжинірингу програмних систем.

Мета. Сформувати метод, за яким можна оцінити показники реінжинірингу програмних систем за допомогою комплексного інструментарію оцінки програмного проекту.

Метод. Описана у статті технологія заснована на використанні методу точок Карнера із внесенням суттєвих доповнень та розширень. Встановлення коефіцієнтів та обрання значення констант засновані на методі Якобсона та перевірені на багаточисельній статистиці найбільш схожих проектів.

Результати. Після аналізу завершеного проекту і вивчення звіту про показники, доступні чинники можуть бути точно відкориговані, щоб дати оцінку фактичним годинам реінжинірингу. Згодом, можна використовувати ці дані у якості базової траекторії життєвого циклу проекту. На підставі розрахованих показників оцінювання формується звіт, що містить аналіз оцінки програмного проекту, для включення у вихідну проектну документацію, яка є частиною організаційного забезпечення систем автоматизованого проектування програмних систем.

Висновки. Отримав подальший розвиток метод розрахунку проектних точок Карнера із внесенням суттєвих доповнень та розширень щодо процесів реінжинірингу програмних систем. Кожна змінна визначається та обчислюється окремо із використанням вимірювань, вагових коефіцієнтів та обмежуючих констант. Вимірювання виконуються командою досвідчених системних аналітиків, що спираються на власні уявлення про технічну складність проекту та можливості команди програмістів. Коефіцієнти та константи приймаються, виходячи із статистичних даних 3 – 5 вже оцінених аналітиками виконаних проектів із близьким ступенем схожості.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: програмна система, проект, реінжиніринг, метод проектних точок, показник, оцінка, варіант використання, чинник, ваговий коефіцієнт, обмежуюча константа.

АБРЕВІАТУРИ

DHR – Default Hourly Rate;
DR – Duration;
EC – ECF Constant;
ECF – Environment Complexity Factor;

EWE – Estimated Work Effort;

TC – TCF Constant;

RTF – Rich Text Files

TCF – Technical Complexity Factor;

TWF – TCF Weight Factor;

UCP – Use Case Point;
UEV – Unadjusted ECF Value;
UML – Unified Modeling Language;
UTV – Unadjusted TCF Value;
UUCP – Unadjusted Use Case Points
ВВ – варіант використання;
ДО – діюча особа;
ООП – об'єктно-орієнтоване програмування;
ПС – програмна система;
САПР – система автоматизації проектувальних робіт.

НОМЕНКЛАТУРА

k_i – кількісне значення впливу кожного з 13-ти показників технічної складності проекту;

m_i – кількісне значення наявності кожного з 8-ми показників кваліфікації персоналу;

V_i – ваговий коефіцієнт кожного з 13-ти показників технічної складності проекту;

W_i – ваговий коефіцієнт кожного з 8-ми показників кваліфікації персоналу.

ВСТУП

Головною метою, що ставиться перед САПР, є скорочення собівартості розробки об'єкта проектування, який, до речі, може бути будь-якого галузевого призначення. У представленаому дослідженії наводиться оцінка проектування, а точніше сказати: передпроектування ПС.

Управління скороченням собівартості проектування, головним чином, відбувається за рахунок зменшення строків та персоналу, необхідного для здійснення проектування ПС.

ПС застосовуються у різноманітних галузях життя й діяльності людини, причому подальший розвиток цивілізації зменшує сегмент життя людини, що не охоплено ПС. Експлуатація, звичніше – використання, ПС у кожній окремій галузі (інформаційні технології, управління виробництвом, транспортом, побудова телекомунікацій, наукова діяльність, освіта тощо) має свої принципові відмінності.

Спільною рисою для усіх ПС залишається те, що під впливом часу та інших невід'ємних факторів інформатизації (новлення: операційних систем, мов програмування, принципів дії розподілених систем обробки даних, що особливо важливо у сфері інформаційних технологій) відбувається еволюційне становіння ПС. Така тенденція призводить до погіршення швидкісних, інформаційно-комунікаційних, графічних, часових та інших характеристик аж до повної відмови ПС. Ось тут постає питання необхідності виконання удосконалення, покращення й переробки ПС, а всі ці процеси є складовими комплексного поняття «реєнжинінг».

Таким чином, тема, що передбачає складання методики розрахунку показників оцінки проекту при виконанні реєнжинінгу ПС є актуальну.

Об'єктом роботи є процес реєнжинінгу програмних систем.

© Великодний С. С., Тимофєєва О. С., Зайцева-Великодна С. С., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-13

Предметом роботи – оцінка показників проекту перед виконанням реєнжинінгу програмних систем, яка необхідна для прийняття остаточного рішення щодо його доцільності.

Мета роботи – сформувати метод розрахунку показників реєнжинінгу програмних систем за допомогою комплексного інструментарію оцінки програмного проекту.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Отже, виконання реєнжинінгу – потребує докорінної переробки (перепроектування) ПС з метою покращення технічних характеристик, при виконанні якої треба унаслідуванням позитивні та відмовитися від впливу негативних якостей первинного об'єкту.

Проблему реєнжинінгу ПС різного галузевого призначення було детально розглянуто у [1, 2]. Методологічні засади реєнжинінгу, які можна віднести й до ПС було закладено у [3].

Перед виконанням оцінки реєнжинінгу ПС необхідно мати набір даних із конкретизованих проектних чинників: 3 виду ваги ВВ, 13 показників технічної складності, 8 показників кваліфікації персоналу, які отримано в результаті аналізу 3–5 вже закінчених схожих проектів.

Необхідно отримати розрахункові показники за якими буде відбуватись прогнозований фінансовий перелік витрат. Також треба формалізувати критерії оцінки та визначення складності реєнжинінгу вже готової ПС, але яка потребує зміни із плином часу.

Уявлення про складність проекту необхідні для подальшого оцінювання та розрахунку приблизного терміну реалізації реєнжинінгу, до якого включаються час на: перепроектування, тестування, переналагодження.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Метод, що орієнтовано на застосування вказівників UCP, належить Густаву Карнеру [4].

Багато спеціалістів вважають, що облік видатків на основі методу Карнера дає змогу отримати оцінку із похибкою у 20%, відносно реальних видатків [5–7]. Тому саме цей метод візьмемо за основу при виконанні реєнжинінгу ПС, з отриманням подальшого розвитку його стосовно до процедур реєнжинінгу.

Відповідь на це запитання дає метод Карнера (Karner's Use Case Points Method), Згідно з пропозиціями Карнера, пункти варіантів використання є функціями наступних аргументів:

- 1) кількість і складність варіантів використання в системі;
- 2) кількість і складність акторів у системі;
- 3) різні нефункціональні вимоги (такі як продуктивність, переносимість тощо, які були не описані у варіантах використання);
- 4) середовище розробки (мова, мотивація учасників).

Згідно з [8] Методика Карнера пропонує загальну оцінку працеватрат проекту, але вона не дозволяє виділити який-небудь його етап. Більш того, методика

не може бути використана, доти, поки всі діаграми варіанти використання не будуть спроектовані [9].

Фактор технічної складності проекту розраховується на підставі показників технічної складності проекту [10].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Перед тим, як оцінювати обсяги проекту, необхідно налаштувати технічні чинники та чинники середовища. Для визначення технічного чинника складності (англ. – TCF) та чинника складності середовища (англ. – ECF) треба заповнити перелік чинників, що вплинути на показники проекту.

Першим з таких чинників є чинник ваги, що визначається методом використання проектних точок Карнера, проте вони можуть корегуватись відповідно до конкретних вимог проекту.

Наступний чинник – значення, що вказує на ступінь впливу визначеного чинника на проект. Індикацією значення є варіювання від «0» до «5», що означає діапазон впливу від «відсутності» до «сильного» із можливими проміжними станами.

Перед тим, як оцінювати програмну систему за допомогою показників використання функцій, що будуть піддані реїнжинірингу, необхідно призначити вагу для кожного з варіантів використання майбутньої ПС, спираючись на проектні чинники (табл. 1).

Таблиця 1 – Проектні чинники для призначення ваги ВВ

Ранг	Показник складності	Інтерфейс користувача	Кількість сущностей бази даних	Кількість кроків сценарію	Кількість класів реалізації	Вага, W
1	Простий	Запропонований із шаблону	1	≤ 3	< 5	5
2	Середній	З елементами дизайну	≥ 2	4–7	5–10	10
3	Складний	Індивідуальна графічна розробка дизайну	≥ 3	> 7	> 10	15

Виходячи із табл. 1, слід призначати відповідну вагу ВВ у тому випадку, коли присутній хоча б один із чинників з максимальним показником для відповідного рангу.

Сума показників складності ВВ знаходить своє відображення у показнику UUCP. TCF обраховується виходячи із декількох показників.

Значення UTV, що розраховується, спираючись на перелік показників технічної складності проекту (табл. 2), яким (окрім вагового коефіцієнту) призначається кількісне значення впливу показника на складність проекту: від «0» – вплив не оказує до «5» – сильний вплив.

Накопичене значення UTV розрахуємо як:

$$UTV = \sum_{i=1}^{13} [V_i \times k_i].$$

Ваговий коефіцієнт TWF – за замовчуванням встановлюється як 0,01; хоча теоретично може корегуватись.

Таблиця 2 – Показники технічної складності проекту

Показник	Ваговий коефіцієнт	Кількісне значення	Результат
Розподілена система	2	5	10
Висока продуктивність	1	4	4
Ефективність роботи кінцевого користувача	1	2	2
Складна обробка даних	1	4	4
Повторне використання коду	1	2	2
Легкість інсталляції	0,5	5	2,5
Легкість використання	0,5	3	1,5
Портативність	2	3	6
Легкість корегування змін	1	3	3
Паралельність	1	2	2
Наявність спеціальних функцій безпеки	1	2	2
Доступ з боку зовнішніх користувачів	1	5	5
Вимоги до попере-днього навчання користувачів	1	3	3

Постійна проекту ТС – гарантований мінімум показника ТС = 0,6.

Таким чином TCF для кожного конкретного проекту приймає значення:

$$TCF = TC + TWF \times UTW,$$

тобто від теоретичного мінімуму: 0,6 до теоретичного максимуму: 1,25; чим ілюструє як позитивний вплив на витрати (зменшуючи на 40%), так і негативний – збільшуєчи на 25%.

Оскільки САПР – це комплекс засобів, що включає також персонал [1], то необхідно при розрахунках показників проекту розглянути учасників проекту, тобто включити чинники розробників – ДО до оцінки складності реїнжинірингу ПС.

Розрахунковий чинник, що стосується ДО, носить назву чиннику оточуючого середовища ECF та обчислюється виходячи із декількох показників.

Значення UEV, що розраховується спираючись на перелік показників кваліфікації персоналу, який виконує реїнжиніринг (табл. 3). Показнику призначується кількісне значення наявності конкретного набору вмінь у персоналу: від «0» – показнику немає до «5» – сильно виражений показник.

Таблиця 3 – Показники кваліфікації персоналу

Показник	Ваговий коефіцієнт	Кількісне значення	Результат
Знайомство з UML	1,5	4	6
Досвід роботи із конкретним середовищем	0,5	3	1,5
Досвід використання ООП	1	4	4
Кваліфікація системного аналітика	0,5	4	2
Мотивація	1	3	3
Стабільність вимог	2	4	8
Неповний робочий день	-1	0	0
Складність мови програмування	-1	3	-3

Накопичене значення UEV розраховується як:

$$UEV = \sum_{i=1}^8 [W_i \times m_i],$$

Ваговий коефіцієнт EWF – за замовчуванням встановлюється як (-0,03), хоча теоретично може корегуватись.

Постійна проекту ЕС – абсолютний максимум показника ЕС = 1,4.

Таким чином ECF для кожного конкретного проекту приймає значення:

$$ECF = EC + EWF \times UEV,$$

тобто від теоретичного мінімуму: 0,4 до теоретичного максимуму: 1,4; чим ілюструє як позитивний вплив на витрати (зменшуючи на 60%), так і негативний – збільшуючи на 40%.

Розрахункове значення для ВВ UCP – це число, що отримується для простого (див. табл. 1) ВВ. Значення вимірюється у так званих «проектних точках» та обчислюється як:

$$UCP = UUCP \times TCF \times ECF,$$

Далі прогнозується загальний час проекту EWE у годинах:

$$EWE = UCP \times DR,$$

де DR – значення часу тривання розробки однієї «проектної точки» USP, яке краще всього обирати

спираючись на використання досвіду проектів аналогів. DR є критичним чинником, і хоча його значення за замовчуванням дорівнює 10 год., воно легко може перевищувати 30 год., якщо значення UEV не збалансоване. При обранні DR необхідно брати до уваги кваліфікацію розробників, наприклад для нової команди слід обрати DR = 20 год.

Таким чином, приходимо до оцінки вартості проекту ЕС:

$$EC = EWE \times DHR,$$

де DHR – усереднена за статистичними даними погодинна ставка персоналу (програміста).

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для допомоги у проведенні експериментальної частини з реалізації методу розрахунку показників оцінки проекту при виконанні рейнжінірингу програмних систем, будемо використовувати безкоштовну 30-ти денну версію CASE-засобу Enterprise Architect 14, що узято із офіційного ресурсу розробника – Sparx Systems.

Наприклад, для реїнжинірингу системи, що представлена на рис. 1., необхідно, відповідно до табл. 1 налаштувати кожний із ВВ.

Приклад налаштування показників складності у середовищі Enterprise Architect 14 наведено на рис. 2.

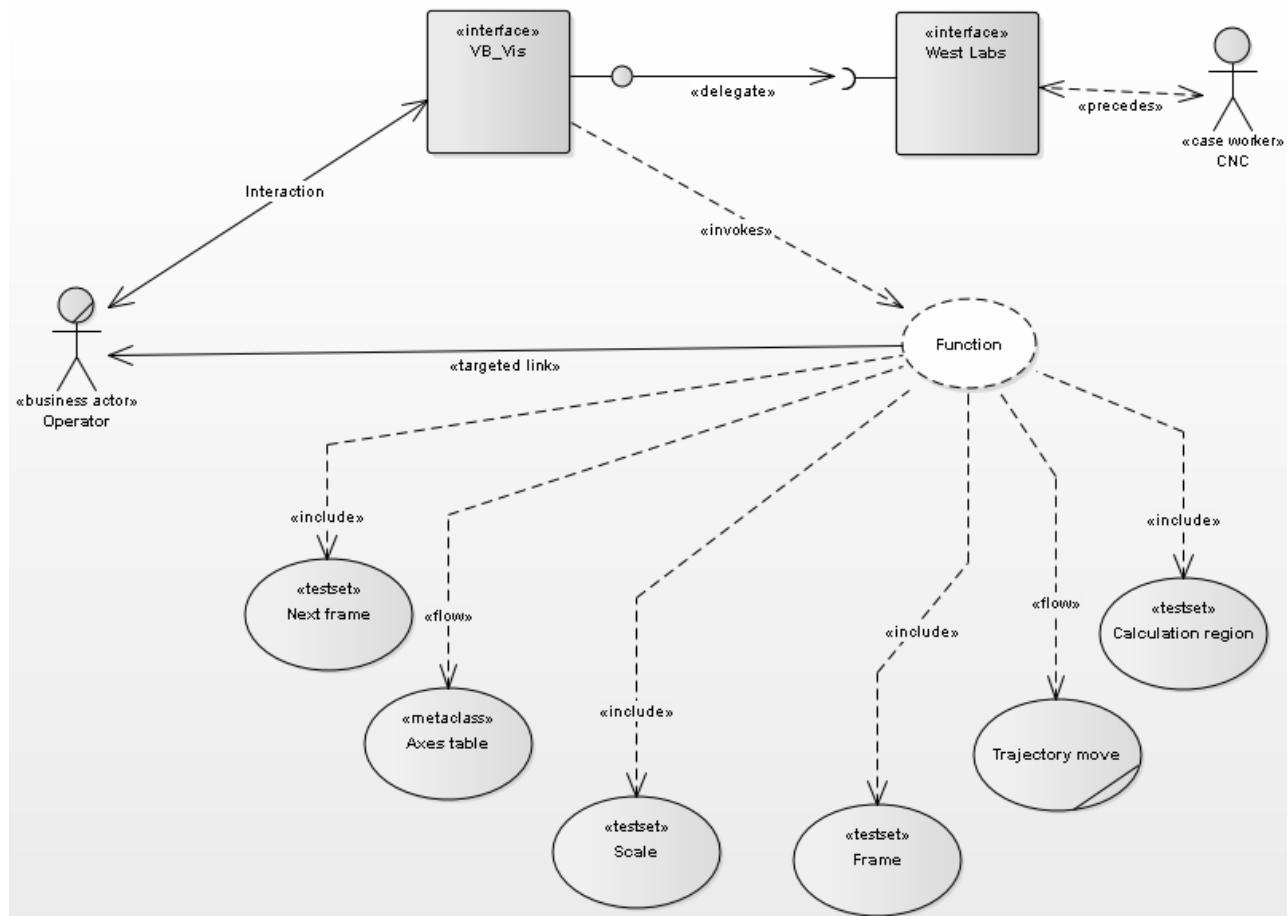


Рисунок 1 – Діаграма ВВ ПІС, яку обрано для проведення оцінки проектних показників реїнжинірингу

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Після настроювання варіантів використання, розрахунків чинників, вагових коефіцієнтів та обмежуючих констант цих чинників, можна переходити до наочної оцінки проекту.

Сукупність результатів розрахунку чинників оцінки та показників проекту, перед виконанням реїнжинірингу ПС, наведено на рис. 3. Для більшості розрахованих чинників та показників коментарі щодо їх одержання вичерпно наведено у розд. 3 поданої статті.

Пояснимо тільки призначення елементів керування, що подано у нижній частині рис. 3.

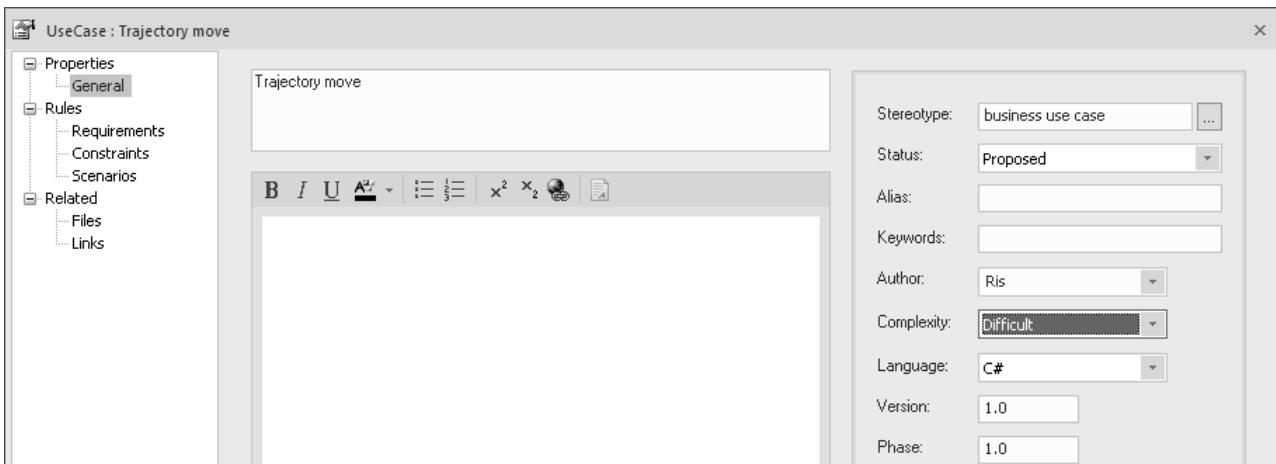


Рисунок 2 – Налаштування показників складності для ВВ

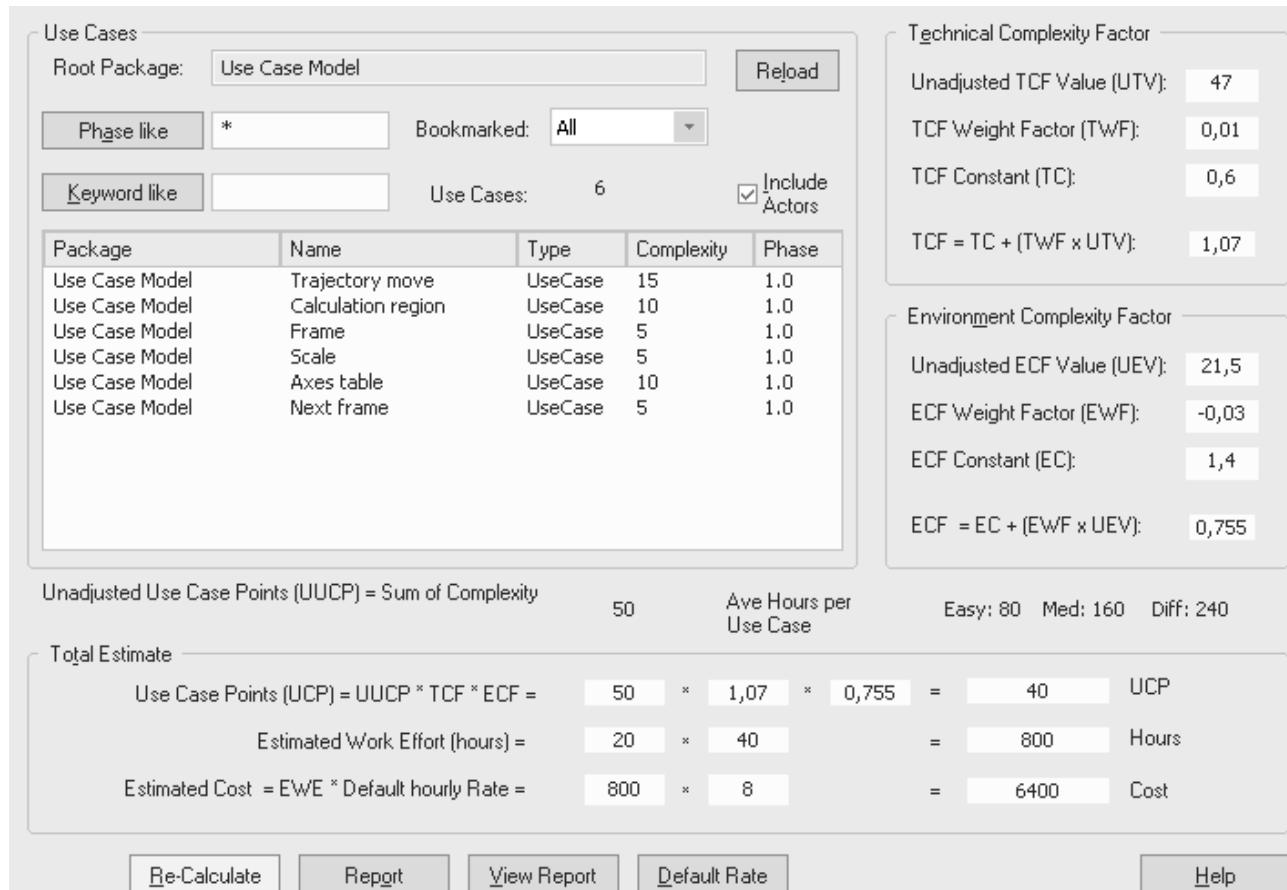


Рисунок 3 – Результати розрахунків чинників та значень, що впливають на оцінку проектних показників реїнжинірингу ПС

© Великодний С. С., Тимофесова О. С., Зайцева-Великодна С. С., 2018
 DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-13

Кнопка «Re-Calculate» – виконує перерахунок проектних чинників, спираючись на змінені показники.

Кнопка «Report» – генерує запит на створення та вказівку шляху збереження звіту з оцінки проекту у форматі «RTF».

Кнопка «View Report» – виконує перегляд встановлених показників оцінки проекту із викликом програмного забезпечення, асоційованого із переглядом RTF-файлів, наприклад: Microsoft Word.

Кнопка «Default rate» – викликає діалогове вікно зміни показників оцінки проекту, що завдані у Enterprise Architect 14 за замовчуванням.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Під час роботи з предметною галуззю статті, дискусій та обговорень розглянутої теми на конференціях та спеціалізованих форумах, автори прийшли до наступних рекомендацій.

1) Метод Карнера рекомендує виключати розширені ВВ при розрахунку проектних точок. Автори не згодні із цим та рекомендують розглядати усі ВВ при оцінки проекту, якщо ці ВВ вимагають перепроектування функціоналу, то існують зусилля на їх переробку, що повинні враховуватися за наведеною методикою.

2) Об'єктивний спосіб точно налаштувати при уdosконалені проект – це розглянути ВВ 3-х – 5-ти вже успішно завершених (у свій час) проектів, які вимагали реінжинірингу. Після аналізу завершеного проекту і вивчення звіту про показники, доступні чинники можуть бути точно відкориговані, щоб дати оцінку фактичним годинам реінжинірингу. Згодом, можна використовувати ці дані у якості базової траєкторії життєвого циклу проекту.

3) Достатня перевірка працездатності полягає в тому, щоб спираючись на показник «Ave Hours per Use Case» (рис. 3) проаналізувати: чи можна перепроектувати простий, середній чи складний ВВ у відвідений час (включаючи усі стадії створення ПС [1]).

4) Не слід очікувати вичерпної відповіді на питання «скільки коштує реінжиніринг?» або «як довго він триватиме?» – необхідно оцінювати отримані статистичні дані, коригувати показники та аналізувати досвід втілення показників успішних проектів. Розглянута методика забезпечує на 17–19% меншу похибку, ніж метод Карнера, відносно фактичних видатків.

ВИСНОВКИ

В роботі вирішено наукову задачу: сформовано метод розрахунку показників реінжинірингу програмних систем на підставі комплексного інструментарію оцінки програмного проекту.

Наукова новизна отриманих результатів складається у тому, що:

1) отримав подальший розвиток метода розрахунку проектних точок Карнера із внесенням суттєвих доповнень та розширень, що дозволяє зменшити похибку на 17–19% у оцінюванні витрат на реалізацію проекту ніж метод Карнера;

2) вперше застосовано запропонований метод щодо розрахунку показників процесу реінжинірингу ПС, що дозволяють оцінити прогнозований фінансовий перелік витрат.

Практичний результат: формалізовано критерії оцінки та визначення складності реінжинірингу вже готової ПС, але яка потребує зміни із плинном часу.

Відмінність від аналогів: при складанні методики оцінки показників ПС, яка буде піддана реінжинірингу, було виділено чинники, що впливають на планування ресурсів програмного проекту:

1) дослідження моделі вимог ПС;

2) кількість кроків для виконання реінжинірингу елементу ПС;

© Великодний С. С., Тимофєєва О. С., Зайцева-Великодна С. С., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-13

3) технічна складність проекту;

4) рівень кваліфікації команди програмістів.

Кожна змінна, що використовується для розрахунків у рамках реінжинірингу визначається та обчислюється окремо із використанням:

1) вимірювань характерних параметрів;

2) вагових коефіцієнтів;

3) обмежуючих констант.

Вимірювання параметрів проводяться керівником проекту, що, спираючись на досвід 3-х – 5-ти схожих проектів, виходить із власних уявлень про технічну складність проекту та можливостях команди, яка буде виконувати реінжиніринг.

Встановлення коефіцієнтів та обрання значення констант засновані на багато чисельній статистиці найбільш схожих проектів, що виконані за технологією А. Якобсона.

Практичне значення отриманих результатів: на підставі розрахованих показників оцінювання формується звіт, який містить аналіз оцінки програмного проекту.

Перспективи подальших досліджень: автоматизоване формування звіту оцінки ПС, який включався би у вихідну проектну документацію, необхідну для прогнозування успішного виконання реінжинірингу кожного з видів забезпечення: технічного, математичного, інформаційного, лінгвістичного, методичного, організаційного тощо. Проектна документація є обов'язковою складовою частиною видів забезпечення систем автоматизованого проектування ПС.

ПОДЯКИ

Особливу подяку хочемо висловити розробнику CASE-засобу Enterprise Architect 14 – австралійській корпорації «Sparx Systems Pty Ltd»: за можливість вільного місячного користування найновітнішими їх розробками, за підтримку он-лайнового дискусійного форуму, за можливість вільного доступу до Enterprise Architect Lite та за навчально-довідкові матеріали з UML-моделювання, що містяться на офіційному сайті «Sparx Systems».

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Великодний С. С. Проблема реінжиніринга видов обсяження систем автоматизированного проектирования / С. С. Великодний // Междун. науч. журн. «Управляющие системы и машины». – 2014. – № 1. – С. 57–61, 76.
2. Великодний С. С. Реінжиніринг систем моніторингу та дистанційного управління судновими енергетичними установками / С. С. Великодний // Матер. ХХII міжн. конф. з автом. управл. «Автоматика 2015», Одеса, 10–11 верес. 2015 : Одеса, 2015. – С. 133–134.
3. Великодний С. С. Методологические основы реинжиниринга систем автоматизированного проектирования / С. С. Великодний // Междун. науч. журн. «Управляющие системы и машины». – 2014. – № 2. – С. 39–43.
4. Resource Estimation for Objectory Projects : project report / G. Karner / Objective Systems. – SF AB, 1993. – 9 p.
5. Anda B. Effort Estimation of Use Cases for Incremental Large-Scale Software Development / B. Anda // 27-th Inter-

- national Conference on Software Engineering, St. Louis, MO, 15–21 May 2005. – P. 303–311.
6. Carroll E. R. Estimating Software Based on Use Case Point / E. R. Carroll // OOPSLA '05: Companion to the 20th annual ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications, San Diego, CA, 2005. – P. 257–265. DOI: 10.1145/1094855.1094960
7. Clemons R. Project Estimation with Use Case Points / R. Clemons // Cross Talk. – 2006. – № 2, February. – P. 18–22.
8. Дідковська М. В. Тестування: Критерії та методи / М. В. Дідковська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2010. – 96 с.
9. Cohn M. Agile Estimating and Planning / M. Cohn. – Prentice Hall, 2005. – 368 р.
10. Орлов С. А. Программная инженерия : уч. для вузов. 5-е изд. обновл. и доп. / С. А. Орлов. – СПб. : Питер, 2016. – 640 с.

Стаття надійшла до редакції 26.03.2018.

Після доробки 27.05.2018.

УДК 004.412.3

МЕТОД РАСЧЕТА ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ РЕИНЖИНИРИНГА ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

Великодний С. С. – канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедры информационных технологий Одесской национальной академии связи им. А. С. Попова; доцент кафедры информационных технологий Одесского государственного экологического университета, Одесса, Украина.

Тимофеева О. С. – аспирант кафедры информационных технологий Одесского государственного экологического университета, Одесса, Украина.

Зайцева-Великодная С. С. – техник лаборатории информатики и численных методов Одесского государственного экологического университета, Одесса, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Программные системы настолько плотно вошли в нашу жизнь, что невозможно представить себе существование и развитие человечества без них. Но под влиянием факторов технической эволюции происходит старение программных систем с ухудшением их характеристик. В такой ситуации необходима коренная переработка с наследованием положительных качеств программной системы и отделением негативных, то есть реинжиниринг. Подобные процессы, начинающиеся с перепроектирования, требуют обязательной аналитической оценки показателей проекта, ведь существуют случаи, когда реинжиниринг нерентабелен относительно конкретной программной системы. В статье рассмотрен комплексный инструмент оценки программного проекта, прогнозирующий трудоемкость перепрограммирования объектов, в сочетании с другими показателями проектов, определяющими сложность реинжиниринга программных систем.

Цель. Сформировать метод, позволяющий оценить показатели реинжиниринга программных систем при помощи комплексного инструментария оценки программного проекта.

Метод. Описанная в статье технология основана на использовании метода точек Карнера с внесением существенных дополнений и расширений. Установление коэффициентов и избрание значения констант основаны на методе Якобсона и проверены на многочисленной статистике наиболее похожих проектов.

Результаты. После анализа завершенного проекта и изучения отчета о показателях, доступные факторы могут быть точно откорректированы, чтобы дать оценку фактическим часам реинжиниринга. Впоследствии можно использовать эти данные в качестве базовой траектории жизненного цикла проекта. На основании рассчитанных показателей оценки формируется отчет, содержащий анализ оценки программного проекта, для включения в исходную проектную документацию, которая является частью организационного обеспечения систем автоматизированного проектирования программных систем.

Выводы. Получил дальнейшее развитие метод расчета проектных точек Карнера с внесением существенных дополнений и расширений относительно процессов реинжиниринга программных систем. Каждая переменная определяется и вычисляется отдельно с использованием измерений, весовых коэффициентов и ограничивающих констант. Измерения выполняются командой опытных системных аналитиков, опирающихся на собственные представления о технической сложности проекта и возможности команды программистов. Коэффициенты и константы принимаются исходя из статистических данных 3–5 уже оцененных аналитиками выполненных проектов с близкой степенью схожести.

Ключевые слова: программа система, проект, реинжиниринг, метод проектных точек, показатель, оценка, вариант использования, фактор, весовой коэффициент, ограничивающая константа.

UDC 004.412.3

THE CALCULATION METHOD FOR INDICATORS PROJECT ESTIMATION IN THE IMPLEMENTATION OF SOFTWARE SYSTEMS RE-ENGINEERING

Velykodnyi Stanislav – PhD, Head of the Information Technologies Department in O. S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications; Associate Professor of the Information Technologies Department Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine.

Tymofieieva Olena – Postgraduate Student of the Information Technologies Department Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine.

Zaitseva-Velykodna Svitlana – Technician of Informatics and Numerical Methods Educational Laboratory Odessa State Environmental University, Odessa, Ukraine.

ABSTRACT

Essentials. Today's software systems have become so tightly integrated into our lives that it is virtually impossible to imagine the existence and development of mankind without them. But this progress also means that software systems currently in use have quickly become outdated and obsolete due to the pace technical evolution. It is here that end to end process review comes down with the inheritance of the positive qualities of the software system and the phasing out of the negative one, that is, re-engineering. All similar processes that begin with re-design, require a mandatory analytical assessment of the project's key indicators since there are cases where re-engineering might be unprofitable for a particular software system. In the article below, the author takes a look at the complex tool of evaluating the software project redesign, which could predict labor costs for reprogramming of the objects in conjunction with other indicators of the projects that determines the complexity of software system under review.

Objective. The object of this paper is to outline the method by which one can estimate and evaluate key aspects for software system reengineering with the help of complex tools for appraisal of the project under review.

Method. The technology described in the article is based on use of the Karner's Point method with the introduction of significant additions and extensions. The establishment of coefficients and the selection of the constants are based on the Jacobson's method and tested on numerous statistics of the most similar projects.

Outcome. After analyzing the completed project and examining the report of crucial factors, it's possible to provide quite accurate estimation for the actual man-hours of re-engineering for the particular project, given its key factors can be accurately adjusted. Subsequently, you can use this data as the base line for the project life cycle. Evaluation factors used for project cost calculation will be combined in a report that will be included in the source design documentation, which is part of the organizational support of the systems for the automation design of software systems.

Conclusions. The method of calculating Karner's project points with the introduction of significant extensions to the process of software system re-engineering has been further developed. Each variable is determined and calculated separately, using measurements, weighting factors and constraints. Measurements are performed by a team of experienced QA-analysts based on their ideas about the technical complexity of the project and the capabilities of the software developers. The coefficients and constants are based on data collected from 3–5 projects already completed by analysts with a big degree of similarity.

KEYWORDS: software system, project, re-engineering, method of design points, indicator, estimation, use case, factor, weighting value, bounding constant.

REFERENCES

1. Velykodniy S. S. Problema reinzhiniringa vidov obespechenija sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya, *Mezhdun. nauch. zhurn. «Upavljajushchie sistemy i mashiny»*, 2014, No. 1, pp. 57–61, 76.
2. Velykodniy S. S. Reinzhyryng system monitoringu ta dystancijnogo upravlinnja sudnovymy energetichnymy ustankovkamy, *Mater. XXII mizhn. konf. z avtom. upravl. "Avtomatyka 2015"*, Odesa, 10–11 veres. 2015. Odesa, 2015, pp. 133–134.
3. Velykodniy S. S. Metodologicheskie osnovy reinzhiniringa sistem avtomatizirovannogo proektirovaniya, *Mezhdun. nauch. zhurn. "Upavljajushchie sistemy i mashiny"*, 2014, No. 2, pp. 39–43.
4. Resource Estimation for Objectory Projects : project report, *Objective Systems*, SF AB, 1993, 9 p.
5. Anda B. Effort Estimation of Use Cases for Incremental Large-Scale Software Development, *27-th International Conference on Software Engineering, St. Louis, MO, 15–21 May 2005*, pp. 303–311.
6. Carroll E. R. Estimating Software Based on Use Case Point, *OOPSLA '05: Companion to the 20th annual ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming, systems, languages, and applications, San Diego, CA, 2005*, pp. 257–265. DOI: 10.1145/1094855.1094960
7. Clemons R. Project Estimation with Use Case Points, *Cross Talk*, 2006, No. 2, February, pp. 18–22.
8. Didkovs'ka M. V. Testuvannja: Kryterii' ta metody. Kyiv, NTUU "KPI", 2010, 96 p.
9. Cohn M. Agile Estimating and Planning. Prentice Hall, 2005, 368 p.
10. Orlov S. A. Programmnaja inzhenerija: uch. dlja vuzov. 5-e izd. obnovl. i dop. SPb, Piter, 2016, 640 p.

UDC 004.9

PLANNING THE ACTIVITIES OF INTELLECTUAL AGENTS IN THE ELECTRONIC COMMERCE SYSTEMS

Berko A. – Dr. Sc., Professor, Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Vysotska V. – PhD, Associate Professor of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Lytvyn V. – Dr. Sc., Professor, Head of Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine.

Naum O. – Assistant of the Information systems and technologies department, Drohobych Ivan Franko State Pedagogical University, Drohobych, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Today, e-commerce is one of the most active and promising segments of the global economy, characterized by steady growth of volumes and active improvement of tools and technologies. Intellectualization of e-commerce systems today is one of the main trends in their development and effective functioning in a competitive environment. One of the most promising means of solving this task category is the use of intellectual agents (IAs). The modern approach to modeling the decision support process, in particular, in e-commerce, uses the Boyd's loop principle, which involves repeated cycle repetition of four successive interrelated processes (stages): observation – orientation – decision-making – action. According to Boyd's hypothesis, the higher speed of the cycle and the accuracy of the evaluation of the stages of the cycle provide an advantage over the competitor.

Objective of the research is to develop tools for effective planning of actions of intellectual agents of e-commerce systems in a competitive environment based on ontologies, and to set the task of planning the actions of intellectual agents to the problem of dynamic programming.

Method. The mathematical support and method of action planning of IA based on adaptive ontologies are developed. This method can be used to effectively operate IA in a competitive environment of the SEC, which is modeled by Boyd's loop. Adaptive ontology is used to plan IA actions. To this end, we have added two scalar quantities (the importance of concepts and relationships) that are used to find an effective way to implement the IA plan in a generally accepted three-element tuple that defines ontology (a set of concepts, relationships, and their interpretation). Such an assessment of the ontology elements allows reducing the task of planning IA actions in a competitive environment to the task of dynamic programming.

Results. In the article the model of planning of actions of intellectual agents of electronic commerce systems using an ontological approach is constructed. The method of evaluation of actions of intellectual agents on the basis of adaptive ontologies is developed. Such an assessment makes it possible to reduce the task of scheduling actions to the task of dynamic programming.

Conclusions. Analysis of the results of IA actions can determine the causes of the formation of the target audience by a set of characteristics of the functioning of the SEC. By regulating the content, its uniqueness, the efficiency of its formation and its adequate management according to the individual needs of a regular user, one can model the boundaries of the target social audience and the number of unique visitors from search engines. In fig. 5–6 the results of the work of the developed systems in the form of charts are presented, from which it follows that in the presence of all types of IA significantly increases the volume of visits and unique users.

KEYWORDS: intelligent agent, ontology, planning, e-commerce.

ABBREVIATIONS

B2B is a Business-to-business;
B2C is a Business-to-consumer;
C2B is a Consumer-to-business.
KB is a knowledge base;
IA is intelligent agent;
IS is an information system;
IP algorithmic paradigm;
IT is an information technology;
SA is a subject area;
SEC is system of electronic commerce.

NOMENCLATURE

C is a set of concepts;
 R is the set of relations between concepts;
 F is the set of concepts and relationships interpretation axioms that set semantic constraints for a concepts and relationships system;
 S is set of AI states;

© Berko A. Y., Vysotska V. A., Lytvyn V. V., Naum O. M., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-14

A is a set of actions;
 $Goal$ is set of target states;
 $Path$ is path from the initial state to the state of the goal
 W is weight of the importance of concepts C ;
 L is weight of the importance of relations R ;
 Δ^t is some limit value of weight change of the concept, which depends on the ontology SA;
 σ_i is confidence;
 σ_{iC} is the old measure of confidence;
 U is information sources;
 T_{ij} is information resource;
 a_j^{kl} is the transition of IA from the state S_k to the state of S_l , using the alternative a_j ;
 g_j^{kl} cost of transition from state to state;
 $v(a_j^{kl})$ is evaluation of action a_j^{kl} at a time;
 D_i is the domain of the property x_i ;
 $v(S_k)$ is estimate of the state of S_k ;
 ZP is task of planning the activity of IA in the SEC;

E_v is a scalar quantity that coordinates resource expenditures with IA actions;

E_q is a scalar quantity that agrees with the measure of the effect obtained with the actions of the IA;

g_{ij}^k is the cost of resources for the transition from the state of S_i to the state S_j , using the alternative a_k ;

r_j^k is the period of operation of the IA in the state S_j , in the alternative to a_k ;

r_e is desired period of operation of IA.

INTRODUCTION

Today, e-commerce is one of the most promising areas for the development of Internet systems and Internet technologies. The trend of steady growth of the e-commerce market has remained unchanged for over two decades and continues to be maintained. According to a study by Morgan Stanley [5], it is projected that the global e-commerce market in 2016 will exceed \$ 1 trillion in the USA. In Ukraine the total e-commerce market in 2015 compared to 2014 has increased by 37%, and in 2016 it is forecast to grow by 27% [2]. Such active development of the industry causes additional competition and introduces new requirements to the participants of the e-commerce market. Unlike traditional trade, for which the main ways to increase competitiveness remain marketing approaches (price policy, expansion of the client base, the capture of new markets, change in the range, etc.) for e-commerce, the domination of technological solutions in improving market efficiency is typical. In the environment of e-commerce there is large number of factors that determine the behavior of elements in this environment, the way to make solutions and directly affect the effectiveness and quality of the results of the operation of IA. The description of such factors is stored in the KB, not in the database, since logical output plays an important role in the simulation of the IA's actions, which can be realized on the basis of knowledge about the software. The core of such a BP is the software ontology. Consequently, the development of methods and means of supporting the decision-making of the functioning of IA in the SEC using the ontological approach is an urgent area of research. The results of this set of tasks provide new opportunities for analyzing the IA solutions made in the competitive environment of e-commerce and their further adjusting. The main technological trends in the development of e-commerce systems and tools that increase their competitiveness in the market in 2018 are determined, such as: [4], [6]

1. Mobile technologies, which provide the active use of mobile devices to access e-commerce resources, advertising and electronic payments.

2. Multi-Channel is used for a wide range of different methods and means of communication between the e-commerce provider and the client.

3. Personalization is used for organization of the policy of interaction with the client based on his individual characteristics and needs. This is done by

analyzing customer personal data from shopping history, forums, social networks and more.

4. Socialization is used for active communication between the e-commerce provider and clients using a variety of environments and IT.

5. Cloud Services are used to provide free access to the resources and proposals of the SEC without limiting client's place of residence, his time, IT and access facilities.

6. Big Data Technologies are used to involve the use of significant volumes of operational data of various content and format, obtained from a wide range of sources in the tasks of analysis and planning of the policy of the SEC.

7. Small Data Technologies are used to focus on the means of interaction with customers with the characteristics of a particular person by using personal data that is obtained in the process of communicating with the client.

8. The iBeacon technology uses close-range devices (Bluetooth, WiFi, NFC, etc.) to establish active contact with the customer at the time of his stay at a point of sale or service.

9. Intellectual IT is based on the application of methods and tools for processing knowledge and situational decision-making in the SEC.

The object of the research is the processes of supporting the decision-making of the functioning of IA in the SEC using ontological approach. The subject of the research is the methods of effective planning of IA activities in the SEC. **The aim of the study** is to develop tools for effective planning of IA activities in the SEC in a competitive environment based on ontologies, and to sum up the task of planning IA actions to the task of dynamic programming.

1 PROBLEM STATEMENT

There are two main ways to achieve the competitive advantage of SEC in competitive environments using IA [3], [7], [9]. The first way is to accelerate the OODA IA activity cycle. This allows the first to make decisions and forces competitors to respond in response to the imposed plan. The second way is to improve the quality of the decisions made, that is, to build a plan of action that is more responsive to a situation than a competitor's decision. One of the ways to improve the quality of solutions made by IA e-commerce a modern approach to building a BP on the basis of ontology can be to used [7], [8]. Formally, the ontology consists of terms (concepts) organized in taxonomy, their definitions and attributes, as well as the axioms associated with them and the rules of derivation [8]. Therefore, under the model of ontology O we understand the three forms

$$O = \langle C, R, F \rangle. \quad (1)$$

The main attention in the article is focused on the planning of IA activities in the SEC (Boyd's loop orientation stage). The essence of the orientation of the AI is to find the *Path* from the initial state to the state of the goal, subject to the fulfillment of certain criteria.

Typically, such criteria specify the rationality of the behavior of the IA, the essence of which is to find a *Path* in which transition costs are optimal, and the effect (the reaction of the external environment within which the IA functions) from such a transition is maximal [5–6]. Such rational behavior is similar to the well-known economic model of “price-quality”, which makes it possible to reduce the task of constructing an action plan for IA to the category of two-criterion.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The intellectualization of the SEC, in the opinion of the authors, today is the most promising direction of their development in the coming years, as this way allows to change the principles of the functioning of e-commerce systems and tools in general. The introduction of intellectual IT involves the evolutionary transition of the SEC from the IP and IT to heuristic (intelligent systems). For systems constructed on this principle, there are the following features [3, 9]:

- flexibility, sensitivity to environmental indicators, self-organization;
- ability to learn;
- risks of errors;
- accumulation and use of prior knowledge;
- adaptation to changing environment.

The use of intelligent technologies for the construction and organization of activities of the SEC considerably expands the possibilities of their functioning in a competitive environment [10–16].

Today, one of the most popular methods of constructing complex intelligent systems that operate in competitive environments is the use of IA [3, 9]. Intelligent Agent is a software tool designed for self-location, moving and playback and performing certain actions in a distributed network environment, functioning of which is in accordance with the principles of intelligent systems [3]. This means that the IA is able to identify the host environment and its changes, accumulate to apply knowledge (self-learning), make decisions, plan and perform actions in accordance with the situation [9]. The use of IA as an active mean of business provides the SEC with fundamentally new opportunities that enhance their competitiveness and the efficiency of their operation in a competitive environment.

The most common approach to organizing the functioning of IA e-commerce in a competitive environment today is a Boyle Loop type model [1]. Boyd's loop (cycle) is the concept of organizing the object's operation in a competitive environment, which involves the cyclic execution of a defined sequence of stages [1]. The completion of the Boyd Loop stages form a cycle, denoted by the acronym OODA [1, 9], that consists of the following sequence of procedures:

- 1) Observation is the process of gathering information necessary for a decision in a particular situation;
- 2) Orientation which involves the processing of information obtained as a result of actions at the

monitoring stage, using methods of analysis and synthesis;

3) Decision-making is determination of the best variant of the plan of action for its further realization;

4) Action is the final stage of the cycle, which involves the practical implementation of the chosen course or action plan.

3 MATERIALS AND METHODS

The use of IA as an active means of business provides the SEC with fundamentally new opportunities that enhance their competitive ability and efficiency in a competitive environment. The main functions of the IA for the SEC are presented in the form of the Use-Case Diagram (Fig. 1) [17–22].

In this way, it is possible to organize the functioning of the electronic commerce system through an intelligent agent, whose work is based on the use of adaptive ontology (Fig. 1). Ontology in this structure is the core of the knowledge base that describes the agent's activity in the competitive environment of e-commerce. An intelligent agent in this case serves as an advanced interface tool in the interaction of the e-commerce system with clients and partners in a market-based Internet environment. This provides a significant expansion of the functionality of such an interface by providing the intelligent agent of the system of additional capabilities.

The main functions of the intellectual agent of the e-commerce system include [23–31]:

- Maintenance of communications in the areas of “client-business”, “business client” and “business-business”;

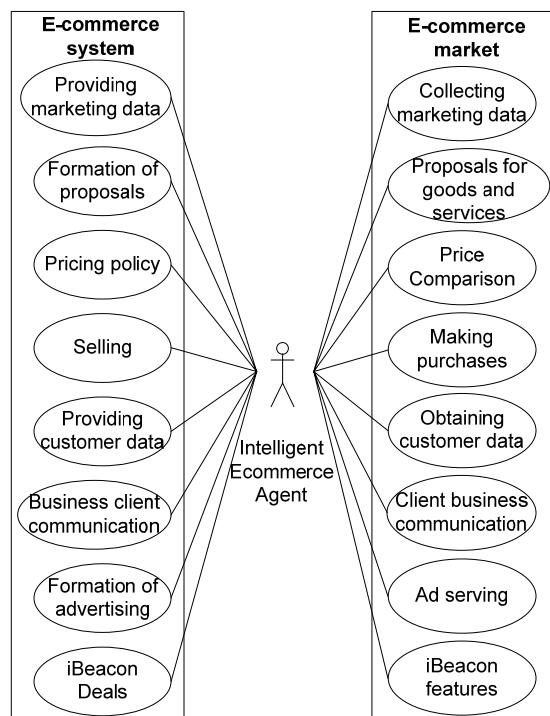


Figure 1 – A UML diagram of options for using an intelligent agent

- collection of marketing data in the external environment about the situation on the market;
- Formation and distribution of offers of goods and services among customers and potential users of e-commerce systems;
- Data collection and comparison of prices for goods and services with analogues in the e-commerce market for the formation of the pricing policy of the system of electronic commerce;
- Realization of operations of purchase and sale of goods and services in the Internet environment;
- Obtaining customer data from the external environment and transferring them to the e-commerce system;
- Formation and targeting of advertising information from the system of electronic commerce to the client;
- Beacon (iBeacon) client interaction with short-range devices such as Bluetooth, WiFi, NFC, etc.

In addition to expanding the functionality, the use of the intelligent agent creates opportunities for increasing the efficiency of the operation of the e-commerce system by improving the quality of decision-making in a competitive environment [32–42]. By the nature of the tasks that are performed by the IA in the SEC, we will distinguish between the following categories (Fig. 2).

- B2C of IA types is provide interaction between the SEC and the consumer of goods and services;
- C2B of IA types is provide interaction between consumers of goods and services from the SEC;
- B2B of IA types is provide interconnection between the SECs.

The task of planning the activity of IA in the SEC ZP contains 3 components, $ZP = \langle S, A, Goal \rangle$. For an effective planning of the e-commerce IA activity, an important element is the ability to evaluate the states and actions. For this purpose, it is expedient to use the model of adaptive ontology [6, 14], which is defined by the expression of the species:

$$\hat{O} = \langle \hat{C}, \hat{R}, F \rangle, \quad (2)$$

where $\hat{C} = \langle C, W \rangle$, $\hat{R} = \langle R, L \rangle$. The essence of the proposed solution consists in narrowing the search space of the best-case scenario of e-commerce IA, which allows us to eliminate the ineffective and inappropriate solution

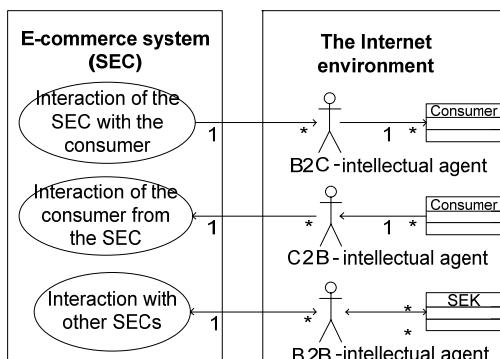


Figure 2 –Intelligent agent categories for e-commerce system

how to improve the quality of the final result. The solution of the ZP problem, in this case, is as follows:

– adaptive ontology concepts $\hat{C} = \{ \hat{C}_1, \hat{C}_2, \dots, \hat{C}_m \}$, adaptive ontology \hat{O} , which specify alternatives for the transition between states of the IA, give the weight W_k , $k=1,2, \dots, m$;

– over time this weight varies depending on the degree of confidence σ_i to the source of information on the basis of which alternative has been added to the ontology;

– those notions of the set \hat{C} , the increase in weights of which for a certain period does not exceed a certain threshold, Δ^t is removed.

– let at some time t the weight of the concept \hat{C}_k of the ontology \hat{O} be equal to W_k^t . To increase the weight of the concepts, certain sources of information are used by U . That is, there are a plenty of information sources $U = \{U_1, U_2, \dots, U_m\}$, each of which contains a plurality of resources $U_i = \{T_{i1}, T_{i2}, \dots, T_{ip}\}$. The confidence measure for the source U_i will be denoted as $\sigma_i \in [0, 1]$, where $\sigma_i=0$ indicates a complete distrust of the source U_i , $\sigma_i=1$ is the maximum confidence in the source U_i . It is initially assumed that the measure of confidence of all sources is the same, and has no deviations in one direction or another, that is, $\sigma_i=0.5$, and in addition to the ontology, the concepts of the measure change. To assess the change in the confidence in the source, the following procedure is proposed: the new confidence measure σ_{iH} to the source is calculated as $\sigma_{iH}=2 \cdot \sigma_i - \sigma_i^2$, if the expert used source resources to supplement the ontology;

– the new measure is calculated as $\sigma_{iH}=\sigma_i - \sigma_i^2$, if the expert did not use the resources from this source to supplement the ontology;

– if, after completing the ontology $\sigma_{iH} < \lambda$, such a source of information is not considered in the future (in practice, sufficient threshold values are considered to be $\lambda=0.1$, that is, when, after six consecutive attempts, resources of the source are not used to fill the ontology – its measure of confidence takes the value $\sigma_{iH} \approx 0.099$, and such a source is excluded from further use in the processes of complementing the ontology);

– after performing all the stages of filling the ontology, the weights of each of the concepts \hat{C}_k , $k=1,2, \dots, m$ are changed by the formula:

$$W_k^{t+1} = W_k^t + \sum_{T_{ij} \otimes U_i} \sigma_i, \quad (3)$$

where the entry $T_{ij} \otimes U_i$ indicates that the T_{ij} resource from U_i source of information is used to fill the ontology;

– in the next step ontology excludes concepts for which the growth of confidence is insignificant, that is $W_k^{t+1} - W_k^t < \Delta^t$.

Performing such a sequence of steps allows you to reduce the search space of the best path (*Path*) in the IA actions. After the search space *Path* is narrowed, the two-criterion problem of choosing the transition path between two adjacent states can be reduced to a task with one criterion. To do this, we do the following: The set of

concepts \hat{C} is described by the characteristics (properties) of $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$; the value of the property x_i is denoted as $z_i = z(x_i) \in D_i$. The goal state of the *Goal* is determined by the fact that some subset of signs $X \subseteq X$ must reach certain values of $z(x_i, Goal) \forall x_i \in X'$. To select actions we will rely on the rationality of IA behavior in the SEC, that is, in an effort to minimize the cost of resources to achieve the state of the goal. Each action a_j^{kl} equals a certain expense of IA resources $-g_j^{kl}$. In the tasks of improving the efficiency of the SEC in a competitive environment, each of the alternatives is characterized by resource costs (material, private, financial, etc.) and resulting effect (financial, marketing, time etc.). Information about alternatives, costs of operating resources is stored on an ontology. Estimates of the transition of IA from one state to another are directly proportional to

- (1) cost of resources $v(a_j^{kl}) = E_v \cdot g_j^{kl}$, and
- (2) for the resulting effect $q(a_j^{kl}) = E_q \cdot g_j^{kl}$.

In this view, the task of the IA is to minimize the values that characterize the SEEC's total costs in the selected way

$$V^* = \sum_{(k,l) \in Path(V)} v(a_{j_{kl}}^{kl}) \rightarrow \min, \quad (4)$$

and maximizing the resulting SEC effect

$$Q^* = \sum_{(k,l) \in Path(Q)} q(a_{j_{kl}}^{kl}) \rightarrow \max, \quad (5)$$

where (k,l) specifies the transition path from the state S_k to the state S_l , j_{kl} the alternative number selected for such a transition, $Path(V)$ is the path for reducing the cost, $Path(Q)$ is the way to increase the effect. Thus, in this way the task of planning the actions of IA in the SEC is reduced to a two-criterion optimization problem. Traditionally, such tasks are quite complex to solve, require the use of dynamic programming methods and do not always give the expected solution. The use of ontology in IA planning allows the heuristic approach that is based on pre-acquired knowledge that builds on such an ontology and continually updates and replenishes them in the processes of the functioning of an IA for building an effective plan of its action. In order to assess the reaction of the environment to the behavior of IA in the SEC, principles have been applied to stimulating learning [11]. This involves the following scheme of his actions:

- at each step the agent is in the state s of some set of states S ;
- in such a state, he chooses from an existing set of actions A some action a ;
- in response to this e-commerce environment informs the agent of the evaluation of the results of such an action and a new state;
- on the basis of the received IA builds an optimal plan of behavior, corresponding to the given criteria.

We denote $Q^*(S)$ the expected gain of the IA in the state S ; $Y : S \times A \rightarrow Y$ is promotion functions; $T : S \times A \rightarrow S'$ is functions of transition between states.

The task is to maximize the winnings. In the real situation, at the beginning of the process, the IA is in absolute uncertainty, since no known reaction of the system to any actions, including transitions between states. According to the theory of stimulating learning [14], the optimal value of a state is the reward that we receive if the IA works best. This value can be defined as the solution of equations:

$$Q^* = \max_{a \in A} \left(Y(S, a) + \gamma \sum_{Path} T(S, a, S') Q^*(S') \right). \quad (5)$$

If you know it, then the choice of the optimal strategy is carried out according to the formula:

$$\pi^*(s) = \arg \max_a \left(Y(S, a) + \gamma \sum_{Path} T(S, a, S') Q^*(S') \right).$$

Traditionally, this problem is solved by an iterative method. Taking into account (4) and (5), we obtain a two-criterion problem. From a mathematical point of view, there is no ideal method or method for solving such problems. Each of them has its own advantages and disadvantages and the scope of application. Having analyzed the known methods, the method of the main component is chosen if the target functions (4) or (5) can be evaluated accordingly from below or from above; if it is impossible to evaluate them, then we use the complex criterion method. Thus we get one of three tasks:

$$\min V^*, Q^* \geq Q, \quad (6)$$

$$\max Q^*, V^* \leq V, \quad (7)$$

$$\min f = \frac{V^*}{Q^*}. \quad (8)$$

Tasks (6)–(8) are multi-step optimization tasks, that is, the tasks of dynamic programming. In practice, solving such problems is complex enough, and is requiring considerable time and resource costs. Therefore, repeated repetition of such procedures for choosing an optimal IA action plan can significantly impede or disable its activities. An alternative way is to build an action plan based on previously obtained decisions that are stored in the BP. The basis of such a BP forms a special ontology. The use of ontology reduces task of constructing a plan to search for and evaluate conversion options based on predetermined descriptions, rules and criteria (Fig. 3).

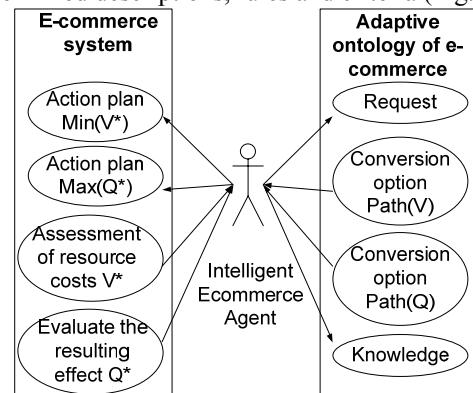


Figure 3 – Case diagram of using the intelligence agent when choosing an optimal action plan

The use of the intellectual agent and the knowledge base on the basis of adaptive ontology allows you to move from solving the problem of dynamic programming to choosing a solution based on previously acquired knowledge. The work of the intellectual agent of the e-commerce system in this process is organized as follows.

1. IA generates a request for an ontology, which defines the type of e-commerce activity and criteria for optimality of the cost indices of V^* resources and the effectiveness of Q^* .

2. As a result of the query, the intelligent receives transition options for constructing an optimal action plan to minimize resource costs – $Path(V)$ and maximize the $Path(Q)$ effect.

3. SEC implements selected plans and performs an estimate of the optimality of the cost of resources V^* and efficiency of Q^* .

4. The results of the evaluation system are passed to the agent, which, in the case of their compliance with the specified criteria, preserves the selected paths $Path(V)$ and $Path(Q)$ as optimal transitions for the specified type of action of the SEC.

5. In case of non-compliance of the results of the actions of the SEC with the given criteria of optimality, the intellectual agent initiates the updating of the adaptive ontology with new knowledge about optimal variants of transitions. An update is either performed by an expert or based on previously accumulated IA knowledge.

In general, this way of solving the problem of constructing an optimal IA action plan involves a significant reduction in the level of its formalization and the accuracy of the results. However, given that the use of large volumes of incomplete or inaccurate data and informal criteria is typical for the SEC, the use of traditional mathematical methods becomes rather difficult and often impossible. Therefore, the use of ontologies for constructing an IA action plan is justified in such circumstances by approach.

4 EXPERIMENTS

The module of functioning of IA planning of the SEC activity was developed [12]. Let the IA be in the state $S(0)$, there is some information resource G . Before the IA there is a task P is to go to some target state of $Goal$, using this resource and software knowledge stored in its

G,O ontology: $P : S_0 \rightarrow Goal$. The period of operation of the IA (r) is used to assess the states, and for the actions, the cost of resources g for the transition from state to state.

Then the formula for choosing alternatives is presented as:

$$o(a_{ij}^k) = \frac{r_j^k}{g_{ij}^k}.$$

So for interaction of the SEC with the consumer it is necessary to solve three subtasks (identification, processing of the order, implementation of payments), the second of which is divided into nine subtasks (the formation of a consumer basket, the formation of © Berko A. Y., Vysotska V. A., Lytvyn V. V., Naum O. M., 2018
 DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-14

proposals for shares, receipt of confirmation of the order from the consumer, clarification of the methods payments, payment, clarification of delivery methods, registration of the order, formation of a notice to the consumer about the registration of the order).

Alternative solutions are used to solve each subtask. For the subtask of specifying the delivery methods you can choose one of three alternatives: mail, courier, self delivery. Information is stored in the ontology of e-commerce [13].

The rationality of activity planning is formulated as follows: how to maximize the resulting SEEK effect with minimal cost, taking into account that:

1) the main restrictive resource factor is the level of demand for goods and services that a particular SEC implements;

2) the target economy effect received by the user of the IA from the functioning of the SEC and possible losses from its incorrect functioning;

3) The costs of promoting the information resources of the SEC are known and determined by IT Internet marketing and SEO;

4) indicative terms of profitable functioning of the SEC for a specific category of goods or services for known (specified) promotional and other measures by Internet marketing tools and SEO technologies are known from expert assessments, norms, forecasts, for example, based on Google Analytics and tools statistics Google Adsense and Google AdWords.

So for the subtype of the formation of sales for goods or the formation of shares for the service in accordance with the forecasts for the decline in demand for them, the following rule has been used: IF ((Ends the seasonal period) OR (The number of sales is equal to or less than the threshold minimum) OR (The number of negative comments is greater or equal or (The number of failures / returns is greater or equal to the threshold minimum)) AND (There are no alternative solutions, goods or services) TO (Block the sale of goods and formulate a request moderator on his replacement).

KB details this rule through the system of refinement product rules, constructed in accordance with the Rete algorithm. For IA, there is important information that allows you to succeed in solving this problem, i.e.: information on new types of alternative products or services that are more in demand among potential customers; information on pricing policies for such alternative products in accordance with the capabilities of regular consumers (target audiences) of this specific SEC; information on more effective marketing technologies for the promotion of goods and services through the information resource of the SEC. To search for this information, analyze the information resources of the relevant SECs that have been in demand in recent years. The results are written in the developed ontology using the SWRL rules. In general, we get the following model of the problem:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Theta = \sum_{i=0}^{N-1} o_i(a_{ij}^k) \rightarrow \max, \\ r \geq r_e, \\ \sum_{i=0}^{N-1} g_{ij}^k \leq G, \end{array} \right. \quad (9)$$

where $r = \min_j r_j$.

The problem (9) can be solved by the method of functional equations, which is suitable for solving dynamic programming tasks. The use of adaptive ontologies in IA KB allows reducing the task of planning activities to the task of dynamic programming [14–15].

5 RESULTS

For the SEC without IA, the statistics of the visit are rather chaotic and uncontrolled (Fig. 4).

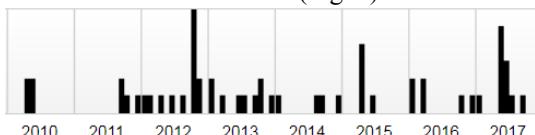
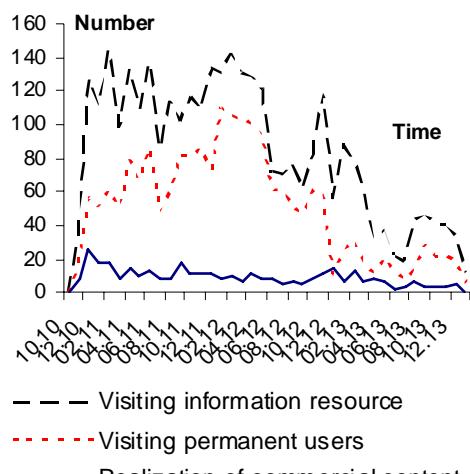
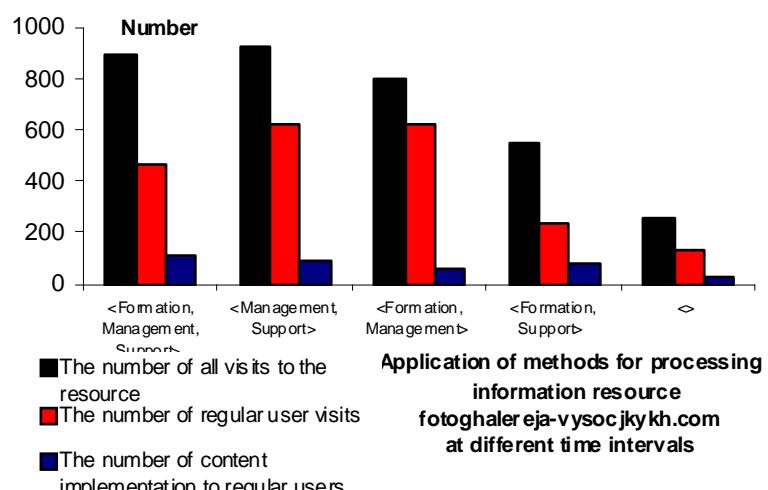


Figure 4 – An example of visiting the information resource (travelua.org) for Internet tourism

For a detailed analysis of the functioning of the SEC as an Internet newspaper and Internet journal, different systems with different types of IAs were developed and implemented, maintaining for each of them a different number of stages of the content lifecycle. That is, not all types of IAs have been developed for different implemented SECs or IAs have not been developed at all. Tabl 1 provides a list of implemented SECs indicating the availability of implemented IAs with maintenance of the content lifecycle.



a



b

Figure 5 – Statistical analysis of the fotoghalereja-vysocjkykh.com functioning: a – diagram of relations; b – graph of dependency

Table 1 – Implementation of various IAs in the SEC

No	URL	Type	IA
1	fotoghalereja-vysocjkykh.com	journal	C2B,B2C
2	v golos.com.ua	newspaper	C2B,B2C,B2B
3	tatjana.in.ua	journal	B2C
4	presstime.com.ua	newspaper	C2B,B2C
5	www.autochip.vn.ua	journal	C2B,B2C
6	kursyvalyut.com	newspaper	C2B,B2C,B2B
7	dobryjranok.com	newspaper	C2B,B2C
8	goodmorningua.com	newspaper	B2B
9	зсш3львін.ua	newspaper	C2B
10	victana.lviv.ua	journal	C2B,B2C,B2B

Analysis of the results of IA actions can determine the causes of the formation of the target audience by the set of characteristics of the functioning of the SEC. By regulating the content, its uniqueness, the efficiency of its formation and its adequate management according to the individual needs of a regular user, one can model the boundaries of the target social audience and the number of unique visitors from search engines.

In fig. 5–6 the results of the work of the developed systems in the form of charts are presented, from which it follows that in the presence of all types of IA significantly increases the volume of visits and unique users.

The fig. 5 presents a result of statistical analysis of the fotoghalereja-vysocjkykh.com functioning. The fig. 5a shows a dependence of selling commercial content from visiting information resource fotoghalereja-vysocjkykh.com. The fig. 5b shows the correlation of the visit to the information resource of fotoghalereja-vysocjkykh.com and the implementation of commercial content, depending on the application of methods for processing commercial content. The fig. 6 presents the result of statistical analysis of the Victana functioning. The fig. 6a shows the statistical distribution of visits to the information resource victana.lviv.ua and the implementation of commercial content. The fig. 6b shows

a dependence of the visit to the information resource victana.lviv.ua and the implementation of commercial content from the connection of software for the processing of information content. The service of the statistics of visits to the information resource of the SEC allows us to estimate the increase in the volume of sales of content from the direct proportional dependence of the increase in the number of visits to the information resource, the number of regular users, the promise of marketing activities (Fig. 7a). The fig. 7b presents a mathematical expectation of commercial content realization through the information resource. The fig. 8

shows a result of statistical analysis of the information resource victana.lviv.ua visiting pages per session.

6 DISCUSSION

The presence of different types of IA in SEC increases in sales of goods and / or services a regular user of 9%, the active involvement of unique visitors, potential users and expanding the boundaries of the target and regional audience by 11%, page views by 12%, time of visit information resources on 7%. So cumulative (fig. 9a) and median filtering (fig. 9b) for information resource victana.lviv.ua visit pages per session is shown in Fig. 9.

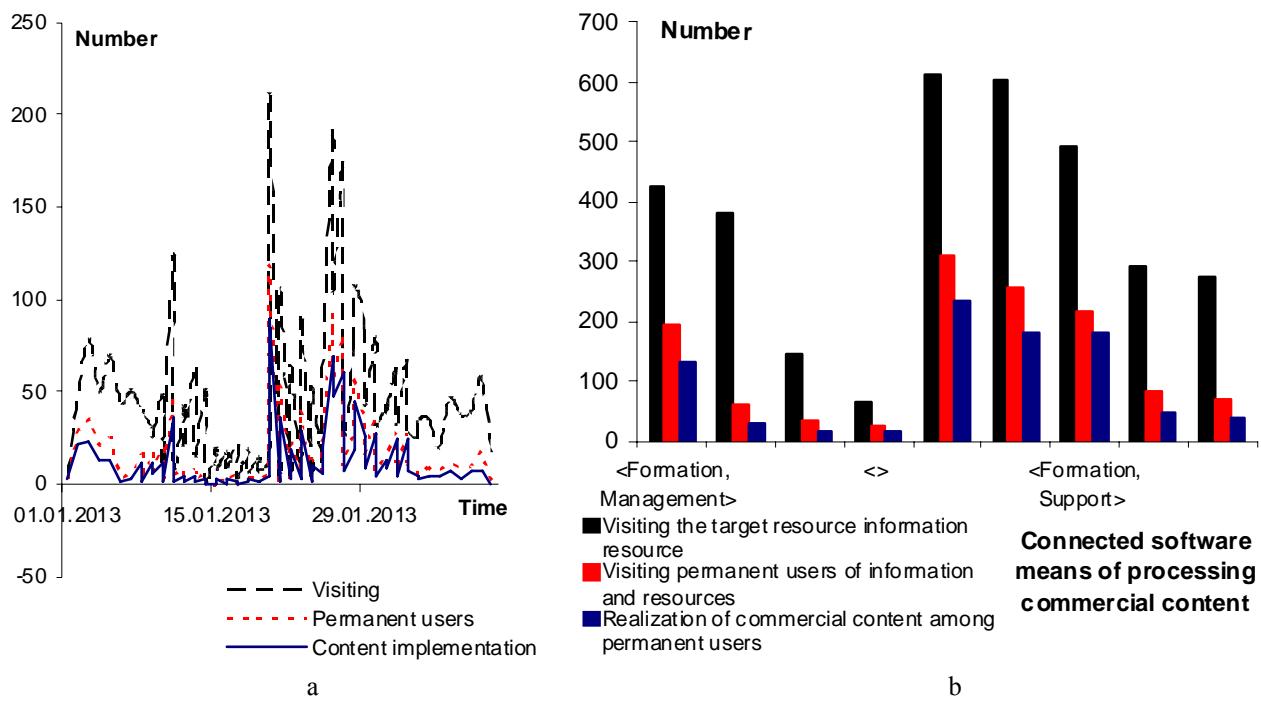


Figure 6 – Statistical analysis of the Victana functioning: a – diagram of relations; b – graph of dependency

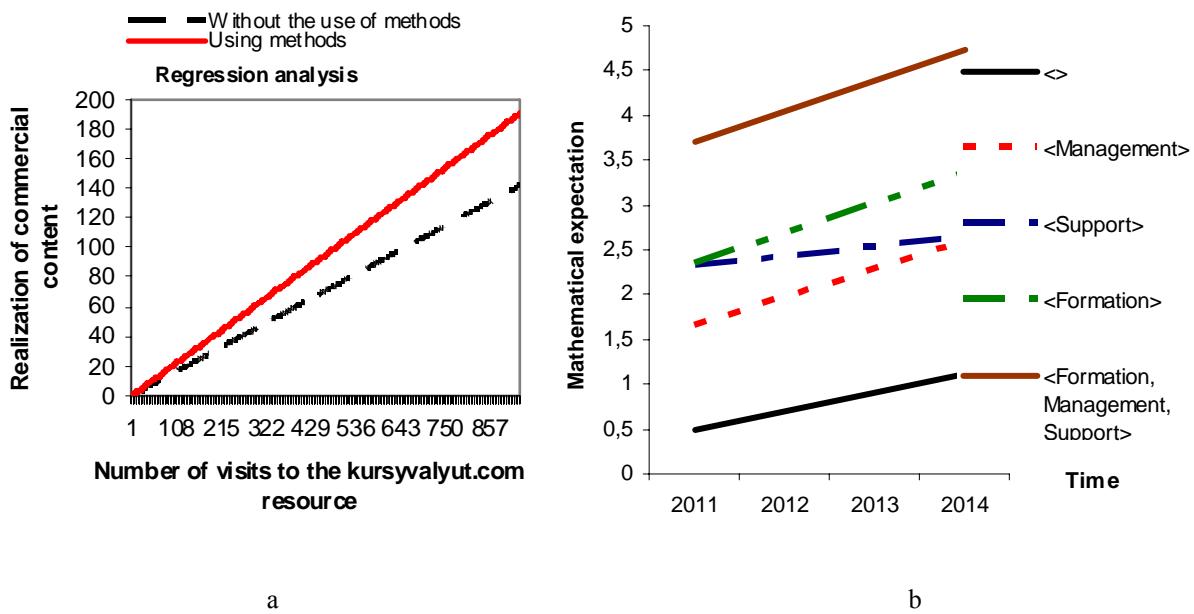


Figure 7 – Regression analysis of the increase in content sales: a – diagram of regression analysis for visits to the kursyvalyut.com resource; b – diagram of mathematical expectation of commercial content realization through the information resource

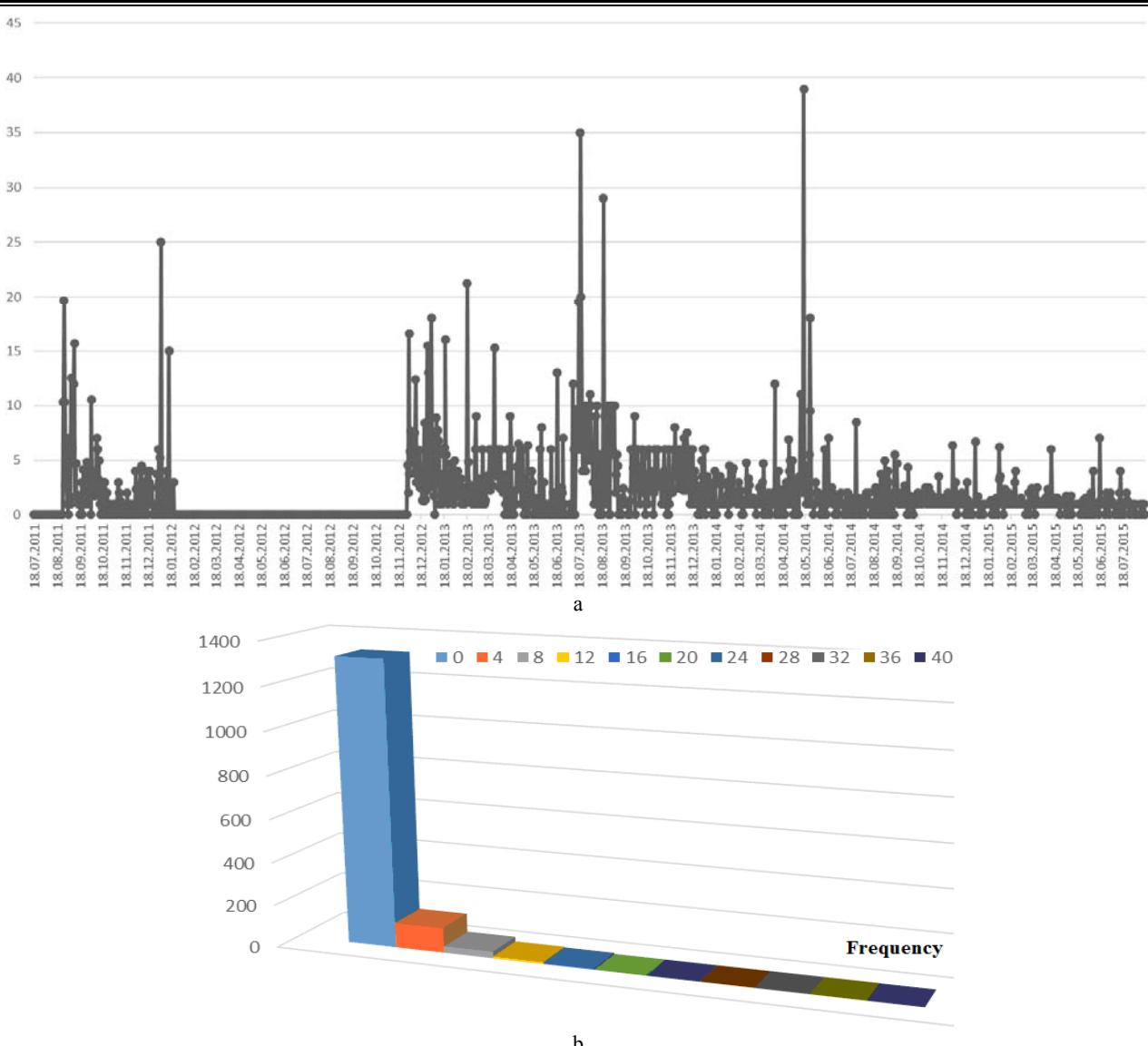


Figure 8 – For information resource victana.lviv.ua visiting pages per session: a – diagram of relations; b – graph of dependency

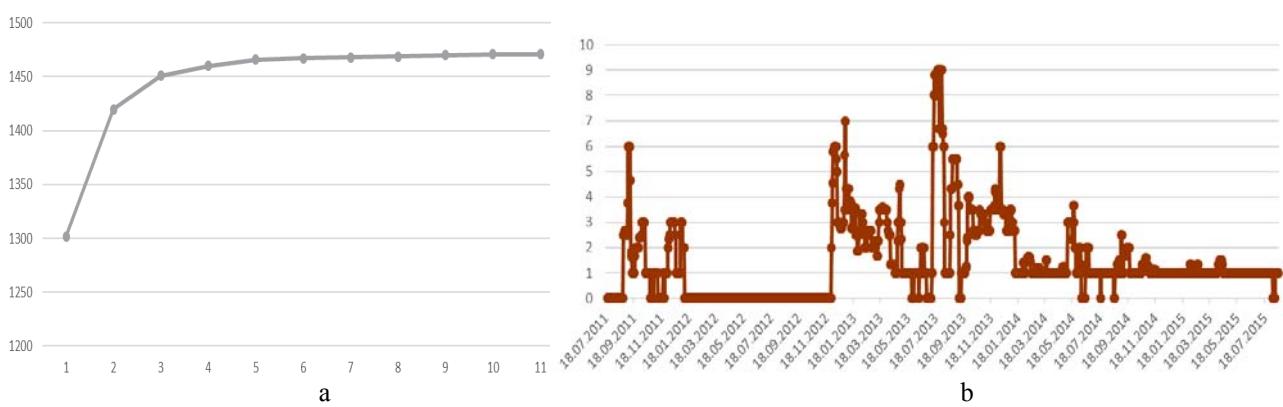


Figure 9 – Statistical analysis of the visiting information resource victana.lviv.ua: a – cumulate of relations; b – graph of Median Filtering

For an agglomeration hierarchical cluster analysis, it is advisable to choose the strategy of the “closest neighbor” for unification (since the proximity matrix consists of only 5 objects). The distance between the two groups is defined as the distance between the two closest elements

of these groups (Fig. 10). This strategy is monotonous and greatly compresses the space of signs.

We will now analyze the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C (Fig. 11–12).

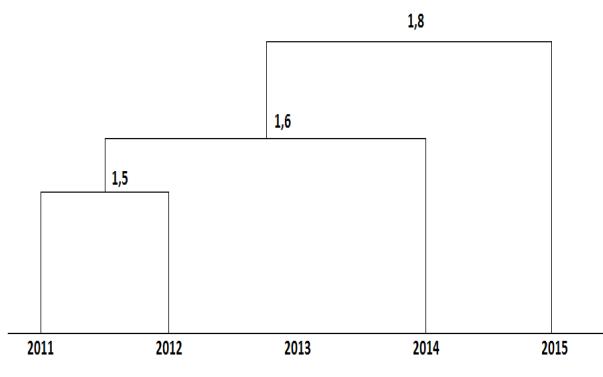
	2011	2012	2013	2014	2015
2011	0	1,5	2,1	2,3	2
2012	1,5	0	2,4	1,6	1,8
2013	2,1	2,4	0	2	2,8
2014	2,3	1,6	2	0	2,4
2015	2	1,8	2,8	2,4	0

	[2011,2012]	2013	2014	2015
[2011,2012]	0	2,1	1,6	1,8
2013	2,1	0	2	2,8
2014	1,6	2	0	2,4
2015	1,8	2,8	2,4	0

	[2011,2012,2014]	2013	2015
[2011,2012,2014]	0	2	1,8
2013	2	0	2,8
2015	1,8	2,8	0

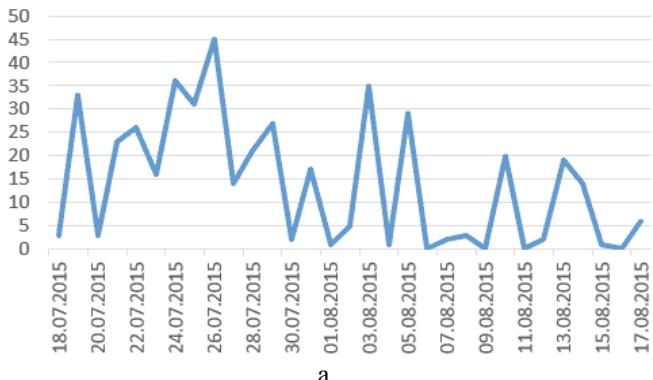
	[2011,2012,2014,2015]	2013
[2011,2012,2014,2015]	0	2

a

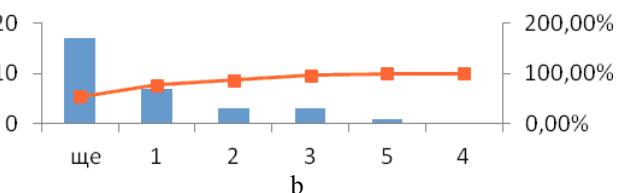


b

Figure 10 – Statistical analysis of the visiting resource victana.lviv.ua: a – stages of the “closest neighbor” strategy; b – dendrogram of dependency

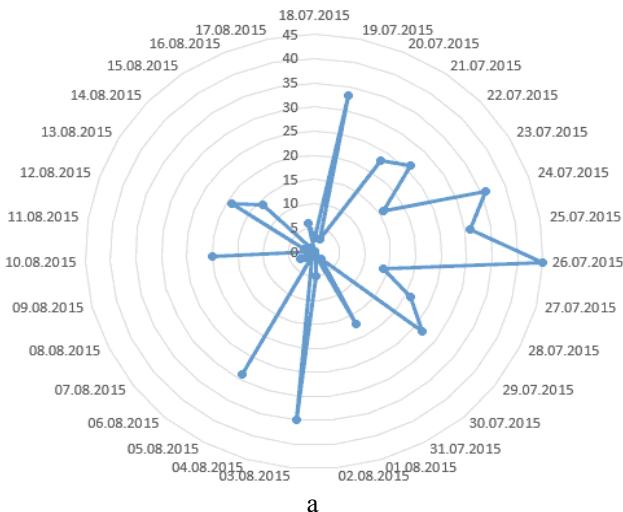


a

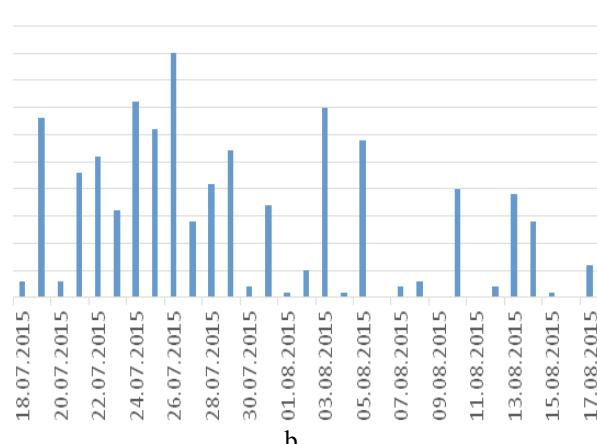


b

Figure 11 – Statistical analysis of the visits on the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C: a – schedule of relations; b – cumulative of dependency



a



b

Figure 12 – Statistical analysis of the visits on the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C: a – visit schedule of relations; b – histogram cumulative of dependency

The fig. 11a shows the time line diagram of visits on the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C. The fig. 11b shows cumulative diagram of visits on the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C. The site visits are going down in time for the information resource of the IA type B2C. This shows on fig. 12 also. Fig. 12a shows the time line diagram of visits on the information resource of the IA type B2C. Fig. 12b shows the histogram cumulative of visits on the information resource tatjana.in.ua from the IA type B2C. In fig. 13 is dendrogram, of visit on tatjana.in.ua.

In fig. 14 gives the result of finding the trend in a time series of smoothing methods for the information resource tatjana.in.ua without IA. Fig. 14a shows original data on smoothing time line diagram for the visit on the information resource of the IA type B2C. Fig. 14b shows smoothing time line diagram for the visit on the

information resource of the IA type B2C where smoothing coefficient $w=3$. Fig. 14c shows smoothing time line diagram for the visit on the information resource of the IA type B2C where smoothing coefficient $w=5$.

CONCLUSIONS

The mathematical support and method of action planning of IA based on adaptive ontologies are developed. This method can be used to effectively operate IA in a competitive environment of the SEC, which is modeled by Boyd's loop. Adaptive ontology is used to plan IA actions. To this end, we have added two scalar quantities (the importance of concepts and relationships) that are used to find an effective way to implement the IA plan in a generally accepted three-element tuple that defines an ontology (a set of concepts, relationships, and

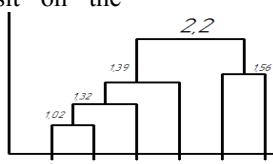


Figure 13 – Visit the dentrogram tatjana.in.ua

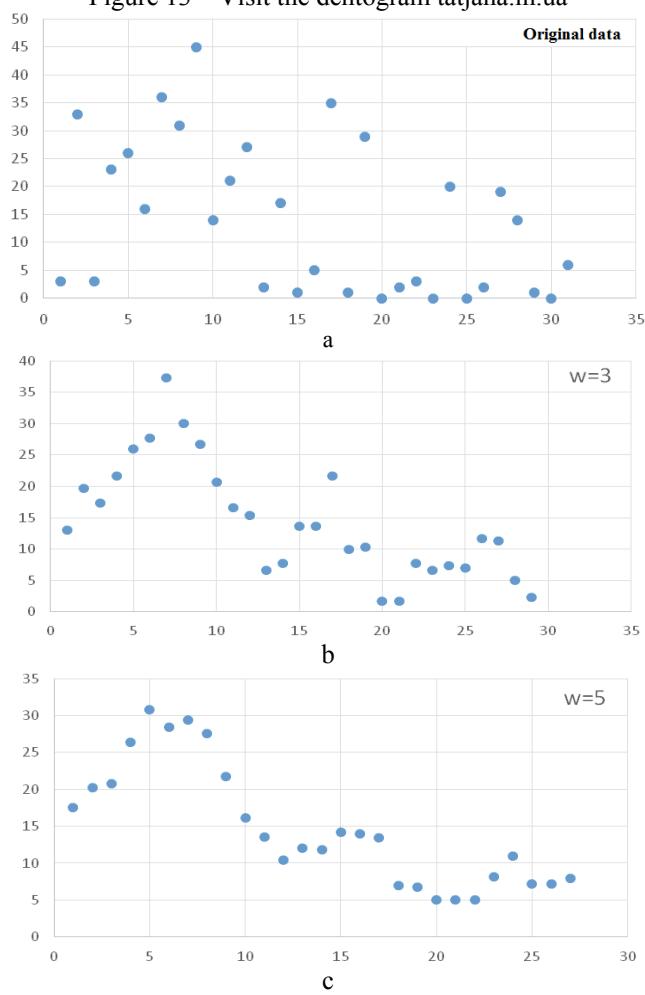


Figure 14 – Smoothing schedule for the visit on the information resource of the IA type B2C: a – original data on smoothing time line diagram; b – smoothing time line diagram where smoothing coefficient $w=3$; c – smoothing time line diagram where smoothing coefficient $w=5$

their interpretation). Such an assessment of the ontology elements allows to reduce the task of planning IA actions in a competitive environment to the task of dynamic programming. The scientific novelty of the article is the development of a method and mathematical support for the use of ontologies at the stage of Boyd's loop orientation for constructing an effective IA action plan for SEC. The presence of all types of IAs in the SEC leads to an increase in the volumes of sales of goods and / or services to a constant user by 9%, the active involvement of unique visitors, potential users and the expansion of the target and regional audience by 11%, revised pages by 12%, time of information resource visits to 7%.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was performed within the framework of the state budget theme "Methods and means of functioning of decision-support systems on the basis of ontologies" (ID: 839 2017-05-15 09:20:01 (2459-315)). The research was carried out within the framework of joint research of the department of information systems and networks of Lviv Polytechnic National University on the topic "Research, development and implementation of intelligent distributed information technologies and systems based on database resources, data warehouses, data spaces and knowledge to accelerate the processes of forming modern information society". Scientific researches were also carried out within the framework of the research topics of the Information System and Network Department at 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. Ivlev A. A. Osnovy teorii Boyd. Napravleniya razvitiya, primeneniya i realizatsii. Moscow, 2008, 68 p.
2. Gruber T. A translation approach to portable ontologies, *Knowledge Acquisition*, 1993, No. 5 (2), pp. 199–220.
3. Guarino N. Formal Ontology, Conceptual Analysis and Knowledge Representation, *International Journal of Human-Computer Studies*, 1995, No. 43(5–6), pp. 625–640.
4. Sowa J. Conceptual Graphs as a universal knowledge representation, In: *Semantic Networks in Artificial Intelligence, Spec. Issue of An International Journal Computers & Mathematics with Applications*. (Ed. F. Lehmann), 1992, Vol. 23, No. 2–5, Part 1, pp. 75–95.
5. Vysotska V., Chyrun L. Analysis features of information resources processing Process, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 14–17 September, 2015, proceedings. Lviv, IEEE, 2015, pp. 124–128.
6. Vysotska V., Hasko R., Kuchkovskiy V. Process analysis in electronic content commerce system, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 14–17 September, 2015, proceedings. Lviv, IEEE, 2015, pp. 120–123.
7. Myklich K., Burov Y. Algebraic model for knowledge representation in situational awareness systems, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 165–167.
8. Myklich K., Burov Y. Uncertainty in situational awareness systems, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, XIIIth International Conference, Lviv, 23–26 February, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 729–732.
9. Myklich K., Burov Y. Algebraic Framework for Knowledge Processing in Systems with Situational Awareness, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Springer, pp. 217–228.
10. Vysotska V. Linguistic Analysis of Textual Commercial Content for Information Resources Processing, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, XIIIth International Conference, Lviv, 23–26 February, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 709–713.
11. Myklich K., Burov Y. Research of uncertainties in situational awareness systems and methods of their processing, *EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies*, 2016, Vol. 1(79), pp. 19–26.
12. 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, Bucharest, Romania, 21–23 September, 2017, proceedings. Bucharest, IEEE, 2017, pp. 573–578.
13. Vysotska V., Chyrun L., Chyrun L. The Commercial Content Digest Formation and Distributional Process, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 186–189.
14. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Identifying keywords on the basis of content monitoring method in ukrainian texts, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 1(36), pp. 74–83.
15. Bisikalo O. V., Vysotska V. A. Sentence syntactic analysis application to keywords identification Ukrainian texts, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2016, Vol. 3(38), pp. 54–65.
16. 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*, 2016, Vol. 4(39), pp. 54–67.
17. Aleksieieva K., Berko A., Vysotska V. Technology of commercial web-resource management based on fuzzy logic, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2015, Vol. 3(34), pp. 71–79.
18. Vysotska V., Chyrun L., Chyrun L. Information Technology of Processing Information Resources in Electronic Content Commerce Systems, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 212–222.
19. Korobchinsky M. Vysotska V., Chyrun L., Chyrun L. Peculiarities of Content Forming and Analysis in Internet Newspaper Covering Music News, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017, proceedings. Lviv, IEEE, 2017, pp. 52–57.
20. Naum O. Chyrun L., Kanishcheva O., Vysotska V. Intellectual System Design for Content Formation, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*,

- International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017, proceedings.* Lviv, IEEE, 2017, pp. 131–138.
21. Gonçalves M.A., Fox E.A., nWatson L. T., Kipp N. A. Streams, Structures, Spaces, Scenarios, Societies (5S): A Formal Model for Digital Libraries, *ACM Transactions on Information Systems (TOIS)*, 2004, Vol. 22(2), pp. 270–312.
22. Gonçalves M. A. Streams, Structures, Spaces, Scenarios, and Societies (5S): A Formal Model for Digital Library Framework and Its Applications, *PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University*, November 2004. <https://pdfs.semanticscholar.org/fef2/c2c42328ccbeef3705a99b0ae9462749bd6.pdf>.
23. Pérez A., Enrech M. Defining library services for a virtual community, *Centre for research in Library and Information Management (CERLIM), Libraries Without Walls Conference, Lesvos, Greece, 10–14 September 1999, proceedings*. London, Library Association, pp. 98–109.
24. Pérez A., Enrech M. Virtual Library Services for a Virtual University: User-Oriented Virtual Sites in an Open Library, Wiring the ivory tower, linking universities across europe (EADTU) : Millenium conference, Paris, 28–30 September 2001 : proceedings. Paris, Universitat Oberta de Catalunya. Access mode : <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/318>.
25. Stoffle Carla J. The Emergence of Education and Knowledge Management as Major Functions of the Digital Library, *Follett Lecture Series, Consulted 22nd May 2000*, <http://www.ukoln.ac.uk/services/papers/follett/stoffle/paper.html>.
26. Rashkevych Y., Peleshko D., Vynokurova O., Izonin I., Lotoshynska N. Single-frame image super-resolution based on singular square matrix operator, *Electrical and Computer Engineering (UKRCON), 1th Ukraine Conference, Kyiv, Ukraine 29 May–2 June 2017, proceedings*. Kyiv, IEEE, pp. 944–948.
27. Tkachenko R., Tkachenko P., Izonin I., Tsymbal Y. Learning-based image scaling using neural-like structure of geometric transformation paradigm, *Studies in Computational Intelligence*, 2018, Vol. 730, Springer-Verlag, pp. 537–565.
28. Maksymiv O., Rak T., Peleshko D. Video-based Flame Detection using LBP-based Descriptor: Influences of Classifiers Variety on Detection Efficiency, *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 2017, Vol. 9(2), pp. 42–48.
29. Peleshko D., Rak T., Izonin I. Image Superresolution via Divergence Matrix and Automatic Detection of Crossover, *International Journal of Intelligent Systems and Application*, 2016, Vol. 8(12), pp. 1–8.
30. Chernukha O., Bilushchak Y. Mathematical modeling of random concentration field and its second moments in a semispace with erlangian distribution of layered inclusions, *Task Quarterly*, 2016, Vol. 20(3), pp. 295–334.
31. Rusyn B., Lutsyk O., Lysak O., Lukeniuk A., Pohreliuk L. Lossless Image Compression in the Remote Sensing Applications, *Data Stream Mining & Processing (DSMP) : First International Conference, Lviv, 23–27 August, 2016, proceedings*. 2016, Lviv, IEEE, pp. 195–198.
32. Kowalik D. Polish vocational competence standards for the needs of adult education and the European labour market, *Advanced Information Engineering and Education Science (ICAES) : International Conference, China, December 19–20, 2013, proceedings*. Beijing, IEEE, 2013, pp. 95–98.
33. Zhezhnych P., Markiv O. Linguistic Comparison Quality Evaluation of Web-Site Content with Tourism Documentation Objects, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, Vol. 689, pp. 656–667.
34. Mobasher B. Data mining for web personalization, *The adaptive web*, Springer, 2007, pp. 90–135.
35. Dinucă C. E. Ciobanu D. Web Content Mining. In: University of Petroşani, *Economics*, 2012, P. 85.
36. Xu G. Y. Zhang, L. Li Web content mining / G. Xu, // *Web Mining and Social Networking*, 2011, Springer, pp. 71–87.
37. Ganesh J.A. A Comparative Study of Stemming Algorithms, *International Journal Comp. Tech.*, 2011, pp. 1930–1938. Access: <https://pdfs.semanticscholar.org/1c0c/0fa35d4ff8a2f925eb955e48d655494bd167.pdf>.
38. Khomitska I., Teslyuk V. The Method of Statistical Analysis of the Scientific, Colloquial, Belles-Lettres and Newspaper Styles on the Phonological Level, *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2017, Vol. 512, pp. 149–163.
39. Davydov M., Lozynska O. Mathematical Method of Translation into Ukrainian Sign Language Based on Ontologies, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2018, Vol. 689, pp. 89–100.
40. Khomitska I., Teslyuk V. Specifics of Phonostatistical Structure of the Scientific Style in English Style System, Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016, proceedings. Lviv, IEEE, 2016, pp. 129–131.
41. Davydov M., Lozynska O. Information System for Translation into Ukrainian Sign Language on Mobile Devices, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017, proceedings*. Lviv, IEEE, 2017, pp. 48–51.
42. Davydov M., Lozynska O. Linguistic Models of Assistive Computer Technologies for Cognition and Communication, *Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017, proceedings*. Lviv, IEEE, 2017, pp. 171–175.

Received 14.05.2018.
Accepted 20.06.2018.

УДК 004.9

ПЛАНУВАННЯ ДІЯЛЬНОСТІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АГЕНТІВ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОННОЇ КОМЕРЦІЇ

Берко А. Ю. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Висоцька В. А. – канд. техн. наук, професор, доцент кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Литвин В. В. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Інформаційні системи та мережі», Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна.

Наум О. М. – асистент кафедри «Інформаційні системи і технології», Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка, Дрогобич, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Сьогодні електронна комерція є одним з найактивніших та найбільш перспективних сегментів глобальної економіки, для якого характерним є стало зростання обсягів та активне вдосконалення засобів і технологій. Інтелектуалізація систем електронної комерції сьогодні є одним з основних трендів їх розвитку та ефективного функціонування в конкурентному середовищі. Одним з найперспективніших засобів вирішення цієї категорії задач є використання інтелектуальних агентів (ІА). Сучасний підхід до моделювання процесу підтримки прийняття рішень, зокрема, в електронній комерції використовує принцип петлі Бойда, який передбачає багаторазове повторення циклу з чотирьох послідовних взаємопов'язаних процесів (етапів): спостереження – орієнтація – прийняття рішення – дія. Згідно із гіпотезою Бойда – вища швидкість виконання циклу і точність оцінок етапів циклу забезпечує перевагу над конкурентом.

Метою дослідження є розроблення засобів ефективного планування дій інтелектуальних агентів систем електронної комерції в конкурентному середовищі на основі онтологій, та зведення задачі планування дій інтелектуальних агентів до задачі динамічного програмування.

Метод. Розроблено математичне забезпечення та метод планування дій ІА на основі адаптивних онтологій. Цей метод можна використати для ефективного функціонування ІА у конкурентному середовищі СЕК, яке моделюється петлею Бойда. Для планування дій ІА використано адаптивну онтологію. З цією метою у загальноприйнятій трьохелементний кортеж, який задає онтологію (множина понять, відношень та їх інтерпретація), нами додано дві скалярні величини (важливість понять та відношень), які використовуються для пошуку ефективного шляху реалізації плану ІА. Така оцінка елементів онтології дає змогу звести задачу планування дій ІА в конкурентному середовищі до задачі динамічного програмування.

Результати. У статті побудовано модель планування дій інтелектуальних агентів систем електронної комерції з використанням онтологічного підходу. Розроблено метод оцінки дій інтелектуальних агентів на основі адаптивних онтологій. Така оцінка дає змогу звести задачу планування дій до задачі динамічного програмування.

Висновки. Аналіз результатів дій ІА дозволяє визначити причини формування цільової аудиторії за набором характеристик функціонування СЕК. Регулюючи тематичний набір контенту, його унікальність, оперативність його формування та адекватне управління ним згідно індивідуальних потреб постійного користувача, можна моделювати межі цільової соціальної аудиторії та кількість унікальних відвідувачів з пошукових систем. На рис. 5-6 подані результати роботи розроблених систем у вигляді графіків, з яких випливає, що при наявності всіх типів ІА суттєво збільшується обсяг відвідувань та унікальних користувачів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: інтелектуальний агент, онтологія, планування, електронна комерція.

УДК 004.9

ПЛАНИРОВАНИЕ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОННОЙ КОММЕРЦИИ

Берко А. Ю. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Высоцкая В. А. – канд. техн. наук, профессор, доцент кафедры «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Лытвун В. В. – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и сети», Национальный университет «Львовская политехника», Украина.

Наум О. М. – ассистент кафедры «Информационные системы и технологии», Дрогобычский государственный педагогический университет имени Ивана Франко, Дрогобич, Украина.

АНОТАЦІЯ

Актуальность. Сегодня электронная коммерция является одним из самых активных и наиболее перспективных сегментов глобальной экономики, для которого характерно устойчивый рост объемов и активное совершенствование средств и технологий. Интеллектуализация систем электронной коммерции сегодня является одним из основных трендов их развития и эффективного функционирования в конкурентной среде. Одним из самых перспективных способов решения этой категории задач является использование интеллектуальных агентов (ІА). Современный подход к моделированию процесса поддержки принятия решений, в частности, в электронной коммерции использует принцип петли Бойда, который предусматривает многократное повторение цикла из четырех последовательных взаимосвязанных процессов (этапов): наблюдение – ориентация – принятие решения – действие. Согласно гипотезе Бойда – высокая скорость выполнения цикла и точность оценок этапов цикла обеспечивает преимущество над конкурентом.

Целью исследования является разработка средств эффективного планирования действий интеллектуальных агентов систем электронной коммерции в конкурентной среде на основе онтологий, и сведения задачи планирования действий интеллектуальных агентов к задаче динамического программирования.

Метод. Разработаны математическое обеспечение и метод планирования действий ІА на основе адаптивных онтологий. Этот метод можно использовать для эффективного функционирования ІА в конкурентной среде СЕК, которое моделируется петлей Бойда. Для планирования действий ІА использовано адаптивную онтологию. С этой целью в общепринятый Трехэлементный кортеж, который задает онтологию (множество понятий, отношений и их интерпретация), нами добавлено две скалярные величины (важность понятий и отношений), которые используются для поиска

эффективного пути реализации плана ИА. Такая оценка элементов онтологии позволяет свести задачу планирования действий ИА в конкурентной среде к задаче динамического программирования.

Результаты. В статье построена модель планирования действий интеллектуальных агентов систем электронной коммерции с использованием онтологического подхода. Разработан метод оценки действий интеллектуальных агентов на основе адаптивных онтологий. Такая оценка позволяет свести задачу планирования действий в задачи динамического программирования.

Выводы. Анализ результатов действий ИА позволяет определить причин формирования целевой аудитории по набору характеристик функционирования СЕК. Регулируя тематический набор контента, его уникальность, оперативность его формирования и адекватное управление им в соответствии индивидуальных потребностей постоянного пользователя, можно моделировать пределы целевой социальной аудитории и количество уникальных посетителей из поисковых систем. На рис. 5–6 представлены результаты работы разработанных систем в виде графиков, из которых следует, что при наличии всех типов ИА существенно увеличивается объем посещений и уникальных пользователей.

Ключевые слова: интеллектуальный агент, онтология, планирование, электронная коммерция.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Ивлев А. А. Основы теории Бойда. Направления развития, применения и реализации. М. ;, 2008. – 68 с.
2. Gruber T. A translation approach to portable ontologies / T.Gruber // Knowledge Acquisition. – 1993. – № 5 (2). – P. 199–220.
3. Guarino N. Formal Ontology, Conceptual Analysis and Knowledge Representation / N. Guarino // International Journal of Human-Computer Studies. – 1995. – № 43 (5–6). – P. 625–640.
4. Sowa J. Conceptual Graphs as a universal knowledge representation / J. Sowa // In: Semantic Networks in Artificial Intelligence, Spec. Issue of An International Journal Computers & Mathematics with Applications. (Ed. F. Lehmann). – 1992. – Vol. 23, № 2–5, Part 1. – P. 75–95.
5. Vysotska V. Analysis features of information resources processing Process / V. Vysotska, L. Chyrun // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 14–17 September, 2015 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2015. – P. 124–128.
6. Vysotska V. Process analysis in electronic content commerce system / V. Vysotska, R. Hasko., V. Kuchkovskiy // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 14–17 September, 2015 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2015. – P. 120–123.
7. Myklich K. Algebraic model for knowledge representation in situational awareness systems / K. Myklich, Y. Burov // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 165–167.
8. Myklich K. Uncertainty in situational awareness systems / K. Myklich, Y. Burov // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) : XIIIth International Conference, Lviv, 23–26 February, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 729–732.
9. Myklich K. Algebraic Framework for Knowledge Processing in Systems with Situational Awareness / K. Myklich, Y. Burov // Advances in Intelligent Systems and Computing. – Springer. – P. 217–228.
10. Vysotska V. Linguistic Analysis of Textual Commercial Content for Information Resources Processing / V. Vysotska // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET) : XIIth International Conference, Lviv, 23–26 February, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 709–713.
11. Myklich K. Research of uncertainties in situational awareness systems and methods of their processing / K. Myklich, Y. Burov // EasternEuropean Journal of Enterprise Technologies. – Vol. 1(79). – 2016. – P. 19–26.
12. 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, Bucharest, Romania, 21–23 September, 2017 : proceedings. – Bucharest : IEEE, 2017. – P. 573–578.
13. Vysotska V. The Commercial Content Digest Formation and Distributional Process / V. Vysotska, L. Chyrun, L. Chyrun // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 186–189.
14. 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. – 2016. – Vol. 1(36). – P. 74–83.
15. Bisikalo O. V. Sentence syntactic analysis application to keywords identification Ukrainian texts / O. V. Bisikalo, V. A. Vysotska // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2016. – Vol. 3(38). – P. 54–65.
16. 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. – 2016. – Vol. 4(39). – P. 54–67.
17. Alieksieieva K. Technology of commercial web-resource management based on fuzzy logic / K. Alieksieieva, A. Berko, V. Vysotska // Radio Electronics, Computer Science, Control. – 2015. – Vol. 3(34). – P. 71–79.
18. Vysotska V. Information Technology of Processing Information Resources in Electronic Content Commerce Systems / V. Vysotska, L. Chyrun, L. Chyrun // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 212–222.
19. Peculiarities of Content Forming and Analysis in Internet Newspaper Covering Music News / [M. Korobchinsky, V. Vysotska, L. Chyrun, L. Chyrun] // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2017. – P. 52–57.
20. Intellectual System Design for Content Formation / [O. Naum, L. Chyrun, O. Kanishcheva, V. Vysotska] // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2017. – P. 131–138.
21. Streams, Structures, Spaces, Scenarios, Societies (5S): A Formal Model for Digital Libraries / [M. A. Gonçalves, E. A. Fox, L. T. nWatson, N. A. Kipp] // ACM Transactions on Information Systems (TOIS). – 2004. – Vol. 22(2). – P. 270–312.

22. Gonçalves M. A. Streams, Structures, Spaces, Scenarios, and Societies (SS): A Formal Model for Digital Library Framework and Its Applications / M. A. Gonçalves // PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. – November 2004. – <https://pdfs.semanticscholar.org/fef2/c2c42328ccbeef3705a99b0ae9462749bd6.pdf>.
23. Pérez A. Defining library services for a virtual community / A. Pérez, M. Enrech // Centre for research in Library and Information Management (CERLIM) : Libraries Without Walls Conference, Lesvos, Greece, 10–14 September 1999 : proceedings. – London : Library Association. – P. 98–109.
24. Pérez A. Virtual Library Services for a Virtual University: User-Oriented Virtual Sites in an Open Library / A. Pérez, M. Enrech // Wiring the ivory tower, linking universities across europe (EADTU) : Millenium conference, Paris, 28–30 September 2001 : proceedings. – Paris : Universitat Oberta de Catalunya. – Access mode : <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/handle/10609/318>.
25. Stoffle Carla J. The Emergence of Education and Knowledge Management as Major Functions of the Digital Library /Carla J. Stoffle // Follett Lecture Series. – Consulted 22nd May 2000. – <http://www.ukoln.ac.uk/services/papers/follett/stoffle/paper.html>.
26. Single-frame image super-resolution based on singular square matrix operator / [Y. Rashkevych, D. Peleshko, O. Vynokurova et al.] // Electrical and Computer Engineering (UKRCON) : 1th Ukraine Conference, Kyiv, Ukraine 29 May – 2 June 2017 : proceedings. – Kyiv : IEEE. – P. 944–948.
27. Learning-based image scaling using neural-like structure of geometric transformation paradigm / [R. Tkachenko, P. Tkachenko, I. Izonin, Y. Tsymbal] // Studies in Computational Intelligence. – 2018. – Vol. 730. – Springer-Verlag. – P. 537–565.
28. Maksymiv O. Video-based Flame Detection using LBP-based Descriptor: Influences of Classifiers Variety on Detection Efficiency / O. Maksymiv, T. Rak, D. Peleshko // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2017. – Vol. 9(2). – P. 42–48.
29. Peleshko D. Image Superresolution via Divergence Matrix and Automatic Detection of Crossover / D. Peleshko, T. Rak, I. Izonin // International Journal of Intelligent Systems and Application. – 2016. – Vol. 8(12). – P. 1–8.
30. Chernukha O. Mathematical modeling of random concentration field and its second moments in a semispace with erlangian distribution of layered inclusions / O. Chernukha, Y. Bilushchak // Task Quarterly. – 2016. – Vol. 20(3). – P. 295–334.
31. Lossless Image Compression in the Remote Sensing Applications / [B. Rusyn, O. Lutsyk, O. Lysak et al.] // Data Stream Mining & Processing (DSMP) : First International Conference, Lviv, 23–27 August, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 195–198.
32. Kowalik D. Polish vocational competence standards for the needs of adult education and the European labour market / D. Kowalik // Advanced Information Engineering and Education Science (ICAES) : International Conference, China, December 19–20, 2013 : proceedings. – Beijing: IEEE, 2013. – P. 95–98.
33. Zhezhnych P. Linguistic Comparison Quality Evaluation of Web-Site Content with Tourism Documentation Objects / P. Zhezhnych, O. Markiv // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 689. – P. 656–667.
34. Mobasher B. Data mining for web personalization / B. Mobasher // The adaptive web. – 2007, Springer. – P. 90–135.
35. Dinucă C.E. Web Content Mining. In: University of Petroșani / C. E. Dinucă, D Ciobanu // Economics. – 2012. – P. 85.
36. Xu G. Web content mining / G. Xu, Y. Zhang, L. Li // Web Mining and Social Networking. – 2011, Springer. – P. 71–87.
37. Ganesh J.A. A Comparative Study of Stemming Algorithms / J. A. Ganesh // International Journal Comp. Tech. – 2011. – P. 1930–1938. – Access: <https://pdfs.semanticscholar.org/1c0c/0fa35d4ff8a2f925eb955e48d655494bd167.pdf>.
38. Khomytska I. The Method of Statistical Analysis of the Scientific, Colloquial, Belles-Lettres and Newspaper Styles on the Phonological Level / I. Khomytska, V. Teslyuk // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2017. – Vol. 512. – P. 149–163.
39. Davydov M. Mathematical Method of Translation into Ukrainian Sign Language Based on Ontologies / M. Davydov, O. Lozynska // Advances in Intelligent Systems and Computing. – 2018. – Vol. 689. – P. 89–100.
40. Khomytska I. Specifics of Phonostatistical Structure of the Scientific Style in English Style System/ I. Khomytska, V. Teslyuk // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 06–10 September, 2016 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2016. – P. 129–131.
41. Davydov M. Information System for Translation into Ukrainian Sign Language on Mobile Devices/ M. Davydov, O. Lozynska // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2017. – P. 48–51.
42. Davydov M. Linguistic Models of Assistive Computer Technologies for Cognition and Communication / M. Davydov, O. Lozynska // Computer Sciences and Information Technologies (CSIT) : International Conference, Lviv, 11–14 September, 2017 : proceedings. – Lviv : IEEE, 2017. – P. 171–175.

UDC 004.75

COMPARISON OF BLOCK EXPECTATION TIME FOR VARIOUS CONSENSUS ALGORITHMS

Kaidalov D. S. – PhD, Research Fellow at Input Output HK.

Kovalchuk L. V. – Dr. Sc., Professor, Department of Mathematical Methods of Information Security, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Research Fellow at Input Output HK.

Nastenko A. O. – PhD, Research Fellow at Input Output HK.

Rodinko M. Yu. – Post-graduate student, Department of Information Systems and Technologies Security, V. N. Karazin Kharkiv National University, Research Fellow at Input Output HK.

Shevtsov O. V. – PhD, Research Fellow at Input Output HK.

Oliynykov R. V. – Dr. Sc., Professor, Department of Information Systems and Technologies Security, V. N. Karazin Kharkiv National University, Research Fellow at Input Output HK.

ABSTRACT

Context. We consider security properties of decentralized blockchain-based consensus protocols. The object of research is block confirmation time for users to get assurance that their transaction will not be reverted.

Objective. The goal of the paper is to analyze double-spend attacks on the different blockchain-based systems and compare resulting probabilities of attacker's success.

Method. We presented two models for two types of attacks on the Ouroboros protocol (for the general and covert adversaries). The models allow calculating the exact number of slots needed to achieve the required level of security. It was shown that the Ouroboros protocol allows achieving the required security level with significantly shorter confirmation period in comparison with Bitcoin. We estimated minimal number of confirmation blocks and compare estimation time for Bitcoin, GHOST and Ouroboros protocols. As a measure of comparison, we considered transaction confirmation time for which the probability of a double-spend attack is less than 0.1%. We use different standard probability distribution and different properties of Markov chains and Random Walks to get comparison of estimated security properties of Bitcoin blockchain against three different models of Bitcoin double spend attack. The splitting attack based on the model where resources of honest participants are divided to compete different chains is applied to Bitcoin and GHOST consensus protocols. Properties of Markov chains and Random Walks are also applied to obtain security estimations for the Ouroboros protocol.

Results. We developed methods to get specific numbers for average block confirmation time for Ouroboros protocol. We compared minimal number of confirmation blocks needed to ensure a high security for considered protocols: Bitcoin, GHOST and Ouroboros.

Conclusions. The obtained results allow determination of security bounds for the Bitcoin, GHOST and Ouroboros consensus protocols. Users of the practically deployed blockchain systems may get specific parameters for a given assurance level.

KEYWORDS: blockchain, Bitcoin, proof-of-work, GHOST, proof-of-stake, Ouroboros.

ABBREVIATIONS

GHOST is a Greedy Heaviest-Observed Sub-Tree;
HM is an honest miner;
MM is a malicious miner;
PoW is a Proof of Work;
PVSS is a Publicly Verifiable Secret Sharing.

NOMENCLATURE

α is some small probability;
 α_z the probability that an adversary would be able to catch up when he is z blocks behind;
 m is the number of blocks in the honest chain;
 $m(w) = (\lambda, \mu)$ is a state of the string w represented by two variables λ and μ ;
 $m(\varepsilon) = (0, 0)$ is the initial state of the algorithm;
 n is the number of blocks in the adversarial chain;
 p is the fraction of hashing power that is possessed by honest nodes (equivalent to the probability that an honest node finds the next block);

q is the fraction of adversarial hashing power (equivalent to the probability that an adversary finds next block);

q_K is the probability that an adversary would ever catch up with the deficit of K blocks;

t is the time advantage of an adversary towards fraudulent block production;

w is a characteristic string.

INTRODUCTION

The Bitcoin is a payment system where digitally signed transactions are grouped into blocks and stored securely in a structure called blockchain. A blockchain is a sequence of blocks linked via hash pointers where each new block contains a hash of the previous block. This structure preserves an ordered list of transactions that uniquely determines the state of the system.

Unlike other centralized payment systems, in Bitcoin, once a transaction is added to the blockchain, it could not be considered as confirmed immediately. A user needs to wait some time to be sure that the transaction is set in stone in the blockchain. This is because of decentralized

nature of the system where everyone can add blocks to the blockchain. To provide consistency among different users and to preserve inability to revert previously added blocks, a special mechanism is used called proof-of-work. The following idea underlies a proof-of-work system: a computational effort (calculation of a hash value below some target) should be applied to produce a block. Only a chain of blocks with the most computations would be considered valid.

As the blockchain technology evolves, the alternatives to the computationally heavy proof-of-work mechanism appear. The most promising one is called proof-of-stake: it does not require heavy computations to produce blocks, instead, a block producer is chosen through a fair procedure among all stakeholders in the system. The Ouroboros is a good example of such a system [1]. To the best of our knowledge, it is the first provably secure proof-of-stake protocol with rigorous security guarantees.

The concept of a blockchain could be undermined if someone would have a possibility to revert blocks by submitting a chain that would substitute the one currently accepted. For example, such possibility can result in the following attack: some buyer pays to a merchant with bitcoins, after the corresponding transaction is included into the blockchain, the merchant accepts a payment and sends a product to the buyer; upon receiving the product the buyer issues a conflicting chain of blocks which does not contain the payment to the merchant but instead sends coins back to the buyer. So as long as the merchant cannot be sure that the payment is irreversible, it would not be secure to deliver the product.

S. Nakamoto argues [2] that the system is secure (with some probability) against such attacks, unless 50% or more of the total computational power possessed by an adversary.

The described double-spend attack is relevant not only for Bitcoin, but also for other proof-of-work systems, for instance, those based on the GHOST algorithm [3], as well as for proof-of-stake systems, like Ouroboros.

The object of study is to focus on the block confirmation time needed to provide reasonable security guarantees for the users.

The subject of study is comparison of block expectation time for popular proof-of-work and proof-of-stake consensus algorithms.

The purpose of the work is to analyze known double-spend models for Bitcoin and evaluate how effective an adversary can be in terms of probability of successful attack. For that purpose we present new mathematical models for the Ouroboros protocol that allows calculating the security bounds for different types of adversaries. We also provide the results of splitting attack simulations for Bitcoin and GHOST algorithms.

1 PROBLEM STATEMENT

In this paper we describe known double-spend models for Bitcoin and present new mathematical models for the Ouroboros protocol that allow calculating the security bounds for different types of adversaries.

©Kaidalov D. S., Kovalchuk L.V., Nastenko A. O., Rodinko M. Yu., Shevtsov O. V., Oliynykov R. V., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-15

Suppose there is the set of miners which is divided into honest miners and malicious miners.

The input values are p , q and $\alpha = 0,001$.

The problem is: given p , q , α , find the minimal number z of confirmation blocks, that the probability of double-spend attack after these blocks is less than α .

We build the estimation for minimal number of confirmation blocks and also compare estimation time for different protocols: Bitcoin, GHOST and Ouroboros.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The existing mathematical models of the Bitcoin double-spend attack are presented in [1, 2, 4, 5, 6].

The first model of double-spend attack was introduced by S. Nakamoto in the original Bitcoin white paper [2]. S. Nakamoto considers the scenario when an adversary tries to generate secretly an alternate chain that would be longer (in terms of computational difficulty) than the honest chain.

M. Rosenfeld improved the Nakamoto's model in [5], but did not give any rigorous justification for it. Mathematically description of the attack was given for the first time in paper [6] by Grunspan and Perez-Marco. We also look into two models proposed by C. Pinzon et al. [4] that introduce a notion of time advantage to the original model that was analyzed by Nakamoto and Rosenfeld.

The splitting attack was described in [7] and could be considered as a variation of a double-spend attack since the main goal is to create a fork of the required length. The splitting attack for the GHOST protocol is slightly different compared to Bitcoin [7].

Let's consider a double-spend attack that could happen in a blockchain-based system [8]. As we briefly mentioned before, it does not really matter what type of consensus mechanism underlies the system, a double-spend could happen in both proof-of-work and proof-of-stake systems. Here we describe the main essence of the attack.

As it follows from the name, the whole idea of a double-spend attack is to use the same coins twice. In general, it implies that someone pays for some goods, but after receiving them, he/she reverts the payment so both goods and money are in the hands of the attacker. While it is infeasible to change the transaction with the payment itself (because that would require falsifying of a digital signature), it is possible to reject an entire block which includes the transaction. For doing this, an attacker needs to substitute a valid sub-chain of blocks with a new one that has a bigger score (score calculation depends on the actual blockchain type). Even though this attack requires tremendous resources (computational in the case of a proof-of-work or financial in the case of a proof-of-stake system), it could be profitable.

The attack involves next steps:

1. An adversary A wants to buy some goods from a merchant B . To do this, A creates a transaction tx_1 with a payment to B and sends it to the blockchain (Fig. 1).

2. B receives the payment from A , he waits for sufficient number of confirmations in the blockchain and then sends goods to A (Fig. 2).

3. A creates a conflicting transaction tx_2 where he redirects coins to his address, and tries to generate a forked block containing this transaction. Given that B waits for additional confirmations on top of the block with the payment, A needs to overcome all those blocks in his chain and create a fork with a higher score (Fig. 3).

4. If A is lucky to produce a fork of the main chain, the transaction tx_1 would be removed from the blockchain. Instead, the transaction tx_2 would be included. The network will continue with the chain of the adversary, so the payment to the merchant B would be lost forever (Fig. 4). At the same time, the adversary A seizes both goods and money.



Figure 1 – Initial state of the blockchain from the genesis block G . The transaction tx_1 is included just into the latest block

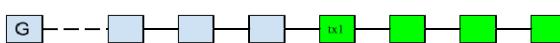


Figure 2 – Merchant B waits for 3 more blocks on top of the block with tx_1 and sends goods to A

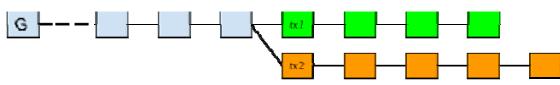


Figure 3 – An adversary creates a fork with a higher score



Figure 4 – The network continues with the chain of an adversary. tx_1 is substituted with tx_2

Even though specific techniques of fork creation could vary for different consensus protocols, the essence of the described attack remains the same for all of them.

Now we give an overview of the existing mathematical models of the Bitcoin double-spend attack.

In S. Nakamoto's model [2] given that an adversary starts with some deficit K (the honest chain is longer than adversarial on K blocks), the probability that an adversary would ever catching up with the honest chain is analogous to the Gambler's Ruin problem and could be calculated as follows:

$$q_K = \begin{cases} 1 & \text{if } p \leq q; \\ (q/p)^K & \text{if } p > q. \end{cases}$$

Assuming that an adversary starts to work on the malicious fork right after the payment transaction is included into the blockchain (so does not wait for z

blocks after which it is confirmed by the merchant), he may have mined some number of blocks so the deficit K is reduced. The adversarial progress will be a Poisson distribution with the expected value $\lambda = z \frac{q}{p}$.

The overall probability of the successful double-spend attack can be found by multiplying the Poisson density for each possible amount of progress by the probability of catching up with the remaining deficit:

$$\begin{aligned} DS_N(q, z) &= \\ &= \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} \cdot \begin{cases} (q/p)^{z-k}, & \text{if } k \leq z; \\ 1, & \text{if } k > z. \end{cases} = \\ &= 1 - \sum_{k=0}^z \frac{\lambda^k e^{-\lambda}}{k!} (1 - (q/p)^{z-k}). \end{aligned} \quad (1)$$

However, these results were obtained under assumptions that do not quite correspond to the real model. The first assumption that is also present in almost all other papers is the assumption that the time of generation of the block and the time of its appearance in the network coincide, so the block propagation delay is zero. But from this assumption it follows that the probability of an "accidental" fork is zero, and reality shows that such forks happen about 6 times per month. The second assumption is even more incorrect. It is as follows: if the probability of an event is p , then the number of tests in which there will be exactly n events, is exactly $\frac{n}{p}$. In fact, this means replacement of the random variable with its mathematical expectation, that is not entirely correct, to say it mildly.

Another well-known mathematical model for the Bitcoin double-spend attack, in addition to those presented by Nakamoto, is the model of M. Rosenfeld. In [5] he clarifies and expands the work of S. Nakamoto. The same basic model is taken: for a successful double-spend attack an adversary needs to catch up with $z = n - m$ blocks where n is the number of confirmations that a user waits to before sending goods, and m is the number of blocks that an adversary is expected to mine during the confirmation period.

M. Rosenfeld considers the catching-up process as a Markov chain, where each step is defined as finding of a block by an honest node or by an adversary:

$$z_{i+1} = \begin{cases} z_i + 1 & \text{with probability } p, \\ z_i - 1 & \text{with probability } q. \end{cases}$$

The attack succeeds if z ever reaches -1 . If $z < 0$ then $\alpha_z = 1$, otherwise

$$\alpha_z = p\alpha_{z+1} + q\alpha_{z-1}.$$

In this case, the probability to catch up with z blocks can be defined as follows:

$$\alpha_z = \min(q / p, 1)^{\max(z+1, 0)} = \\ = \begin{cases} 1, & \text{if } z < 0 \text{ or } q > p; \\ (q / p)^{z+1}, & \text{if } z \geq 0 \text{ and } q \leq p. \end{cases} \quad (2)$$

In the paper by Rosenfeld [5], other, and, as it turned out, more accurate analytical expressions for these probabilities were proposed, while a slightly different model was chosen for their production than those used by Nakamoto.

M. Rosenfeld models the progress as a negative binomial distribution. The probability that an adversary will mine a given number of blocks m during an honest miner will mine n blocks is

$$P(m) = \binom{m+n-1}{m} p^n q^m. \quad (3)$$

It follows that the probability of a successful double-spend attack, where a merchant waits for n confirmations and an adversary succeeds to find $m+1$ blocks during the confirmation period is equal to

$$DS_R(q, n) = \sum_{m=0}^{\infty} P(m) \alpha_{n-m-1} = \\ = \begin{cases} 1 - \sum_{m=0}^n \binom{m+n-1}{m} (p^n q^m - p^{m+1} q^{n+1}), & \text{if } q < p, \\ 1, & \text{if } q \geq p. \end{cases} \quad (4)$$

However, this paper did not provide any justification for this chosen model. The authors simply assumed that the appearance of “honest”/“dishonest” blocks in the network is described by a negative binomial distribution; though, this assumption was not substantiated there. In [5], the results were also obtained under the assumption that the propagation time of the block in the network is zero. Regarding Nakamoto’s second assumption, it is unclear how far the authors have noticed this fallacy; however, they did not use this assumption. For this reason, the numerical results in this paper differ from the results by Nakamoto, i.e. for the same probability of attack, Rosenfeld’s paper requires more confirmation blocks.

An interested reader could find more rigorous description of this model in the original paper [5].

It is worth to mention two theoretical models that were presented by C. Pinzon et al. [4].

The first one generalizes the model of M. Rosenfeld by adding an extra parameter that represents time-advantage of an adversary.

The second one that is called “a time-based model” is completely different from those described above. In this model, the lengths of the valid and adversarial chains are

assumed to be equal. Instead, the authors are focused on the time parameter t that represents the time difference between the n^{th} block in both the adversarial and honest chains.

Wonderful from the mathematical point of view, Grunspan’s paper [6] impresses with the mathematical rigor of his presentation and substantiation. In this paper, the authors prove what Rosenfeld suggested without proof – that the process of generating “honest”/“dishonest” blocks in the network is described by a negative binomial distribution. However, the authors could not, and even did not try to get rid of the same assumption on the instantaneous propagation of the block in the network.

As far as these models are consistent with the model of M. Rosenfeld and give almost the same results, we do not examine them deeply. Short descriptions are given in the Appendices A and B.

Since all considered models are intended to estimate the probability of the same double-spend attack in Bitcoin, the results are similar except differences between the models of S. Nakamoto and others. The models of C. Grunspan, M. Rosenfeld and C. Pinzon et al. give exactly similar results (assuming that time advantage in the models of C. Pinzon is equal to zero).

The Table 1 shows the values computed for different models. It represents the number of blocks that a user should wait for to be 99.9% sure that his transaction would not be reverted by an adversary.

Table 1 – The number of blocks that a user should wait to be 99.9% sure that his transaction would not be reverted by an adversary with the given hashing power

Adversarial hashing power	The model of S. Nakamoto	The models of Rosenfeld and Grunspan	The model of C. Pinzon (generalized)
0.1	5	6	5
0.15	8	9	8
0.2	11	19	12
0.25	15	20	19
0.3	24	32	32
0.35	42	58	58
0.4	89	133	134
0.45		539	541

It is worth noting that the presented theoretical models for the double-spend attack could also be applied to another Bitcoin-like proof-of-work systems.

Now let’s consider the splitting attack [7] which is targeted at the proof-of-work based protocols with a short block generation time that is comparable to the block propagation time in the network.

We will start with a general overview of a splitting attack, and then provide some experimental results showing possibility of its application to different proof-of-work consensus protocols.

In contrast to the classic double-spend attack, where an adversary is supposed to create a fork secretly and publish it after getting goods and only in case if his chain is longer, the splitting attack is public for all nodes from

the beginning. Moreover, not only an adversary contributes blocks into the forked branches but also honest nodes.

The idea of the attack is the following: when a fork of depth 1 accidentally happens, an adversary splits its hashing power on both branches to keep their lengths equal as long as possible. In this case honest miners would also be split due to their arbitrary choice between branches of equal lengths. When honest miners publish a new block in one of the branches, an adversary publishes block in the other branch to keep the fork running (see Fig. 5). If branches are of the same length, then adversary does nothing so again honest miners are split in half.

So the adversary tries to keep both chains balanced by their lengths. If lengths differ, the adversary extends the chain that is behind by publishing some amount of blocks needed to equalize lengths of both chains. The attack continues till the adversary has sufficient amount of blocks for each chain in his reserves. If he cannot equalize chains' lengths at the end of some round, then the attack is finished.



Figure 5 – The fork that keeps running while the adversary is able to equalize lengths of both branches with malicious blocks (marked with M)

A notion of a round was initially taken from [9]; it represents a complete round of information propagation to all nodes in a p2p network. In practice, information propagation is a random variable with an order of tens of seconds. In the described model, it is assumed that one full communication round takes 12.6 seconds (this is the average block propagation time in the Bitcoin network [10]).

A general essence of the splitting attack is the following: when the time of block generation is comparable to the time of block propagation, then the probability of generation of 2 or more blocks in the same round (and at the same block height) becomes non-negligible. In this case, at the beginning of the next round the network would be split into two branches. An adversary leverages such block collisions to keep the fork running.

Thus, an important parameter that facilitates a splitting attack is the number of PoW solutions (mined blocks) per complete round of information propagation. In [7], where this parameter is designated as f , it was shown that when f decreases and gets closer to 0, then the probability of a splitting attack decreases too (an adversary needs almost 50% of the hashing power to make a split). And vice versa, when f increases, the security bound becomes worse (the attack becomes feasible with less than 50% of the hashing power). The

splitting attack is the most effective when $f \geq 1$, i.e., at the rate of 1 block per round or more.

It follows from the above that a short block generation time (relative to the block propagation time) creates favorable conditions for a splitting attack to occur. Hence, it becomes interesting to investigate resistance of proof-of-work protocols with different values of the parameter f .

Let's consider the splitting attack on GHOST. GHOST protocol was initially proposed as an improvement of the Bitcoin protocol that allows to reduce time between blocks while preserving the same level of security [3, 11].

The main modification that was suggested is that blocks not included into the main chain can still contribute to the chain's irreversibility. The basic observation behind the protocol is that the blocks that are built on top of some block B add additional weight to block B even if they are not in the main chain. So, in contrast to the Bitcoin protocol, where only the blocks that are in the main chain contribute to the difficulty of this chain, in GHOST a whole sub-tree of blocks is considered (Fig. 6). See for more information [3, 11].

Since it was declared by the authors that the GHOST protocol has a comparable security even with short block generation time (it is stated that even when blocks are issued every second, the security level is the same as in the original Bitcoin protocol, [3]), we found a few serious mistakes in their works that puts to doubt their assertions and results. So it becomes interesting to investigate resistance of the GHOST protocol against a splitting attack.

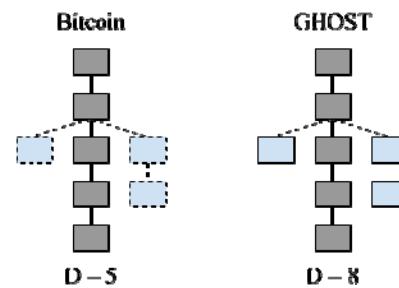


Figure 6 – Calculation of the chain's difficulty D is shown for the Bitcoin and GHOST protocols. In GHOST, even the blocks that are not included into the main chain add weight to it

The splitting attack for the GHOST protocol is slightly different compared to Bitcoin [7]. There are two differences:

- An adversary has to compensate the difference in the total number of honestly mined blocks in both branches at the end of each round, while in Bitcoin-like protocols he has to compensate only the maximal number of honestly mined blocks to keep both chains balanced.

- All blocks produced by an adversary are always valid. This facilitates an attack for adversary, because he can just mine the first nodes after the common prefix of

the two branches. In contrast, in Bitcoin an adversary has to extend only the head of diverging chains, so all blocks must be recent.

Now let's consider the double-spend attacks on Ouroboros. As stated in [1], it is the first provably secure proof-of-stake blockchain protocol with rigorous security guarantees, comparable to those achieved by the Bitcoin blockchain protocol. First we briefly discuss the protocol itself, and then present two models for different types of adversaries.

As previously stated, the Ouroboros is a proof-of-stake protocol, thus it does not require heavy computations for block production. While in the proof-of-work protocols like Bitcoin the blocks are produced by the miners (which do not necessarily have a stake in the system), in Ouroboros only the stakeholders can produce blocks. Given that the stakeholders are well incentivized to keep the overall stability of the system (as it would consequently keep the value of their coins), it creates an additional incentive for block producers to act honestly, thus making a system more secure in general.

The main idea behind the protocol is that the time is divided into so called epochs, and each epoch consists of a predefined number of slots. Each slot has an associated stakeholder that should produce a block during the time of that slot. The model requires synchrony among stakeholders, and the blocks that are produced in the incorrect timeslots are considered invalid. At most one block could be produced in the given slot (Fig. 7).

The owners of the slots are chosen randomly before the beginning of the epoch. Randomness for a selection procedure is generated collectively by a set of stakeholders by means of a special cryptographic protocol based on the PVSS scheme [12].

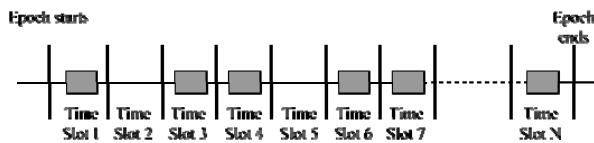


Figure 7 – A general scheme of the Ouroboros protocol

The time is divided into slots, each slot has an associated stakeholder who should produce a block in this slot. It is not necessary that the block in the given slot will be produced (for instance, a corresponding stakeholder could be offline at the moment), but there is a strict rule that only one block can be produced in the slot.

Following the terminology given in [1], an attack that consists in a fork creation is called an attack on a common prefix. There are two possible models for an adversary that is going to create a fork: the one that immediately demonstrates an adversarial behavior and the one that leaves an adversary covert. We will briefly describe both of them.

Despite of the rule that a slot winner can produce only one block per slot in the given chain of blocks, nothing can prevent him from creating several blocks in the same

slot but in different chains, thus creating a fork (see Fig. 8). An adversary can facilitate an attack by publishing blocks in both chains forcing honest slot winners to be split between them. In what follows, we will call such adversary a general adversary.

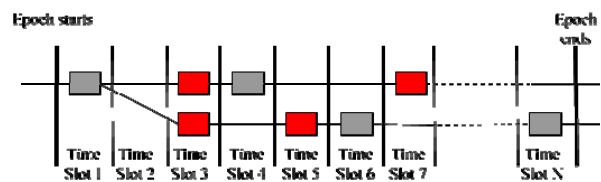


Figure 8 – An adversary that possesses some slots (shown in red) tries to split honest slot winners into two chains, thus facilitating an attack

While the described attack provides an adversary with significant opportunities, it leaves a suspicious “audit trail” – multiple signed blocks at the same slot that immediately signals malicious behavior. That motivates to consider a restricted class of covert adversaries, who produce not more than one block per slot (though not necessarily in the expected slot [1]).

An interested reader could find more details in [1, 13].

3 MATERIALS AND METHODS

Let's consider Ouroboros general adversary model. A central point of the security arguments given in [1] is the notions of the characteristic and forkable strings. A characteristic string is a binary string $\{0,1\}^n$ where each element indicates a slot that is assigned either to an adversary (denoted with 1) or to an honest user (denoted with 0). A forkable string is a characteristic string with such disposition of adversarial slots that allows fork creation.

Understanding density of the forkable strings among all characteristic strings will help to determine the probability of an attack. The paper [1] gives an upper bound on the probability of a string being forkable. In our research, we are interested in the exact probabilities of forks. To obtain such probabilities, we utilize a recursive algorithm that detects a forkable string (see lemma 4.18 in [1] for more details):

$$m(w0) = \begin{cases} (\lambda(w)-1, 0), & \text{if } \lambda(w) > \mu(w) = 0; \\ (0, \mu(w)-1), & \text{if } \lambda(w) = 0; \\ (\lambda(w)-1, \mu(w)-1), & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

Given a characteristic string w and the initial state $m(\epsilon)$, the state is updated sequentially with each element of the string. Finally, when all elements from w are processed, the variable μ is checked: if $\mu \geq 0$ then the string w is forkable, otherwise it is not.

Having such an algorithm, it is possible to calculate the overall probability of a fork for a string of particular length. It could be done by constructing of a matrix of probabilities for all possible states (Fig. 9).

The matrix could be calculated iteratively using the following rules (based upon the algorithm (5)):

$$p_{0,0}^0 = 1 \text{ and } p_{i,j}^0 = 0, \text{ for } i \neq 0 \text{ or } j = 0,$$

$$p_{i,j}^n = \text{lam1} \cdot q \cdot p_{i-1,j-1}^{n-1} + \text{mu1}(1-q)p_{i+1,j+1}^{n-1} + \\ + \text{mu2}(1-q)p_{i+1,0}^{n-1} + \text{lam2}(1-q)p_{0,j+1}^{n-1},$$

$$\begin{aligned} \text{mu1} &= \begin{cases} 1 & \text{if } j \neq 0, \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases} & \text{mu2} &= \begin{cases} 1 & \text{if } j = 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \\ \text{lam1} &= \begin{cases} 1 & \text{if } i > 0, \\ 0 & \text{otherwise;} \end{cases} & \text{lam2} &= \begin{cases} 1 & \text{if } i = 0, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \end{aligned}$$

Finally, the probability that an adversary with the fraction of stake q would be able to create a fork of n slots could be defined as follows:

$$DS(q, n) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n p_{i,j}^{(n)}. \quad (6)$$

Note that it is also possible to estimate the probability of a fork by simulating an attack directly. It could be done by generating of random binary strings (taking into account the probability of an adversarial slot) and checking them with the algorithm (5). The results conform with those obtained analytically with the equality (6).

Now let's consider Ouroboros covert adversary model. As stated previously, a covert adversary tries to keep an attack in secret, until he creates a branch of sufficient length. In this case, an adversarial behavior would be to refrain from publishing of blocks in the honest chain (Fig. 10).

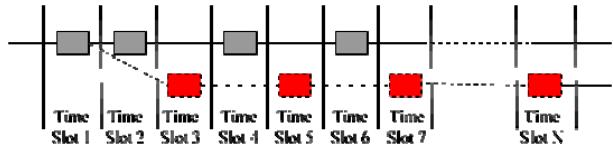


Figure 10 – A covert adversary tries to accumulate sufficient amount of slots (shown in red) to overcome an honest chain at some moment in future

In the classical double-spend attack it is assumed that an adversary has to create a fork of at least n blocks, where n is the number of confirmations that a user waits for before sending of goods or providing of a service. In this formulation, the attack with a covert adversary is basically close to the Bitcoin double-spend attack. Therefore, the probability of a fork after n blocks could be easily calculated using, for instance, the model of S. Nakamoto (see section 2, eq. 1).

Because of the deterministic nature of the block creation process in the Ouroboros protocol, it is more convenient to consider security bounds as the number of slots that a user should wait for to be sure (to some degree) that a fork cannot be created (opposite to the number of blocks in the classical model).

In our model, for a successful attack an adversary needs to create a fork of l slots (or longer). To do this, he needs to possess at least half of the slots at some point after the slot l . The probability of this event consists of two components: the ability of the adversary to accumulate some slots before the slot l , and the ability to catch up with the deficit (if any) after the slot l . We assume that neither honest users nor the adversary do not skip their slots, so there are no gaps.

The number of slots that an adversary would get during the period of l slots is a random variable that follows a binomial distribution. The probability to get exactly m slots is the following:

$$P(m) = \binom{l}{m} q^m p^{l-m}. \quad (7)$$

The probability of catching up with $z = n - m$ slots (where $n = l - m$ is the number of honest slots) could be

$p_{0,-n}^{(n)}$	\dots	$p_{0,-2}^{(n)}$	$p_{0,-1}^{(n)}$	$p_{0,0}^{(n)}$	$p_{0,1}^{(n)}$	$p_{0,2}^{(n)}$	\dots	$p_{0,n}^{(n)}$
$p_{1,-n}^{(n)}$	\dots	$p_{1,-2}^{(n)}$	$p_{1,-1}^{(n)}$	$p_{1,0}^{(n)}$	$p_{1,1}^{(n)}$	$p_{1,2}^{(n)}$	\dots	$p_{1,n}^{(n)}$
$p_{2,-n}^{(n)}$	\dots	$p_{2,-2}^{(n)}$	$p_{2,-1}^{(n)}$	$p_{2,0}^{(n)}$	$p_{2,1}^{(n)}$	$p_{2,2}^{(n)}$	\dots	$p_{2,n}^{(n)}$
\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots	\dots
$p_{n,-n}^{(n)}$	\dots	$p_{n,-2}^{(n)}$	$p_{n,-1}^{(n)}$	$p_{n,0}^{(n)}$	$p_{n,1}^{(n)}$	$p_{n,2}^{(n)}$	\dots	$p_{n,n}^{(n)}$

Figure 9 – The matrix shows the probabilities of a random characteristic string w of length n being in the state $m(w) = (i, j)$. It is indexed by all possible values λ and μ that could be reached by the string of length n

defined as a particular case of the Gambler Ruin problem [14] as:

$$\left(\frac{q}{1-q}\right)^{l-2m}.$$

It follows that the probability of a successful attack where an adversary creates a fork of l slots is equal to:

$$\begin{aligned} S(q, l) &= \sum_{m=0}^l P(m) C(l-2m) = \\ &= \sum_{m=0}^{\lfloor l/2 \rfloor} \binom{l}{m} q^m (1-q)^{l-m} \left(\frac{q}{1-q}\right)^{l-2m} + \\ &\quad + \sum_{m=\lfloor l/2 \rfloor+1}^l \binom{l}{m} q^m (1-q)^{l-m}. \end{aligned} \quad (8)$$

In order to get insights on the density of forks produced by different types of adversaries and to compare them with other consensus protocols, we made a calculation using the expressions above. The results are shown in Table 2.

Because synchrony between time slots is assumed in the Ouroboros protocol, it does not make sense to consider the parameter k (time between blocks) as we did for other consensus protocols.

Table 2 – The number of slots that a user should wait for to be 99.9% sure that his transaction would not be reverted by an adversary with the given stake

Adversarial stake	General Adversary	Covert Adversary
0.1	15	11
0.15	23	17
0.2	35	25
0.25	55	39
0.3	94	63
0.35	181	115
0.4	443	265
0.45	1990	1077

4 EXPERIMENTS

Firstly, in our experiments, we took two most widespread protocols: Bitcoin and GHOST and obtained experimental results during the computational modeling for both protocols.

As it is known, the average block generation time in Bitcoin is equal to 10 minutes [2]. Given that the average block propagation time is 12.6 seconds [2], the parameter $f = \frac{12.6}{10 \cdot 60} = 0.021$. In what follows, it is more suitable to use the parameter k instead of f that shows an average amount of communication rounds between 2 consecutive blocks: $k = \frac{1}{f}$.

It is interesting to estimate the possibility of a successful splitting attack for the original choice $k = 47.6$ made in Bitcoin, and see how security degrades in the case when k decreases. To accomplish this, we perform an experimental analysis of the described attack.

The next experiments included comparison among different consensus protocols and adversarial models described in the previous sections. As a unified measure, we took the number of block confirmations (or time slots in the case of Ouroboros) needed to be sure that a given block cannot be removed from the blockchain with the probability of at least 99.9% (in other words, the longest fork that an adversary with a certain hashing power/stake can create with the probability of at least 0.1%).

The chosen measure appears to be relevant for a real-world application because it shows how long a user should wait before accepting a payment transaction, thus decreasing the possibility of the considered attacks to a sufficient level.

To get further insights on the usability of the considered protocols, it is helpful to compare them by the average confirmation time. As long as different protocols have different time between blocks, this would give us more accurate picture of the security guarantees provided by protocols against different types of attacks.

The time between two consecutive slots in the Ouroboros system is expected to be 20 seconds. The average time to mine a Bitcoin block is 10 minutes [2]. During the analysis of the splitting attack, we also estimated the security bounds for the Bitcoin with reduced block generation time (12.6 seconds per block). The GHOST values of block generation time is the same as for Bitcoin.

5 RESULTS

Let's consider experimental results during the computational modeling for Bitcoin and GHOST protocols.

The results of the simulations for Bitcoin are summarized in Fig. 11. It is shown what fork length an adversary can maintain with the probability of success of at least 0.1%. It is easy to see that when the time between blocks decreases, an adversary gets a chance to create a longer fork.

Our simulation shows that for the choice of $k = 47.6$ (like in Bitcoin) 6 confirmations are needed to be sure that the probability of a splitting attack is less than 0.1% (considering an adversary that possesses 35% of the hashing power). If we assume that the average block generation time is equal to the block propagation time (so that $k = 1$) then 9 confirmation is needed for the same level of security.

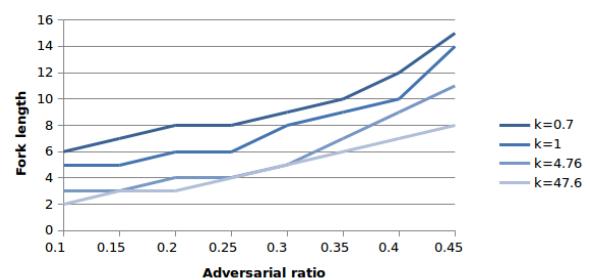


Figure 11 – The fork length that an adversary with a given hashing power can create with the probability of success of at least 0.1%. Different lines represents different choice of the parameter k

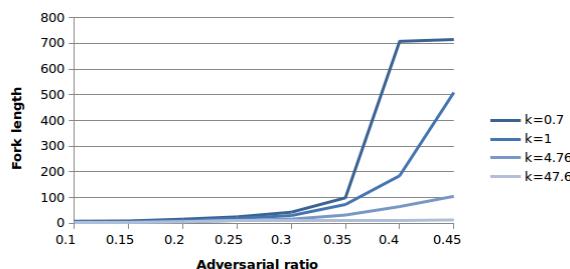


Figure 12 – The fork length that an adversary with a given hashing power can create for the GHOST protocol with the probability of success at least 0.1%. Different lines represents different choice of the parameter k

Table 3 – The number of slots that a user should wait to be 99.9% sure that his transaction would not be reverted by an adversary with the given hashing power (or stake in the case of Ouroboros protocol). Note that for Ouroboros the values in the table represent the number of slots, while for other protocols they represent the number of blocks

Adversarial stake (hashing power)	Ouroboros General Adversary	Ouroboros Covert Adversary	Bitcoin (Rosenfeld)	Bitcoin splitting	Fast Bitcoin splitting	GHOST splitting	Fast GHOST splitting
0.1	15	11	6	3	6	3	6
0.15	23	17	9	4	7	4	8
0.2	35	25	13	4	8	6	11
0.25	55	39	20	5	9	9	19
0.3	94	63	32	6	10	9	30
0.35	181	115	58	8	12	11	73
0.4	443	265	133	9	14	12	185
0.45	1990	1077	539	14	18	13	509

Table 4 – An average confirmation time (in minutes) that guarantees, with the probability of more than 99.9% that a block would not be reverted from the blockchain

Adversarial stake (hashing power)	Ouroboros General Adversary	Ouroboros Covert Adversary	Bitcoin (Rosenfeld)	Bitcoin splitting	Fast Bitcoin splitting	GHOST splitting	Fast GHOST splitting
Block generation time	20 sec	20 sec	10 min	10 min	12.6 sec	10 min	12.6 sec
0.1	5	3.6	60	30	1.2	30	1.2
0.15	7.6	5.6	90	40	1.4	40	1.6
0.2	11.6	8.3	130	40	1.6	60	2.3
0.25	18.3	13	200	50	1.8	90	4
0.3	31.3	21	320	60	2.1	90	6.3
0.35	60.3	38.3	580	80	2.5	110	15.3
0.4	147.3	88.3	1330	90	2.9	120	38.8
0.45	663.3	359	5390	140	3.7	130	106.9

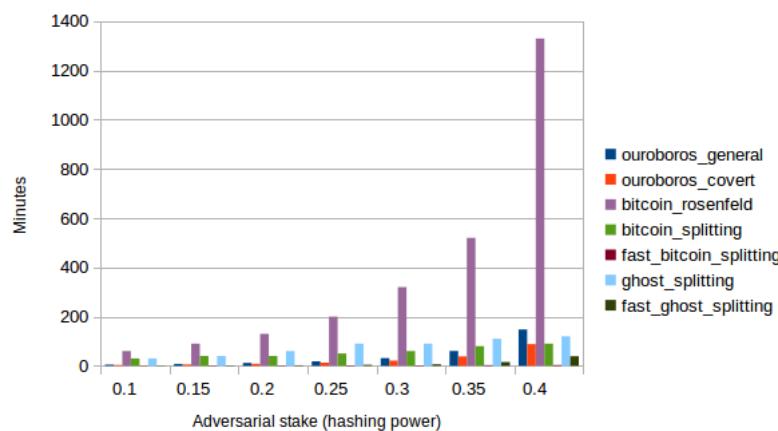


Figure 13 – Comparison of the expected confirmation periods (in minutes) for different protocols and adversarial models

The results of the simulation (Fig. 12) for GHOST show that the attack is extremely effective when the parameter k is near to 1.

The summarized results of protocols' comparison are presented in Table 3. It includes two models for Ouroboros (with general and covert adversaries), classic Bitcoin double-spend attack, Bitcoin splitting attack (including hypothetical Fast Bitcoin with reduced block generation time to one per communication round, e.g. 12.6 sec) and GHOST splitting attack (both with 10 min and 12.6 sec blocks).

The Table 4 and Figure 13 show how long (in minutes) a confirmation period should be to reduce the probability of an attack to less than 0.1%.

6 DISCUSSION

From the Table 4 and Figure 13 we can note that the Ouroboros protocol allows to confirm the block in 5 minutes in the worst case (considering an adversary with 10% of the total resources) while Bitcoin needs almost 60 minutes to provide the same level of security.

The splitting attack is more effective for the systems with short block generation time, but in general case, it is not better than the classical double-spend attack. Our simulations showed possibility of the attack for the Bitcoin and GHOST protocols with 10 min and 12.6 sec blocks. Not surprising that shorter blocks increase the required number of blocks to confirm a transaction but, despite this, the overall confirmation time is significantly reduced due to fast blocks.

CONCLUSIONS

In this paper we presented an analysis of the different consensus protocols and adversarial models. The main goal was to compare the well-known proof-of-work protocol that underlies Bitcoin with the new proof-of-stake algorithm that was introduced in Ouroboros. We also had a look at the GHOST algorithm that is initially intended to improve Bitcoin consensus. As a measure of comparison, we considered transaction confirmation time that allows to be sure that the probability of a double-spend attack is less than 0.1%.

The scientific novelty of obtained results: we presented two models for two types of attacks on the Ouroboros protocol (for the general and covert adversaries). The models allow calculation of the exact number of slots needed to achieve the required level of security. It was shown that the Ouroboros protocol allows achieving of the required security level with significantly shorter confirmation period compared to Bitcoin.

The practical significance consists in the fact that obtained results allow determination of the security bounds for the Ouroboros system. It becomes extremely important for a real-world application because it will help users to figure out how long they should wait before accepting the transaction.

APPENDIX A. THE GENERALIZED MODEL OF C. PINZON ET AL.

The model proposed by C. Pinzon et al. [4] generalizes the model of M. Rosenfeld by adding of an extra parameter that represents time-advantage of an adversary.

As in the previous models, a successful double-spend attack consists of two constituents: the progress of an adversary during the confirmation period of m blocks and his ability to catch up with the deficit $z = m - n$. The catch-up function is the same as originally used by S. Nakamoto (which occurs in Gambler's Ruin Problem). The improvement of this model lies in the modified progress function. It is represented as follows:

$$P(q, m, n, t).$$

Basically, the function P represents the probability of an adversary mining exactly n blocks once the honest network mines m blocks, assuming that an adversary has been additionally mining secretly for t time units. While the first three parameters (q, m, n) are well-known from the previous models, the time-advantage t is the new one. It represents an amount of time since the n^{th} block is found by an adversary until the m^{th} block is found by the honest network. This time period t potentially increases the probability of an adversary to find the next block faster than the honest network thus giving him an advantage.

In order to define the function P , it is necessary to define the function $a(q, t, k)$ that represents the probability to mine exactly k blocks during the time period t with a fraction q of hashing power (the proof could be found in the original paper [4]):

$$a(q, t, k) = \begin{cases} 1, & \text{if } t = n = 0, \\ 0, & \text{if } t \leq 0, \\ \frac{(qt)^k}{k!} e^{-qt}, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The function P can be defined as follows:

$$P(q, m, n, t) = \sum_{z=0}^n a(q, t, z) P_R(q, m, n-z). \quad (9)$$

Note that in the case of $t = 0$ the progress function $P(q, m, n, t)$ is equivalent to the progress function presented by M. Rosenfeld [5].

Let $C_R(x, y)$ be the catch-up function as defined by M. Rosenfeld (eq. 2) and K – the number of blocks in the honest chain. It follows that the probability of a successful double-spend attack is equal to:

$$\begin{aligned} DS_G(q, K, n, t) &= \\ &= 1 - \sum_{z=0}^{K-n} P(q, K, z, t) (1 - C_R(q, K - n - z)). \end{aligned} \quad (10)$$

Note that if the parameters $t = 0$ and $n = 1$ then this model is equivalent to the one proposed by M. Rosenfeld [5]. More information can be found in the original paper [4].

APPENDIX B. THE TIME-BASED MODEL OF C. PINZON ET AL.

The second model presented by C. Pinzon et al. is completely different from those described in section 2. In the time-based model, the lengths of the valid and fraudulent chains are assumed to be equal. Instead,

authors are focused on the time parameter t that represents time difference between the n^{th} block in adversarial and honest chains.

We will not go deep into the details of this model, instead we will only present the final equation for calculation of the probability of a double-spend attack. We refer an interested reader to the original paper [4] to find more details about this model.

Let P be the progress function from the generalized model (eq. (9)) and C_T is the catch up function for the time-based model that is defined as follows:

$$C_T(q, t) = \begin{cases} \frac{q}{p} e^{-(p-q)t}, & \text{if } t > 0, \\ 1, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

The double-spend attack probability can be defined as the probability of having a time disadvantage t once the $K+1^{\text{th}}$ block is mined, multiplied by the probability of catching up with that disadvantage:

$$DS_T(q, K, n_0, t_0) = \int_{-\infty}^{\infty} P(q, K+1, K-n_0+1, t) C_T(q, t-t_0) dt. \quad (11)$$

The parameters in (11) are the same as in (10).

REFERENCES

1. Kiayias A. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol [Electronic resource], *Cryptology ePrint Archive*. Electronic data. [International Association for Cryptologic Research, 2016]. Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2016/889> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
2. Nakamoto S. A peer-to-peer electronic cash system [Electronic resource], *Bitcoin*. Electronic data, 2008. Mode of access: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
3. Sompolsky Y., Zohar Aviv Accelerating bitcoin as transaction processing. Fast money grows on trees, not chains [Electronic resource], *Cryptology ePrint Archive*. Electronic data. [International Association for Cryptologic Research, 2013]. Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2013/881> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
4. Pinzon C., Rocha C. Double-Spend Attack Models with Time Advantage for Bitcoin, *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, 2016, Vol. 329, pp. 79–103.
5. Rosenfeld M. Analysis of hashrate-based double-spending races [Electronic resource], Preprint arXiv. Electronic data, [Cornell: Cornell University, 2017], Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1402.2009> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
6. Grunspan C., Pérez-Marco R. Double spend races [Electronic resource], Preprint arXiv. Electronic data, [Cornell: Cornell University, 2017]. Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1702.02867.pdf> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
7. Kiayias A., Panagiotakos G. Speed-security tradeoffs in blockchain protocols [Electronic resource] / A. Kiayias, // Electronic data. – [International Association for Cryptologic Research, Cryptology ePrint Archive, 2015]. – Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2015/1019> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
8. Double-spending [Electronic resource], BitcoinWiki. Mode of access: <https://en.bitcoin.it/wiki/Double-spending> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
9. Garay J. A. Kiayias Aggelos, and Leonards Nikos The Bitcoin Backbone Protocol: Analysis and Applications”, Advances in Cryptology, EUROCRYPT 2015, 34th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, Sofia, Bulgaria, April 26–30, 2015: proceedings. Berlin, Springer, 2017. Part II, pp. 281–310. DOI: 10.1007/978-3-662-46803-6_10.
10. Decker C., Wattenhofer R. Information Propagation in the Bitcoin Network, Peer-to-Peer Computing: IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P), Trento, Italy, September 9–11, 2013, proceedings. Trento, IEEE Xplore, 2013, pp. 1–10. DOI: 10.1109/P2P.2013.6688704.
11. Sompolsky Y., Zohar A. Secure high-rate transaction processing in Bitcoin, Financial Cryptography and Data Security – 19th International Conference, FC 2015, San Juan, Puerto Rico, January 26–30, 2015: proceedings. Berlin, Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2004, Vol. 8975, pp. 507–527. DOI: 0.1007/978-3-662-47854-7_32.
12. Schoenmakers B. A simple publicly verifiable secret sharing scheme and its application to electronic voting, Advances in Cryptology – CRYPTO 99, 19th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, California, USA, August 15–19, 1999: proceedings. – Berlin: Springer, 1999, Volume 1666 of Lecture Notes in Computer Science, pp. 148–164.
13. Russel A. Forkable Strings are Rare [Electronic resource], *Cryptology ePrint Archive*. Electronic data. [International Association for Cryptologic Research, 2017]. Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2017/241> (viewed on May 13, 2018). Title from the screen.
14. Feller W. An Introduction to Probability Theory and its Applications. New York: John Wiley & Sons, 1970, 700 p. DOI: 10.1137/1014119.

Received 15.05.2018.
Accepted 25.06.2018.

УДК 004.75

ПОРІВНЯННЯ ЧАСУ ПІДТВЕРДЖЕННЯ БЛОКУ ДЛЯ РІЗНИХ АЛГОРИТМІВ КОНСЕНСУСУ

Кайдалов Д. С. – канд. техн. наук, науковий співробітник в Input Output НК.

Ковалчук Л. В. – д-р техн. наук, професор, професор кафедри математичних методів захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», науковий співробітник в Input Output НК.

Нащенко А. О. – канд. техн. наук, науковий співробітник в Input Output НК.

Родінко М. Ю. – аспірант кафедри безпеки інформаційних систем і технологій Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, науковий співробітник в Input Output HK.

Шевцов О. В. – кандидат технічних наук, науковий співробітник в Input Output HK.

Олійников Р. В. – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри безпеки інформаційних систем і технологій Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна, науковий співробітник в Input Output HK.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Проведений аналіз децентралізованих протоколів консенсусу, які базуються на блокчайні, з точки зору властивостей безпеки системи. Об'єктом дослідження є час підтвердження блоку із відповідним рівнем гарантії відсутності відміні транзакцій для користувачів. Метою роботи є порівняння кінцевих ймовірностей успіху атаки подвійної витрати для різних систем на базі блокчайну.

Метод. Представлено дві моделі для двох атак на протокол Уроборос (для загального та прихованого зловмисників). Представлені моделі дозволяють обчислити точне значення числа слотів, необхідних для досягнення необхідного рівня безпеки. Показано, що протокол Уроборос дозволяє досягнути необхідного рівня безпеки за значно коротший період підтвердження у порівнянні з протоколом Біткоін. Зроблена оцінка та порівняння мінімального числа блоків підтвердження для протоколів Біткоін, GHOST та Уроборос. В якості міри порівняння було прийнято час підтвердження транзакції для якого ймовірність атаки подвійної трати менше, ніж 0,1%. Різні типи стандартних імовірнісних розподілів, а також властивості ланцюгів Маркова та випадкових блукань застосовується для отримання порівняння і оцінок властивостей безпеки блокчайна Біткоіна до трьох різних моделей атаки подвійної трати. Атака розгалуження, що заснована на моделі, де ресурси чесних учасників поділені для конкурування різних ланцюгів, застосована до протоколів консенсусу Біткоін і GHOST. Для оцінок безпеки протоколу Уроборос також використовуються властивості ланцюгів Маркова та випадкових блукань.

Результати. Розроблено методи для отримання точних значень середнього часу підтвердження блока для протоколу Уроборос. Зроблено порівняння мінімального числа блоків підтвердження для забезпечення високого рівня безпеки для протоколів Біткоін, GHOST та Уроборос.

Висновки. Отримані результати дозволяють визначити безпечні межі застосування протоколів консенсусу Біткоін, GHOST і Уроборос. Користувачі можуть отримати конкретні параметри для заданого рівня гарантії безпеки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: блокчайн, Біткоін, консенсус із доказом роботи, GHOST, консенсус із доказом володіння, Уроборос.

УДК 004.75

СРАВНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ОЖИДАНИЯ БЛОКА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА

Кайдалов Д. С. – канд. техн. наук, научный сотрудник в Input Output HK.

Ковалчук Л. В. – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры математических методов защиты информации Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», научный сотрудник в Input Output HK.

Настенко А. О. – канд. техн. наук, научный сотрудник в Input Output HK.

Родинко М. Ю. – аспирант кафедри безопасности информационных систем и технологий Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, научный сотрудник в Input Output HK.

Шевцов О. В. – канд. техн. наук, научный сотрудник в Input Output HK.

Олейников Р. В. – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры безопасности информационных систем и технологий Харьковского национального университета им. В. Н. Каразина, научный сотрудник в Input Output HK.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Выполнен анализ децентрализованных протоколов консенсуса, основанных на блокчайне, с точки зрения свойств безопасности системы. Объектом исследования является время подтверждения блока с соответствующим уровнем гарантii отсутствия отмены транзакции для пользователей. Целью работы является сравнение результирующих вероятностей успеха атаки двойной траты для различных систем на базе блокчайна.

Метод. Представлены две модели для двух атак на протокол Уроборос (для общего и скрытого злоумышленников). Представленные модели позволяют вычислить точное значение числа слотов, необходимых для достижения необходимого уровня безопасности. Показано, что протокол Уроборос позволяет достичь необходимого уровня безопасности за более короткий период подтверждения по сравнению с протоколом Биткоин. Произведена оценка и сравнение минимального числа блоков подтверждения для протоколов Биткоин, GHOST и Уроборос. В качестве меры сравнения было принято время подтверждения транзакции, для которого вероятность атаки двойной траты меньше, чем 0,1%. Различные типы стандартных вероятностных распределений, а также свойства марковских цепей и случайных блужданий используются для получения сравнения и оценок свойств безопасности блокчайна Биткоина к трем различным моделям атаки двойной траты. Атака разветвления, основанная на модели, где ресурсы честных участников разделены для конкуренции различных цепочек, применена к протоколам консенсуса Биткоин и GHOST. Для оценок безопасности протокола Уроборос также используются свойства марковских цепей и случайного блуждания.

Результаты. Разработаны методы для получения точных значений среднего времени подтверждения блока для протокола Уроборос. Сделано сравнение минимального числа блоков подтверждения для обеспечения высокого уровня безопасности для протоколов Биткоин, GHOST и Уроборос.

Выводы. Полученные результаты позволяют определить безопасные границы для применения протоколов консенсуса Биткоин, GHOST и Уроборос. Пользователи могут получить конкретные параметры для заданного уровня гарантий безопасности.

Ключевые слова: блокчейн, Биткоин, консенсус с доказательством проделанной работы, GHOST, консенсус с доказательством владения, Уроборос.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Kiayias A. Ouroboros: A provably secure proof-of-stake blockchain protocol [Electronic resource] / A. Kiayias // Cryptology ePrint Archive. – Electronic data. – [International Association for Cryptologic Research, 2016]. – Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2016/889> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
2. Nakamoto S. A. peer-to-peer electronic cash system" [Electronic resource] / Satoshi Nakamoto // Bitcoin. – Electronic data. – 2008. – Mode of access: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
3. Sompolsky Y. Accelerating bitcoin as transaction processing. Fast money grows on trees, not chains [Electronic resource] / Yonatan Sompolsky, Aviv Zohar // Cryptology ePrint Archive. – Electronic data. – [International Association for Cryptologic Research, 2013]. – Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2013/881> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
4. Pinzon C. Double-Spend Attack Models with Time Advantage for Bitcoin / C. Pinzon, C. Rocha // Electronic Notes in Theoretical Computer Science. – 2016. – Vol. 329. – P. 79–103.
5. Rosenfeld M. Analysis of hashrate-based double-spending races [Electronic resource] / M. Rosenfeld // Preprint arXiv. – Electronic data. – [Cornell: Cornell University, 2017]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1402.2009> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
6. Grunspan C. Double spend races [Electronic resource] / C. Grunspan, R. Pérez-Marco // Preprint arXiv. – Electronic data. – [Cornell: Cornell University, 2017]. – Mode of access: <https://arxiv.org/abs/1702.02867.pdf> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
7. Kiayias A. Speed-security tradeoffs in blockchain protocols [Electronic resource] / A. Kiayias, G. Panagiotakos // Electronic data. – [International Association for Cryptologic Research, Cryptology ePrint Archive, 2015]. – Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2015/1019> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
8. Double-spending [Electronic resource] // BitcoinWiki. – Mode of access: <https://en.bitcoin.it/wiki/Double-spending> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
9. Garay J. A. The Bitcoin Backbone Protocol: Analysis and Applications" / Juan A. Garay, Aggelos Kiayias, and Nikos Leonardos // Advances in Cryptology – EUROCRYPT 2015 – 34 th Annual International Conference on the Theory and Applications of Cryptographic Techniques, Sofia, Bulgaria, April 26–30, 2015: proceedings. – Berlin : Springer, 2017. Part II. – P. 281–310. DOI: 10.1007/978-3-662-46803-6_10.
10. Decker C. Information Propagation in the Bitcoin Network / C. Decker, R. Wattenhofer // Peer-to-Peer Computing: IEEE International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P), Trento, Italy, September 9–11, 2013: proceedings. – Trento: IEEE Xplore, 2013. – P. 1–10. DOI: 10.1109/P2P.2013.6688704.
11. Sompolsky Y. Secure high-rate transaction processing in Bitcoin / Y. Sompolsky, A. Zohar // Financial Cryptography and Data Security – 19th International Conference, FC 2015, San Juan, Puerto Rico, January 26–30, 2015: proceedings. – Berlin : Springer, Lecture Notes in Computer Science, 2004. – Vol. 8975. – P. 507–527. DOI: 0.1007/978-3-662-47854-7_32.
12. Schoenmakers B. A simple publicly verifiable secret sharing scheme and its application to electronic voting / Schoenmakers B. // Advances in Cryptology – CRYPTO 99, 19th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, California, USA, August 15–19, 1999: proceedings. – Berlin : Springer, 1999, Volume 1666 of Lecture Notes in Computer Science. – P. 148–164.
13. Russel A. Forkable Strings are Rare [Electronic resource] / A. Russel // Cryptology ePrint Archive. – Electronic data. – [International Association for Cryptologic Research, 2017]. – Mode of access: <http://eprint.iacr.org/2017/241> (viewed on May 13, 2018). – Title from the screen.
14. Feller W. An Introduction to Probability Theory and its Applications / W. Feller. – New York : John Wiley & Sons, 1970. – 700 p. DOI: 10.1137/1014119.

PRACTICAL CONSIDERATIONS OF GREEDY COMPRESSED SAMPLING METHODS APPLICATION FOR OFDM CHANNEL ESTIMATION

Kotlyarov V. V. – Post-graduate student of Department of Radio Engineering Devices and Systems of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, Ukraine.

Shpylka A. A. – PhD, Associated Professor of Department of Radio Engineering Devices and Systems of National technical university of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv polytechnic institute”, Kyiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Traditionally a large number of pilot carriers are utilized to acquire channel state information in OFDM based systems. A larger number of pilot carriers gives better channel state estimation but leads to lower spectrum efficiency of the system.

Objective. Primary objective of this paper is to look at the practical aspects of the application of novel CS-based channel estimation technique, that can achieve estimation quality on reduced training data, in context of real pilot aided OFDM systems.

Method. A novel technique CS enables representation of sparse signals using fewer samples as compared to its original size. Exploiting the sparse nature of channel impulse response of multipath channels, we apply the CS technique for channel estimation in pilot aided OFDM system based on ISDB-T standard.

Results. In this paper, we consider two the most popular CS-based recovery algorithms – OMP and CoSaMP. The MSE performance metrics are given for both CS-based channel estimation algorithms. Simulations results demonstrate that CoSaMP provides more stable results while requires more pilot carriers than OMP to achieve good estimation quality. Both algorithms require a priori knowledge of channel sparsity level but CoSaMP is much more sensitive to a correctness of this information.

Conclusions. The compressed sampling approach shows the impressive capability of channel impulse response recovery from a significantly smaller amount of pilot carriers than traditional linear methods require. However, the need of sparsity knowledge by the most popular CS recovery methods seriously limits the applicability of these algorithms in real OFDM receivers. Nevertheless, CS-based channel estimation is a promising technique which worth further investigation to overcome this limitation.

KEYWORDS: OFDM, multipath channel, channel estimation, compressed sampling.

ABBREVIATIONS

OFDM – orthogonal frequency division multiplexing;
LS – least squares;
ML – maximum likelihood;
CS – compressed sampling;
OMP – orthogonal matching pursuit;
CoSaMP – compressive sampling matching pursuit;
MSE – mean square error;
CNR – carrier to noise ratio;
FFT – fast Fourier transform;
ISDB-T – integrated services digital broadcasting-terrestrial;
SFN – single frequency network;
ADC – analog to digital converter;
SP – scatter pilots;
TMCC – transmission and multiplexing configuration control.

NOMENCLATURE

$\Phi \in C^{M \times N}$ – sampling matrix;
 $H \in C^N$ – channel frequency response;
 $h \in C^N$ – channel impulse response;
 τ_i – delay of i -th distinguishable channel tap;
 K – channel sparsity;
 N – number of carriers in one OFDM symbol;
 w – white Gaussian noise with unknown statistics
 σ^2 ;
 $X \in C^{N \times N}$ – transmitted carriers in one OFDM symbol;

$Y \in C^N$ – received carriers in one OFDM symbol;

N_P – number of pilot carriers in one OFDM symbol;

$\hat{\Phi} \in C^{N_P \times N}$ – partial DFT sampling matrix for pilot carriers;

$X_P \in C^{N_P}$ – transmitter pilot carriers in one OFDM symbol;

$Y_P \in C^{N_P}$ – received pilot carriers in one OFDM symbol;

$\tilde{h} \in C^N$ – estimated / recovered channel impulse response.

INTRODUCTION

OFDM is the most popular modulation technique widely applied in modern wireless communication systems. Channel estimation is an integral part of high data rate wireless communication systems. It is essentially a process of recovery of channel state information, which is required for data decoding. The accuracy of channel estimation has great importance for high data rate decoding and is one of the key challenges in OFDM based wireless communication systems.

Most of the OFDM based systems employ pilot subcarriers for channel estimation. Traditional linear channel estimation techniques [1–5], like the ML and LS, require a large number of pilots to achieve a proper accuracy of channel state information recovery. A higher number of pilots, that do not carry data, seriously reduce spectral utilization efficiency of the system.

But these traditional methods do not exploit the fact that the impulse response of the wireless channels is often sparse [6]. Sparse channel means there are a few strong distinguishable signal paths in it due to reflection, refraction, and scattering of the signal on its way from the transmitter to the receiver. Channel estimation method that uses the advantage of the channel sparsity allows reduction of the number of pilot carriers per OFDM symbol and in such way improves the efficiency of channel bandwidth utilization. It also achieves higher channel estimation accuracy in mobile reception scenario compared to traditional methods. The methods best suited for sparse channel estimation are developed in CS theory.

CS [7] is a novel signal processing technique that postulates that any signal that can be sparsely represented in some orthogonal space can be sampled with lower frequency and accurately reconstructed with much fewer samples than specified by classic sampling theory by Nyquist [8, 9]. In the theory of CS, a sampling is a linear operator applied to a k -sparse signal. The process of collecting multiple samples is viewed as the action of a sampling matrix Φ on the target signal. For M compressed measurements of a signal in C^N the sampling matrix has dimensions $M \times N$. Since sampling matrix $\Phi^{M \times N}$ must not map two different k -sparse signals to the same set of compressed measurements, the minimum number of measurements is $M \geq 2k$. Moreover each collection of $2k$ columns of $\Phi^{M \times N}$ must be nonsingular.

1 PROBLEM STATEMENT

For wireless communications, the transmission medium is the radio channel between transmitter and receiver. The signal can get from the transmitter to the receiver via a number of different propagation paths. Each of the paths has distinct amplitude, propagation time, departure and arrival directions. Because of this, the signal at the receiver side consists of the sum of several components with different energy and phase shifts to each other and noise. Different phase shifts of signal components lead to interference, which creates so-called frequency selective fading – the effect of significant amplitude changes of frequency components in the signal.

Consider the frequency selective fading channel in OFDM system, whose coherence time is much larger than the symbol period. If ADC sampling frequency is F_s , its discrete sample-time channel model is:

$$h[t] = \sum_{i=1}^K a_i \delta(t - \tau_i F_s), \quad (1)$$

where K is the number of dominant transmit paths, a_i is the complex amplitude and τ_i is the delay of i -th distinguishable channel tap. When there are just a few non zero elements in $h = [0, a_1, a_2, 0, \dots, a_K, \dots, 0, 0, 0] \in C^N$, we say that such channel is K sparse.

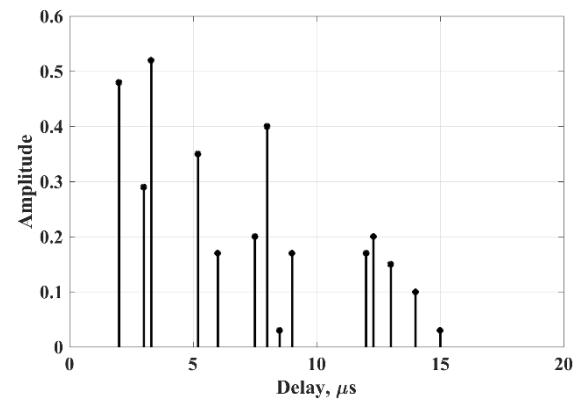


Figure 1 – The sparse impulse response of the multipath channel

The frequency response of the channel model (1) is $H = \Phi h$, where $\Phi \in C^{N \times N}$ is Fourier matrix.

Provided that in the OFDM system, the total number of subcarriers is N , among them the number of pilot subcarriers is $N_p \ll N$. Carriers x_i contain data and pilot signals in one OFDM symbol. Cyclic prefix length $T_g < \tau_K$ is greater than the maximum possible path delay in every OFDM symbol. The frequency domain signal at the receiver is a vector $Y \in C^N$, which can be written as:

$$Y = XH + w, \quad (2)$$

where $X = \text{diag}(x_1, x_2, \dots, x_N)$ is $C^{N \times N}$ matrix with carriers, $H \in C^N$ is a vector of complex amplitudes of channel frequency response, w is white Gaussian noise term with unknown statistics σ^2 .

Since $H = \Phi h$, (2) can be equivalently rewritten to:

$$Y = X\Phi h + w, \quad (3)$$

where $h = [0, a_1, a_2, 0, \dots, a_K, \dots, 0, 0, 0]^T \in C^N$ is sparse multipath channel impulse response with only $K \ll N$ nonzero entries and $\Phi \in C^{N \times N}$ is Fourier matrix.

At the OFDM receiver side, h and w are fully unknown. Y and X are partially known for only pilot carriers X_p and Y_p , where the number of pilot carriers $N_p \ll N$ significantly less than a total number of carriers in the OFDM symbol. In channel estimation context model (3) for receiver side transforms to:

$$Y_p = X_p \hat{\Phi} h + w, \quad (4)$$

where $P = [p_1, p_2, \dots, p_{N_p}] \in Z$, is pilot positions in the OFDM symbol and $\hat{\Phi} \in C^{N_p \times N}$, is matrix derived from Fourier matrix in a next way:

$$\hat{\Phi} = \frac{1}{\sqrt{N}} \begin{pmatrix} \omega_{P_1,0} & \dots & \omega_{P_1,N-1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \omega_{P_{N_p},0} & \dots & \omega_{P_{N_p},N-1} \end{pmatrix},$$

$$\text{where } \omega_{m,n} = e^{-2\pi j \frac{m \cdot n}{N}}.$$

The channel estimation process is essentially a recovery of the original high dimensional $h \in C^N$ from low dimensional $X_P \in C^{N_P}$ and $Y_P \in C^{N_P}$ available at the receiver side.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The most common channel estimation techniques in the literature for OFDM systems use repeated blocks of pilots or training data to formulate ML or LS estimation algorithms. Both of the methods based on well-established theory [1–5] and provide identical channel estimation results. To perform LS estimations, we need to formulate an overdetermined system of linear equations in terms of the parameters to be estimated [4]. To perform ML parameter estimations, we need first to form a log-likelihood function in terms of the parameters to be estimated [5].

According to the theory the only way to improve estimation quality of ML and LS estimators is to increase the number of training data in the system. But more training data means reduction of data throughput in the system. Moreover, the use of repeated OFDM training blocks requires that channel fading remains unchanged at least over the period of the repeated blocks. This implies that the maximum Doppler frequency must satisfy $f_D < 1/T$, where $f_D = v f_c / c$, c is the speed of light, T is one complete OFDM block time length in seconds, and f_c is the carrier frequency in Hz. Corresponding maximum mobile receiver speed in this case is $v < \frac{c}{f_c T}$.

From the last formula it's clear that to increase mobility of the reception we need to reduce training block time length. In the best case we'd like to be able to estimate channel state information for every OFDM symbol independently. But according to the ML and LS theory this will inevitably degrade estimation quality of these classical methods [1–5]. This contradiction between channel estimation quality, data throughput and reception mobility of classical channel estimation methods force researchers to look for new techniques that can achieve estimation quality on reduced training data.

Compared with classical channel estimation methods, CS [7] reconstruction methods exploit the fact of the channel sparsity, which can effectively balance the channel estimation performance spectral efficiency and computational complexity. Different CS reconstruction algorithms may have different channel estimation performance. Majority of CS reconstruction methods are based on two types – l_1 norm minimization methods [10]. The second type is greedy pursuit algorithms [11], such as OMP and CoSaMP. Greedy algorithms are more popular because of its lower computation complexity [12]. In the early stages, OMP algorithm was employed to estimate sparse channel with improved estimation performance [13]. Recently, CoSaMP algorithm gradually replaces OMP to realize more effective sparse channel estimation [14] in OFDM system.

While currently available works are mainly aimed to proof the ability of CS to recover channel state information of sparse channels, the primary objective of this paper is to look at the practical aspects of application of CS-based channel estimation methods in real pilot aided OFDM systems.

3 MATERIALS AND METHODS

The channel estimation process is a recovery of the original high dimensional $h \in C^N$ from low dimensional $X_P \in C^{N_P}$ and $Y_P \in C^{N_P}$ available at the receiver side. Since known part of the considered mathematical model (4) is significantly less than unknown, due to $N_P \ll N$, the recovery of $h \in C^N$ is a classical inverse problem addressed in CS theory [7–9]. According to the theory, sparse solution of the undetermined system can be found with high probability via l_1 norm minimization process. Within CS framework sparse channel estimation problem can be defined in a next way:

$$\begin{aligned} \tilde{h} = \arg \min_{h \in C^{N_P}} \|h\|_1, \\ \text{subjected to } \left\| \frac{Y_P}{X_P} - \hat{\Phi}h \right\|_2 \leq \varepsilon \end{aligned} \quad (5)$$

where ε is a predefined noise level proportional to σ^2 .

For inverse problem (5) CS theory proposes roughly two categories of recovery algorithms. One category is convex optimization algorithms [10], which guarantee global optimal solution but have high computational complexity. The other category is greedy algorithms, which can give a suboptimal solution but are easy to implement in practice [11–14].

In this paper, we study recovery performance of OMP and CoSaMP-two the most popular greedy algorithms, applied to sparse channel estimation in pilot-aided OFDM systems.

OMP is an iterative algorithm that at every step takes an atom from the orthonormal dictionary with the highest correlation to compressed measurements residue [13]. The algorithm is prohibited from taking the same atom twice and so all resulting components in the recovered signal are orthogonal to each other. This continues until some stopping criteria are met. The most common stopping criteria in all CS greedy algorithms is a number of recovered nonzero components (i.e. sparsity level). Pseudocode for OMP is shown in Algorithm 1.

Algorithm 1 OMP

Require: number of channel paths k (sparsity, number of iterations)

Input: sampling matrix $\hat{\Phi} \in C^{N_P \times N}$,

measurement vector $y \in C^{N_P}$, $y \leftarrow Y_P / X_P$

1: **Initialize:** $i \leftarrow 1$, $\tilde{h}_0 \leftarrow 0$, $\lambda_0 \leftarrow 0$, $r_0 \leftarrow y$

2: **while** $i \leq k$ **do**

```

3:  $\phi_i \leftarrow \arg \max_1 |\hat{\Phi}^T r_{i-1}|$  {find 1 atom in  $\hat{\Phi}$  with max
   correlation to the residue}
4:  $\lambda_i \leftarrow \lambda_{i-1} \cup \phi_i$  {add atom position to support  $\lambda$ }
5:  $\tilde{h}_i \leftarrow \hat{\Phi}_{\lambda_i}^\dagger y$  {re-estimate with new support}
6:  $r_i \leftarrow y - \hat{\Phi} \tilde{h}_i$  {update the residue}
7:  $i \leftarrow i + 1$ 
8: end while
```

Output: estimated Channel Impulse Response $\tilde{h}_k \in C^N$ after k iterations

CoSaMP method [14] is based on OMP idea, but it incorporates several other ideas to accelerate the algorithm and to provide strong reconstruction guarantees that OMP does not provide. Unlike OMP algorithm, CoSaMP identifies $2k$ orthogonal dictionary atoms at each iteration. This allows CoSaMP algorithm to run faster for many types of signals but requires a priori knowledge of the sparsity level k as part of its input. Pseudocode for CoSaMP is shown in Algorithm 2.

Algorithm 2 CoSaMP

Require: number of channel paths k (sparsity level)

Input: sampling matrix $\hat{\Phi} \in C^{N_p \times N}$,

measurement vector $y \in C^{N_p}$, $y \leftarrow Y_p / X_p$

```

1: Initialize:  $i \leftarrow 1$ ,  $\tilde{h}_0 \leftarrow 0$ ,  $r_0 \leftarrow y$ 
2: while  $i \leq k$  do
3:  $\phi \leftarrow \arg \max_{2k} |\hat{\Phi}^T r_{i-1}|$  {find  $2k$  atoms in  $\hat{\Phi}$ 
   with max correlation
   to the residue}
4:  $\lambda \leftarrow \text{sup}(\tilde{h}_{i-1}) \cup \phi$  {merge with the current
   estimation support}
5:  $a \leftarrow \hat{\Phi}_{\lambda}^\dagger y$  {LS estimation for support  $\lambda$ }
6:  $\tilde{h}_i \leftarrow a_{\arg \max_k |a|}$  {prune LS estimation to  $k$  max
   components}
7:  $r_i \leftarrow y - \hat{\Phi} \tilde{h}_i$  {update the residue}
8:  $i \leftarrow i + 1$ 
9: end while
```

Output: estimated Channel Impulse Response $\tilde{h}_k \in C^N$ after k iterations

4 EXPERIMENTS

In all the simulation cases the setup is configured according to Mode 1 of ISDB-T standard [15] with FFT size $N=2048$ and the guard interval length of $T_g=512$. To reduce the uniformity of sampling, we used SP together with TMCC as pilot carriers. In such way, the maximal number of available pilot carriers in each OFDM symbol is $N_p=157$ for Mode 1 in accordance with the standard. For multipath channel model we use two groups of six-tap typical urban channel models [16] with the variable delay between groups (see table 1 for more details). Such multipath channel has 2x6 dominant taps, which means

actual channel sparsity in all the simulation cases is the same and equals 12. Such structure of the channel model allows simulation of typical signal propagation in SFN.

5 RESULTS

The simulations are carried out to compare the performance of the two proposed algorithms in different channel conditions and input parameters scenarios. At each simulation step, a recovery of channel impulse response of the particular multipath channel is performed by OMP and CoSaMP from the same input data set for both algorithms. The efficiency of the algorithms is evaluated via the MSE of the channel impulse response recovery by the next formula:

$$MSE = E \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\tilde{h}_n - h_n)^2 \right],$$

where $\tilde{h} \in C^N$ is recovered channel impulse response, $h \in C^N$ actual channel impulse response, N length of the channel impulse response.

6 DISCUSSION

Fig. 2a compares the MSE performance of the two algorithms against CNR. The channel model parameters are according to table 1. The number of pilot carriers used for impulse response recovery is $N_p=157$. It is clear that MSE from both algorithms is decreasing with the CNR increase, but CoSaMP has better recovery performance in low noise conditions than OMP.

Fig. 2b shows the MSE performance of the two algorithms against channel length (max delay spread of the channel). The length of the channel model is defined by the group delay values (see table 1). CNR is fixed at 20dB. The number of pilot carriers used for impulse response recovery is $N_p=157$. Both algorithms show similar recovery performance that does not depend on the channel length. It is noticeable that OMP provides less stable results than CoSaMP. This can be explained by OMP's greedy nature, that does not give reconstruction guarantees.

Fig. 2c presents the MSE performance of the two algorithms against the value of sparsity parameter K , which should be equal to a number of signal propagation paths in the channel (channel sparsity). Both of the algorithms require this parameter at the input. From the structure of algorithm 1 it is clear that OMP uses parameter K only at step 2 for iteration count, while CoSaMP uses parameter K at steps 2, 3 and 6 for iteration count, support assumption update and pruning of the recovered components. Because of that CoSaMP is significantly more sensitive to the correctness of value K and this clearly visible in the result of simulation.

Fig. 2d compares the MSE performance of the two algorithms against a number of pilot carriers N_p used for the recovery. All channel model parameters are according to table 1. CNR is fixed at 20dB. We observe that CoSaMP requires more pilot carriers to achieve the same recovery performance level as OMP. This is especially noticeable when small number of pilot carriers is used.

Table 1 – SFN channel model parameters

Group	A						B					
Group delay, μs	0						typical 80 or varies from 6 to 250					
Path №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Delay $\tau_i, \mu\text{s}$	0	0,2	0,5	1,6	2,3	5	0	0,2	0,5	1,6	2,3	5
Total delay, μs	0	0,2	0,5	1,6	2,3	5	80	80,2	80,5	81,6	82,3	85
Path Loss, dB	-3	0	-2	-6	-8	-10	-9	-6	-8	-12	-14	-16

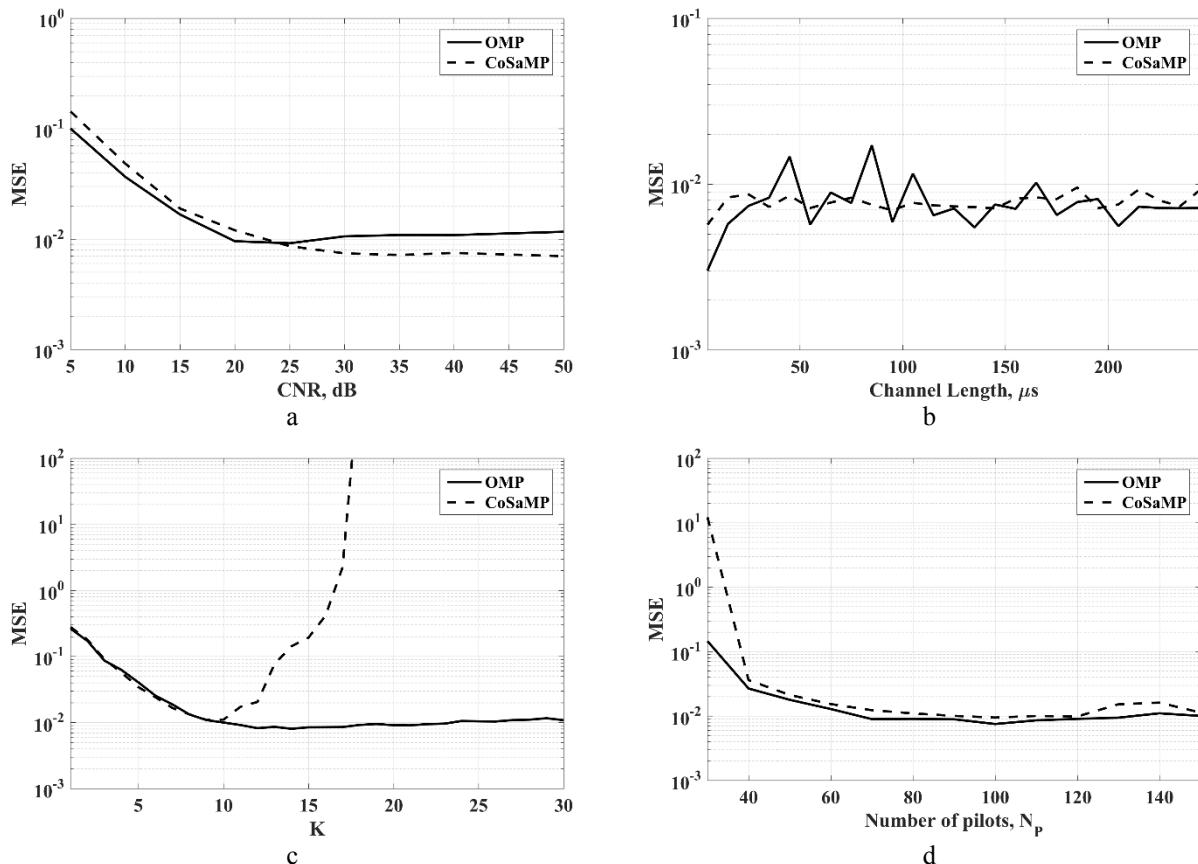


Figure 2 – Simulation results of Channel State Information recovery with OMP and CoSaMP algorithms: (a) MSE of the recovery versus CNR, (b) MSE versus channel length, (c) MSE versus sparsity parameter K, (d) MSE versus number of pilots used for recovery

CONCLUSIONS

In this paper we have provided comparison of two CS algorithms in context of channel impulse response estimation in OFDM based system. Simulation results based on ISDB-T standard shows that OMP algorithms is more sensitive to noise and does not guarantee the recovery performance for every symbol. CoSaMP algorithm requires more pilot carriers than OMP for the same level of recovery performance but provides stable MSE performance of the recovery. Both algorithms require a priori knowledge of channel sparsity but CoSaMP is very sensitive to a correctness of this parameter. Unfortunately, in real life channel sparsity is not known a priori and moreover is not constant over time. This significantly limits applicability of these algorithms in real wireless OFDM receivers. Nevertheless, CS approach shows impressive capability of channel impulse response recovery from significantly smaller amount of pilot carriers than traditional LS based

linear methods require. CS-based Channel Estimation is promising technique which worth of further investigation.

REFERENCES

1. Proakis J. G. Digital communications 4ed. New York, McGraw-Hill, 1983, 1002 p.
2. Van de Beek J-J., Edfors O., Sandell M., et al. On Channel Estimation in OFDM Systems, *Vehicular Technology: 45th international conference, Chicago, 25–28 july 1995: proceedings*. Chicago, IEEE, 1995, Vol. 2, pp. 815–819. DOI: 10.1109/VETEC.1995.504981
3. Li Y. Pilot-Symbol-Aided Channel Estimation for OFDM in Wireless Systems, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2000, Vol. 49, Issue 4, p. 1207-1215. DOI: 10.1109/25.875230
4. Wang X., Wu Y., Chouinard J. Y. Modified Channel Estimation Algorithms for OFDM Systems with Reduced Complexity, *Signal processing: 7th international conference, Beijing, 31 august – 4 september 2004: proceedings*. Beijing, IEEE, 2004, Vol. 2. P. 1747–1751. DOI: 10.1109/ICOSP.2004.1452558

5. Khan M. Z. Low-Complexity ML Channel Estimation Schemes for OFDM, *Conference on networks: 13 th international conference, Kuala Lumpur, 16–18 november 2005: proceedings*. Kuala Lumpur, IEEE, 2005, Vol. 2, pp. 607–612. DOI: 10.1109/ICON.2005.1635572
6. Zhou Y., Herdin M., Sayeed A. M., Bonek E. Experimental study of MIMO channel statistics and capacity via the virtual channel representation [Electronic resource]. Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/266c/3a3e8228381a9335df7d868ba5d0d2803c38.pdf>
7. Donoho D. L Compressed sensing, *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, Vol. 52, No. 4, pp. 1289–1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582
8. Candes E. J., Wakin M. B. An Introduction To Compressive Sampling, *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, Vol. 25, Issue 2, pp. 21–30. DOI: 10.1109/MSP.2007.914731
9. Baraniuk R. G. Compressive Sensing[Lectures Notes], *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, Vol. 24, Issue 4, pp. 118–121. DOI: 10.1109/MSP.2007.4286571
10. Berger C. R., Wang Z. H., Huang J. Z. et al. Application of compressive sensing to sparse channel estimation, *IEEE Communication Magazine*, 2010, Vol. 48, Issue 11, pp. 164–174. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5621984
11. Cotter S. F., Rao B. D. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization, *IEEE Transaction on Communication*, 2002, Vol. 50, Issue 3, pp. 374–377. DOI: 10.1109/26.990897
12. Maechler P., Greisen P., Sporrer B. et al. Implementation of greedy algorithms for LTE sparse channel estimation, *Conference Signals, System and Computers: 44th Asilomar Conference, Pacific Grove, 7–10 November 2010: proceedings*. Pacific Grove, IEEE, 2010, pp. 400–405. DOI: 10.1109/ACSSC.2010.5757587
13. Tropp J. A., Gilbert A. C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit, *IEEE Transactions of Information Theory*, 2007, Vol. 53, Issue 12, pp. 4655–4666. DOI: 10.1109/TIT.2007.909108
14. Needell D., Tropp J. A. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, 2009, Vol. 26, Issue 3, pp. 301–321. DOI: 10.1016/j.acha.2008.07.002
15. Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcast: standard v. 2.2. [Effective from 18 March 2014]. ARIB, 2014, 195 p.
16. Universal mobile telecommunications systems; Deployment aspects: technical report: 3GPP TR 25.943 v14.0.0/ ETSI, 2017, 15 p.

Received 11.05.2018.

Accepted 25.05.2018.

УДК 654.1:004.94

ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ ЖАДІВНИХ МЕТОДІВ РОЗРІДЖЕНОЇ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ ДЛЯ ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛУ В СИСТЕМАХ З OFDM

Котляров В. В. – аспірант кафедри радіотехнічних пристрій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

Шпилька О. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри радіотехнічних пристрій та систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Для отримання інформації про стан каналу в системах на основі ортогонального частотного поділу (OFDM) традиційно використовується велика кількість пілотних несучих. Збільшення кількості пілотних несучих покращує оцінку стану каналу, але призводить до зниження спектральної ефективності системи.

Мета. Основна мета даної роботи дослідити практичні аспекти застосування техніки розрідженої дискретизації, яка дозволяє оцінювати канальну характеристику по невеликій кількості пілотних несучих, в контексті реальних OFDM систем.

Метод. Сучасна технологія розрідженої дискретизації (CS) пропонує відновлювати сигнали, які мають розріджене подання у деякому базисі, шляхом мінімізації L норми, що дозволяє використовувати меншу кількість вибірок ніж вимагають класичні методи. Використовуючи розріджену природу імпульсної характеристики багатопроменевих каналів, ми застосували техніку розрідженої дискретизації для оцінки каналу в системах OFDM з пілотними несучими на прикладі стандарту ISDB-T.

Результати. В даній роботі порівнюються результати оцінки каналу для двох найпопулярніших алгоритмів відновлення на основі CS-Orthogonal Matching Pursuit (OMP) і Compressive Sampling Matching Pursuit (CoSaMP). Наведено показники середньоквадратичної помилки (MSE) для алгоритмів оцінки каналу на основі CS. Результати моделювання показують, що CoSaMP забезпечує більш стабільні результати, але для отримання хорошої якості оцінки вимагає більше пілотних несучих, ніж OMP. Обидва алгоритми вимагають апріорного знання рівня розрідженості канальної характеристики, але CoSaMP набагато більш чутливий до правильності цієї інформації.

Висновки. Метод розрідженої дискретизації показує вражаочу здатність відновлення імпульсної характеристики каналу по значно меншій кількості пілотних несучих, ніж вимагають традиційні лінійні методи. Однак потреба популярних CS методів відновлення в апріорно знанні рівня розрідженості характеристики суттєво обмежує можливість застосування цих алгоритмів в реальних приймачах OFDM. Проте, оцінка каналу на основі CS є багатообіцяючим методом, який заслуговує подальшого вивчення з метою усунення даного обмеження.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: OFDM, багатопроменевий канал, оцінка характеристики каналу, розрідженена дискретизація.

УДК 654.1:004.94

ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЖАДНЫХ МЕТОДОВ РАЗРЕЖЕННОЙ ДИСКРЕТИЗАЦИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛА В СИСТЕМАХ С OFDM

Котляров В. В. – аспирант кафедры радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского», Киев, Украина.

Шпилька О. О. – канд. техн. наук, доцент кафедри радиотехнических устройств и систем Национального технического университета Украины «Киевский политехнический университет», Киев, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальність. Для получения информации о состоянии канала в системах на основе ортогонального частотного разделения (OFDM) традиционно используется большое количество пилотных несущих. Увеличение количества пилотных несущих улучшает оценку состояния канала, но приводит к снижению спектральной эффективности системы.

Цель. Основная цель данной работы исследовать практические аспекты применения техники разреженной дискретизации, которая позволяет оценивать канальную характеристику по небольшому количеству пилотных несущих, в контексте реальных OFDM систем.

Метод. Современная технология разреженной дискретизации (CS) предлагает восстанавливать сигналы, которые имеют разреженное представление в некотором базисе, путем минимизации L_1 нормы, что позволяет использовать меньшее количество выборок чем требуют классические методы. Используя разреженную природу импульсной характеристики многолучевых каналов, мы применили технику разреженной дискретизации для оценки канала в системах OFDM с пилотными несущими на примере стандарта ISDB-T.

Результаты. В данной работе сравниваются результаты оценки канала для двух самых популярных алгоритмов восстановления на основе CS-Orthogonal Matching Pursuit (OMP) и Compressive Sampling Matching Pursuit (CoSaMP). Приведены показатели среднеквадратичной ошибки (MSE) для алгоритмов оценки канала на основе CS. Результаты моделирования показывают, что CoSaMP обеспечивает более стабильные результаты, но для получения хорошего качества оценки требует больше пилотных несущих, чем OMP. Оба алгоритма требуют априорного знания степени разреженности канальной характеристики, но CoSaMP гораздо более чувствителен к правильности этой информации.

Выводы. Метод разреженной дискретизации показывает впечатляющую способность восстановления импульсной характеристики канала по значительно меньшему количеству пилотных несущих, чем требуют традиционные линейные методы. Однако потребность популярных CS методов восстановления в априорном знании степени разреженности характеристики серьезно ограничивает применимость этих алгоритмов в реальных приемниках OFDM. Тем не менее, оценка канала на основе CS является многообещающим методом, который заслуживает дальнейшего изучения с целью устранения данного ограничения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: OFDM, многолучевой канал, оценка характеристики канала, разреженная дискретизация.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Proakis J.G. Digital communications 4ed. / J. G. Proakis. – New York : McGraw-Hill, 1983. – 1002 p.
2. On Channel Estimation in OFDM Systems / [J.-J. van de Beek, O. Edfors, M. Sandell, et al.] // Vehicular Technology: 45th international conference, Chicago, 25–28 july 1995: proceedings. – Chicago : IEEE, 1995. – Vol. 2. – P. 815–819. DOI: 10.1109/VETEC.1995.504981
3. Li Y. Pilot-Symbol-Aided Channel Estimation for OFDM in Wireless Systems / Y. Li // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2000. – Vol. 49, Issue 4. – P. 1207–1215. DOI: 10.1109/25.875230
4. Wang X. Modified Channel Estimation Algorithms for OFDM Systems with Reduced Complexity / X. Wang, Y. Wu, J. Y. Chouinard // Signal processing: 7th international conference, Beijing, 31 august – 4 september 2004: proceedings. – Beijing : IEEE, 2004. – Vol. 2. – P. 1747–1751. DOI: 10.1109/ICOSP.2004.1452558
5. Khan M. Z. Low-Complexity ML Channel Estimation Schemes for OFDM / M. Z. Khan // Conference on networks: 13th international conference, Kuala Lumpur, 16–18 november 2005: proceedings. – Kuala Lumpur: IEEE, 2005. – Vol. 2. – P. 607–612. DOI: 10.1109/ICON.2005.1635572
6. Zhou Y. Experimental study of MIMO channel statistics and capacity via the virtual channel representation [Electronic resource] / Y. Zhou, M. Herdin, A. M. Sayeed, E. Bonek. – Access mode: <https://pdfs.semanticscholar.org/266c/3a3e8228381a9335df7d868ba5d0d2803c38.pdf>
7. Donoho D.L Compressed sensing / D. L. Donoho // IEEE Transactions on Information Theory. – 2006. – Vol. 52, № 4. – P. 1289–1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582
8. Candes E. J. An Introduction To Compressive Sampling / E. J. Candes, M. B. Wakin // IEEE Signal Processing Magazine. – 2008. – Vol. 25, Issue 2. – P. 21–30. DOI: 10.1109/MSP.2007.914731
9. Baraniuk R.G. Compressive Sensing[Lectures Notes] / R. G. Baraniuk // IEEE Signal Processing Magazine. – 2007. – Vol. 24, Issue 4. – P. 118–121. DOI: 10.1109/MSP.2007.4286571
10. Application of compressive sensing to sparse channel estimation / [C. R. Berger, Z. H. Wang, J. Z. Huang, et al.] // IEEE Communication Magazine. – 2010. – Vol. 48, Issue 11. – P. 164–174. DOI: 10.1109/MCOM.2010.5621984
11. Cotter S. F. Sparse channel estimation via matching pursuit with application to equalization / S. F. Cotter, B. D. Rao // IEEE Transaction on Communication. – 2002. – Vol. 50, Issue 3. – P. 374–377. DOI: 10.1109/26.990897
12. Implementation of greedy algorithms for LTE sparse channel estimation / [P. Maechler, P. Greisen, B. Sporrer et al.] // Conference Signals, System and Computers: 44th Asilomar Conference, Pacific Grove, 7–10 November 2010: proceedings – Pacific Grove: IEEE, 2010. – P. 400–405. DOI: 10.1109/ACSSC.2010.5757587
13. Tropp J. A. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit / J. A. Tropp, A. C. Gilbert // IEEE Transactions of Information Theory. – 2007. – Vol. 53, Issue 12. – P. 4655–4666. DOI: 10.1109/TIT.2007.909108
14. Needell D. CoSaMP: Iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples / D. Needell, J. A. Tropp // Applied and Computational Harmonic Analysis. – 2009. – Vol. 26, Issue 3. – P. 301–321. DOI: 10.1016/j.acha.2008.07.002
15. Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcast: standard v. 2.2. [Effective from 18 March 2014]. – ARIB, 2014. – 195 p.
16. Universal mobile telecommunications systems; Deployment aspects: technical report: 3GPP TR 25.943 v14.0.0/ ETSI. – 2017, 15 p.

УДК 519.24

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ И ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА

Кошевої Н. Д. – д-р техн. наук, профессор, заведуючий кафедрою авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

Костенко Е. М. – д-р техн. наук, доцент, Полтавская государственная аграрная академия, Украина, Полтава.

Беляева А. А. – аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Впервые предложено применение методов табу-поиска, случайного поиска, роя частиц для построения оптимальных по стоимости планов эксперимента при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора.

Цель работы – провести сравнительный анализ разработанных методов оптимизации, таких как табу- поиск, случайный поиск, рой частиц при поиске оптимальных планов проведения эксперимента во время исследования весоизмерительной системы и терморегулятора.

Метод. Предложены методы построения оптимальной по стоимости реализации матрицы планирования эксперимента с использованием алгоритмов роя частиц, табу-поиска и случайного поиска. В начале вводится количество факторов и стоимость переходов для каждого уровня факторов. Затем с учетом введенных данных формируется исходная матрица планирования эксперимента. При использовании алгоритма табу-поиска на каждом шаге итерации в качестве нового текущего решения выбирается лучшее решение в окрестности текущего и осуществляется проверка не находится ли оно в списке табу. Таким образом происходят вычисления, пока алгоритм не достигнет заданного числа итераций. Список табу формируется из решений, имеющих минимальную стоимость. Метод случайного поиска основан на перестановке столбцов матрицы планирования. Количество итераций алгоритма задается пользователем. Метод роя частиц основан на моделировании поведения популяции частиц. В каждой точке, где побывала частица, рассчитывается значение стоимости проведения эксперимента. При этом каждая частица запоминает, какое (и где) лучшее значение стоимости эксперимента она лично нашла и где расположена точка, являющаяся лучшей среди всех точек, которые разведали частицы. На каждой итерации частицы корректируют свою скорость (модуль и направление). Через некоторое количество итераций частицы собираются вблизи наиболее хорошей точки. Затем среди всех новых точек осуществляется проверка, не нашли ли мы новую глобально лучшую точку, и, если нашли, запоминаем ее координаты и значение стоимости проведения эксперимента в ней. Затем рассчитывается выигрыш по сравнению с исходной стоимостью проведения эксперимента.

Результаты. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенные методы, которое использовано для проведения вычислительных экспериментов по исследованию свойств этих методов при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Синтезированы оптимальные по стоимости реализации планы экспериментов, а также приведены выигрыши в результатах оптимизации по сравнению с исходной и максимальной стоимостями проведения эксперимента.

Выводы. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенных методов и реализующего их программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для применения на практике при построении оптимальных матриц планирования экспериментов.

Ключевые слова: метод, оптимизация, рой частиц, планирование экспериментов, табу- поиск, оптимальный план, случайный поиск, стоимость.

НОМЕНКЛАТУРА

δ – погрешность измерения, %;

S – чувствительность (коэффициент передачи);

α – угол наклона весоизмерительного лотка, град;

W – влажность сыпучего материала, %;

f_d – коэффициент трения сыпучего материала в движении;

$b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123}$ – коэффициенты математической модели при исследовании весоизмерительной системы;

U_m – напряжение питания измерительного моста, В;

U_n – напряжение питания терморегулятора, В;

T – температура воздушной среды в зоне датчика температуры, °C;

R_h – сопротивление нагрузки терморегулятора, кОм;

© Кошевої Н. Д., Костенко Е. М., Беляєва А. А., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-17

$U_{\text{вых}}$ – напряжение на выходе терморегулятора, В;

G – граф;

N – множество вершин графа;

t – время работы программы, с;

B – выигрыш;

C_{\min} – минимальная стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

$C_{\text{исх}}$ – исходная стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

$S_{i,j}$ – итоимость перехода от i -го опыта к j -му, усл.ед.о бщая стоимость проведения эксперимента, усл.ед.;

k – количество факторов.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные методы широко используются как в науке, так и в промышленности. При этом глав-

ное значение – повышение эффективности экспериментальных исследований, которые направлены на получение адекватной математической модели процесса. Применение планирования эксперимента делает поведение экспериментатора организованным и целенаправленным, способствует существенному повышению надежности полученных результатов и производительности труда экспериментатора. Объект исследования: процессы оптимизации по стоимостным затратам планов многофакторного эксперимента для исследования весоизмерительной системы и терморегулятора. Предмет исследования: результаты исследования методов оптимизации планов многофакторных экспериментов при изучении весоизмерительной системы и терморегулятора. Цель исследования: получение наибольшего объема информации о воздействии исследуемых факторов на производственный процесс. После этого происходит построение математической модели исследуемого объекта. А также получить эти модели нужно с минимальными стоимостными и временными затратами. Особенно важное значение это приобретает при исследовании дорогостоящих и длительных процессов.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача оптимизации по стоимостным затратам планов экспериментов является NP-сложной, поэтому для своего решения требует значительных времени и большого объема вычислений, которые быстро растут с увеличением размерности задачи. В общем случае задачу выбора оптимального плана многофакторного эксперимента можно сформулировать следующим образом.

Имеется полный взвешенный ориентированный граф G с множеством вершин $N=\{1,2,\dots,n\}$, где $n=2^k$, k -количество факторов. Веса всех дуг неотрицательны, необходимо найти путь с минимальной длиной. Стоимость перехода от i -го опыта к j -му равна $S_{i,j}$. Необходимо найти стоимость проведения эксперимента $S_{\text{общ}}$ такую, что

$$S_{\text{общ}} = \sum_{j=2i=1}^{n-k} S_{i,j} \rightarrow \min .$$

Оптимальным решением задачи выступает такая перестановка строк матрицы планирования эксперимента, которая позволяет найти минимальную стоимость проведения эксперимента. С увеличением числа факторов (k) количество преобразований значительно возрастает. Следовательно целесообразно пытаться найти решения с помощью приближенных алгоритмов, таких как алгоритм случайного поиска, табу-поиска, роя частиц.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для решения этой задачи возможно применение методов комбинаторной оптимизации [1–5]. Известны примеры построения многофакторных планов эксперимента [6–10].

© Кошевой Н. Д., Костенко Е. М., Беляева А. А., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-17

римента, которые основаны на использовании таких методов оптимизации как: полный перебор [6], случайный поиск [6]. Была доказана эффективность применения этих методов при исследовании весоизмерительной системы и терморегулятора. Каждый из этих методов имеет свои преимущества и недостатки. Их основными недостатками выступают: низкие показатели быстродействия, и то что не всегда найденное решение является точным, а удается найти только близкое к оптимальному решение.

Поэтому целесообразно для сравнения результатов оптимизации планов эксперимента применить следующие алгоритмы оптимизации: рой частиц, табу-поиск, случайный поиск (перестановки столбцов матрицы планирования). Обширное исследование приложений метода роя частиц сделано Поли [7, 8], В. Я. Гальченко и А. Н. Якимовым [9], а также Ши [10].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве весоизмерительной системы применяется система [11], которая обеспечивает возможность моделирования процессов измерения весового расхода сыпучих материалов и дает повышение точности измерения. На рис. 1 приведена функциональная схема весоизмерительной системы, а конструкция измерительного лотка и общий вид системы показаны на рис. 2.

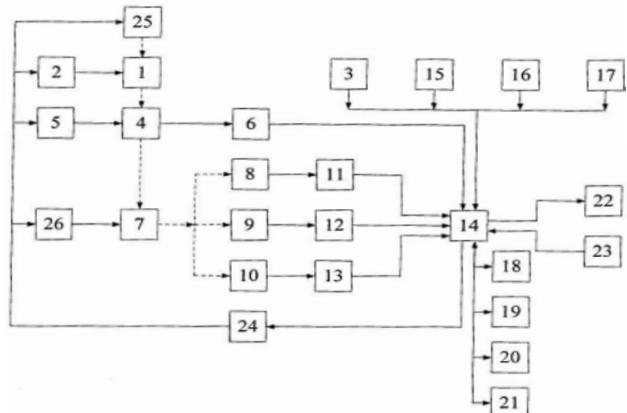


Рисунок 1 – Функциональная схема весоизмерительной системы

Весоизмерительная система включает в себя бункер 1 с дозируемым компонентом, электровибратор 2 и датчик влажности материала 3 расположены в бункере. Под бункером установлен ленточный конвейер 4 с электроприводом 5. Также в состав входит датчик скорости движения 6 ленты конвейера. Лоток 7 закреплен под конвейером. Измерительный лоток соединен с помощью шарнирных соединений с тензорезистивными датчиками силы 8, 9, 10, которые подключены к аналого-цифровым преобразователям 11, 12, 13, которые соединены с микропроцессором 14.

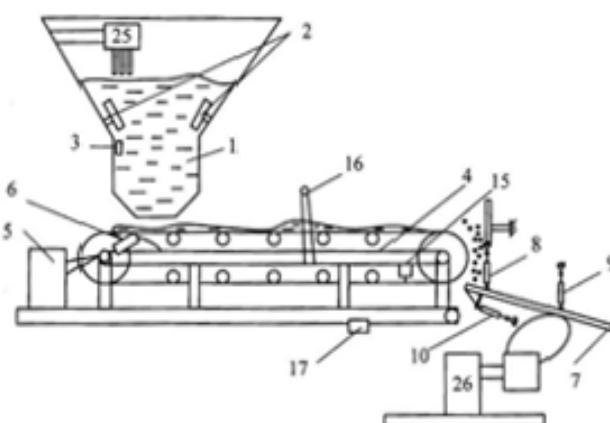


Рисунок 2 – Общий вид системы и конструкция измерительного лотка

Датчик растяжения ленты 15, концевые выключатели 16, датчик скорости движения ленты конвейера, закрепленные на конвейере, и датчик температуры 17 подключены к микропроцессору, который соединен с адресным дешифратором 18, накопителем памяти 19, а также с оперативным запоминающим устройством 20, регистром адреса 21, блоком индикации 22, функциональной клавиатурой 23, цифро-аналоговым преобразователем 24, который в свою очередь подключен к электроприводу 5 и электровибратору 2.

Через цифро-аналоговый преобразователь 24 к микропроцессору 14 подключены дозатор 25, который расположен в бункере 1, и электропривод 26 измерительного лотка 7.

На ленточный конвейер 4 поступает шихта из бункера 1, а затем – на измерительный лоток 7. С помощью концевых выключателей 16, размещенных под поверхностью конвейера 4, контролируется поступление сыпучего материала на ленточный конвейер. Если сыпучий материал поступает в необходимом количестве на ленточный конвейер 4, то не срабатывают концевые выключатели 16, а если в меньшем количестве, то они срабатывают. Если срабатывают концевые выключатели 16, то сигнал подается на микропроцессор 14, а затем с него через цифро-аналоговый преобразователь 24 сигнал поступает на электровибратор 2. В случае если поступление сыпучего материала не началось, то микропроцессор 14 подает сигнал на электропривод 5 ленточного конвейера 4, чтобы осуществить его остановку, и на блок индикации 22 – сигнал аварийной остановки ленточного конвейера 4.

Сыпучий материал с конвейера поступает на измерительный лоток 7. Сыпучий материал, который движется по измерительному лотку 7, воздействует на тензорезистивные датчики силы растяжения (ТДС) 8, 9, 10. Сигналы с ТДС посредством аналого-цифровых преобразователей 11, 12, 13 преобразовываются в цифровые и обрабатываются микропроцессором 14. В предлагаемой системе используется шарнирное крепление всех узлов, что обеспечивает возможность избавления от попереч-

ных сил и моментов, возникающих в результате деформации и температурного влияния отдельных деталей и узлов монтажа.

Чтобы обеспечить учет влияния влажности сыпучего материала применяется датчик влажности 3, который соединен с микропроцессором 14. В случае, когда влажность материала отличается от заданной, микропроцессор 14 сигнализирует оператору о необходимости изменения угла наклона измерительного лотка 7.

Чтобы учсть влияние температуры используется микроэлектронный температурный датчик 17, который соединен с микропроцессором 14. Количество шихты, поступающей на измерительный лоток 7, регулируется изменением скорости движения ленты конвейера 4. Чтобы это осуществить в системе применяют датчик скорости движения конвейерной ленты.

В случае, когда расход шихты недостаточный, микропроцессор 14 выдает сигнал на электропривод 5 конвейера 4 с целью повышения скорости движения конвейерной ленты. А в случае, когда расход шихты превышает требуемое значение, микропроцессор 14 выдает сигнал на электропривод 5 конвейера 4, чтобы уменьшить скорость движения конвейерной ленты. Выполнение этих действий происходит до тех пор, пока расход материала не будет соответствовать заданной величине.

В микропроцессоре 14 сохраняется матрица планирования эксперимента. В качестве критериев оптимизации были выбраны такие технические показатели весоизмерительной системы: погрешность измерения δ , %; чувствительность (коэффициент передачи) S . Факторы, которые влияют на эти показатели: X_1 – угол наклона весоизмерительного лотка, α , град; X_2 – влажность сыпучего материала, W , %; X_3 – коэффициент трения сыпучего материала в движении, f_d .

Для установки значений уровней факторов, которые задаются первой строкой матрицы планирования, микропроцессор 14 через цифро-аналоговый преобразователь 24 подает сигнал на электропривод 26, который устанавливает соответствующий угол α наклона измерительного лотка 7. Влажность сыпучего материала, которая измеряется датчиком 3, в микропроцессоре 14 сравнивается с требуемым значением, которое задается первой строкой матрицы планирования. В случае рассогласования этих значений микропроцессор 14 через цифро-аналоговый преобразователь 24 выдает сигнал на дозаторы 25 для изменения влажности W материала. Изменение коэффициента трения f_d достигается за счет замены типа материала, погружаемого в бункер 1.

Сразу после установки значений уровней факторов, которые задаются первой строкой матрицы планирования, вес сыпучего материала вычисляется микропроцессором 14. В микропроцессоре еще вычисляется и погрешность измерения δ . Потом устанавливаются значения уровней факторов, которые задаются второй строкой матрицы планирования эксперимента. После выполнения всех опытов плана эксперимента в

микропроцессоре 14 вычисляются коэффициенты математической модели:

$$\delta = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + \\ + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3.$$

Используя математическую модель, определяют оптимальные параметры a , W , f_d , которые обеспечивают минимальную погрешность δ весоизмерительной системы.

Высокопроизводительная, безопасная и экономичная работа различных приборов и устройств требует применения современных методов и средств измерения параметров, которые характеризуют ход производственного процесса и состояние оборудования. Температура – один из важнейших параметров технологических процессов. Она обладает некоторыми важнейшими особенностями, что обуславливает необходимость использования большого числа методов и технических средств для ее точного измерения. При изготовлении различных приборов, деталей также необходимо обеспечить возможность ее регулировать для поддержки заданных температурных режимов, которые заложены в технологическом процессе. При исследовании полупроводникового терморегулятора [6, 13] в качестве независимых переменных, которые влияют на его работу, взяты обобщенные параметры: X_1 – напряжение питания измерительного моста U_m , В; X_2 – напряжение питания терморегулятора U_n , В; X_3 – температура воздушной среды в зоне датчика температуры T , °C; X_4 – сопротивление нагрузки терморегулятора R_n , кОм. В качестве параметра оптимизации выбрано напряжение на выходе терморегулятора $U_{\text{вых}}$, В.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Было разработано программное обеспечение, реализующее методы табу-поиска (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63466) случайного поиска (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №63747), роя частиц (Свід. про реєстрацію авторського права на твір №71243). Язык программирования – Java. Просчеты выполнялись на компьютере с процессором Intel Pentium G620 с частотой 2.60 GHz. Количество факторов и стоимости переходов уровней факторов вводятся с клавиатуры. Для выявления закономерностей дозирования и нахождения оптимальных режимов и конструктивных параметров весоизмерительной системы был выбран начальный план ПФЭ типа 2^k (число факторов $k=3$, число опытов $N=8$). Матрица планирования такого эксперимента приведена в таблице 1. С учетом того, что опыты дорогостоящие, принято решение оптимизировать начальный план по критерию минимума стоимостных затрат на его реализацию. Стоимости изменений значений уровней факторов от «-1» к «+1» и от «+1» к «-1» представлены в таблице 2, а стоимости начальной установки уровней факторов – в табл. 3.

Таблица 1 – Матрица планирования начального эксперимента

Номер опыта	Фактор		
	X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1

Таблица 2 – Стоимости изменений значений уровней факторов

Фактор	Стоимость изменения, усл.ед.	
	От «-1» к «+1»	От «+1» к «-1»
$X_1(a)$	12,0	8,0
$X_2(W)$	16,0	24,0
$X_3(f_d)$	10,0	10,0

Таблица 3 – Стоимости начальной установки уровней факторов

Фактор	Стоимость изменения, усл.ед.	
	От «0» к «+1»	От «0» к «-1»
$X_1(a)$	6,0	4,0
$X_2(W)$	8,0	12,0
$X_3(f_d)$	10,0	10,0

Матрица планирования эксперимента при исследовании полупроводникового терморегулятора [12] приведена в табл. 4. Стоимости изменений значений уровней факторов представлены в табл. 5.

Таблица 4 – Матрица планирования начального эксперимента

Номер опыта	Фактор			
	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1
3	-1	+1	-1	-1
4	+1	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1
6	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1
8	+1	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1
11	-1	+1	-1	+1
12	+1	+1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1
14	+1	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1

Таблица 5 – Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов, усл.ед.	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4
из «-1» в «+1»	2,0	2,4	60,0	1,6
из «+1» в «-1»	2,4	2,8	30,0	2,0
из «0» в «-1»	1,2	1,4	15,0	1,0
из «0» в «+1»	1,0	1,2	30,0	0,8

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность методов: табу-поиск, случайный поиск (перестановки столбцов матрицы планирования), роя частиц. Для стоимостей изменения уровней факторов при исследовании весоизмерительной системы, представленных в табл. 2 и табл. 3, получены результаты оптимизации, отраженные в табл. 6. Сравнительная характеристика методов при исследовании весоизмерительной системы представлена в табл. 7.

Для стоимостей изменения уровней факторов при исследовании полупроводникового терморегулятора, представленных в табл. 5, получены результаты оптимизации, отраженные в табл. 8 и табл. 9. Сравнительная характеристика предложенных методов при исследовании полупроводникового терморегулятора представлена в таблице 10. При этом исходная стоимость проведения эксперимента 202,4 усл.ед., а максимальная 611,6 усл.ед.

Таблица 6 – Планы эксперимента для исследования весоизмерительной системы дозирования сыпучих материалов

Полный перебор				Алгоритм табу-поиска			Метод роя частиц				
Номер опыта	Обозначение факторов			Номер опыта	Обозначение факторов			Номер опыта	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3		X_1	X_2	X_3
1	-1	-1	-1	7	1	1	-1	5	1	-1	-1
2	-1	-1	1	3	-1	1	-1	7	1	1	-1
6	1	-1	1	4	-1	1	1	3	-1	-1	1
5	1	-1	-1	8	1	1	1	4	-1	1	1
7	1	1	-1	6	1	-1	1	8	1	1	1
8	1	1	1	5	1	-1	-1	6	1	-1	1
4	-1	1	1	1	-1	-1	-1	2	-1	-1	1
3	-1	1	-1	2	-1	-1	1	1	-1	-1	-1

Таблица 7 – Сравнительная характеристика методов при исследовании весоизмерительной системы

Метод оптимизации	Стоимость реализации эксперимента, усл.ед.	Время счета программы t , с	Выигрыш, раз
Рой частиц	104	0,01	1,59
Табу-поиск	108	0,52	1,53
Полный перебор	102	10	1,61
Случайный поиск	102	25	1,61

Таблица 8 – Исходный и оптимальные планы (табу-поиск, случайный поиск) ПФЭ при исследовании терморегулятора

Исходный план				Табу-поиск				Случайный поиск(перестановка столбцов матрицы планирования)				
Номер опыта	Обозначение факторов			Номер опыта	Обозначение факторов			Номер опыта	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4	X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	9	-1	-1	-1	6	+1	-1	+1
3	-1	+1	-1	-1	11	-1	+1	-1	5	-1	-1	+1
4	+1	+1	-1	-1	3	-1	+1	-1	10	+1	-1	-1
5	-1	-1	+1	-1	4	+1	+1	-1	14	+1	-1	+1
6	+1	-1	+1	-1	12	+1	+1	-1	9	-1	-1	-1
7	-1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1
8	+1	+1	+1	-1	15	-1	+1	+1	8	+1	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	8	+1	+1	+1	16	+1	+1	+1
10	+1	-1	-1	+1	7	-1	+1	+1	4	+1	+1	-1
11	-1	+1	-1	+1	5	-1	-1	+1	3	-1	+1	-1
12	+1	+1	-1	+1	13	-1	-1	+1	11	-1	+1	-1
13	-1	-1	+1	+1	14	+1	-1	+1	12	+1	+1	-1
14	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	+1	15	-1	+1	+1
15	-1	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1	7	-1	+1	+1
16	+1	+1	+1	+1	10	+1	-1	-1	13	-1	-1	+1

Таблица 9 – Исходный и оптимальный планы (рой частиц) ПФЭ при исследовании терморегулятора

Исходный план					Рой частиц				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1	-1	13	-1	-1	+1	+1
3	-1	+1	-1	-1	8	+1	+1	+1	-1
4	+1	+1	-1	-1	15	-1	+1	+1	+1
5	-1	-1	+1	-1	3	-1	+1	-1	-1
6	+1	-1	+1	-1	7	-1	+1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	11	-1	+1	-1	+1
8	+1	+1	+1	-1	16	+1	+1	+1	+1
9	-1	-1	-1	+1	12	+1	+1	-1	+1
10	+1	-1	-1	+1	4	+1	+1	-1	-1
11	-1	+1	-1	+1	14	+1	-1	+1	+1
12	+1	+1	-1	+1	10	+1	-1	-1	+1
13	-1	-1	+1	+1	9	-1	-1	-1	+1
14	+1	-1	+1	+1	5	-1	-1	+1	-1
15	-1	+1	+1	+1	6	+1	-1	+1	-1
16	+1	+1	+1	+1	2	+1	-1	-1	-1

Так как полученная математическая модель оказалась неадекватной [13], то было принято решение достроить план ПФЭ до плана ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП) [11]. При этом оптимальный план ПФЭ, полученный методом роя частиц, достраиваем методом итерационного планирования эксперимента до плана РЦКП посредством добавления строк. Оптимальные и исходный планы РЦКП, в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл. 11. Стоимости изменений значений уровней факторов приведены в табл. 12.

Сравнительная характеристика предложенных методов при исследовании полупроводникового терморегулятора представлена в таблице 13. Стоимость

исходного плана – 384,0 усл.ед., а максимальная стоимость – 384,9 усл.ед.

Таблица 10 – Сравнительная характеристика методов при исследовании терморегулятора

Метод оптимизации	Стоимость реализации эксперимента, усл.ед.	Выигрыш, раз
Анализ перестановок	130	1,56
Случайный поиск (перестановка строк матрицы планирования)	81,6	2,48
Рой частиц	69	2,93
Табу-поиск	72	2,81
Случайный поиск (перестановка столбцов матрицы планирования)	124	1,6

Таблица 11 – Исходный и оптимальные планы ОЦКП

Исходный план					Оптимальный план (табу-поиск)				Оптимальный план(рой частиц)				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов		
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3
1	- α	0	0	0	1	- α	0	0	0	7	0	0	0
2	+ α	0	0	0	8	0	0	0	+ α	2	+ α	0	0
3	0	- α	0	0	7	0	0	0	- α	6	0	0	+ α
4	0	+ α	0	0	2	+ α	0	0	0	15	0	0	0
5	0	0	- α	0	9	0	0	0	0	5	0	0	- α
6	0	0	+ α	0	10	0	0	0	0	3	0	- α	0
7	0	0	0	- α	11	0	0	0	0	4	0	+ α	0
8	0	0	0	+ α	12	0	0	0	0	14	0	0	0
9	0	0	0	0	4	0	+ α	0	0	12	0	0	0
10	0	0	0	0	13	0	0	0	0	13	0	0	0
11	0	0	0	0	3	0	- α	0	0	11	0	0	0
12	0	0	0	0	6	0	0	+ α	0	1	- α	0	0
13	0	0	0	0	14	0	0	0	0	9	0	0	0
14	0	0	0	0	15	0	0	0	0	10	0	0	0
15	0	0	0	0	5	0	0	- α	0	8	0	0	+ α

Таблица 12 – Стоимости изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений значений уровней факторов	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4
из «-1» в «-α»	1,2	1,4	15,0	1,0
из «+1» в «-α»	4,8	5,6	60,0	4,0
из «-1» в «+α»	4,0	4,8	120,0	3,2
из «+1» в «+α»	2,0	2,4	60,0	1,6
из «0» в «-α»	2,0	2,4	60,0	1,6
из «0» в «+α»	2,0	2,4	60,0	1,6
из «-α» в «0»	2,0	2,4	60,0	1,6
из «+α» в «0»	2,4	2,8	30,0	2,0
из «-α» в «+α»	8,0	9,6	240,0	6,4
из «+α» в «-α»	9,6	11,2	120,0	8,0
из «-1» в «0»	1,3	1,6	40,0	1,1
из «+1» в «0»	1,6	1,9	20,0	1,3

Таблица 13 – Сравнительная характеристика методов при исследовании полупроводникового терморегулятора

Метод оптимизации	Стоимость реализации эксперимента, усл.ед.	Выигрыш, раз
Анализ перестановок	193,4	1,99
Случайный поиск	166,2	2,31
Рой частиц	147,1	2,61
Табу-поиск	152,3	2,53

6 ОБСУЖДЕНИЯ

Разработанные программы позволяют найти минимальную стоимость проведения многофакторного эксперимента (МФЭ), последовательность реализации опытов, выигрыш по сравнению с исходной матрицей планирования и время счета. При исследовании весоизмерительной системы для значения стоимостей изменения уровней факторов, приведенных в табл. 2, получены результаты оптимизации планов эксперимента полным перебором, табу-поиском и методом оптимизации роем частиц (табл. 6). Как видно из табл. 7, выигрыши в результатах оптимизации при использовании метода полного перебора больше, чем при методах табу-поиска и роя частиц, и одинаковые с методом случайного поиска. Однако быстродействие выполнения вычислений при использовании метода полного перебора значительно ниже, чем при использовании методов табу-поиска и роя частиц.

При исследовании полупроводникового терморегулятора получены последовательности проведения опытов (табл. 8, 9), при которых стоимости проведения эксперимента имеют меньшие значения, чем при использовании метода ограниченного перебора.

Так как полученная математическая модель при исследовании полупроводникового терморегулятора оказалась неадекватной [13], было принято решение достроить план ПФЭ до плана ротатабельного центрального композиционного планирования (РЦКП). При этом оптимальный план ПФЭ, полученный методом роя частиц, был достроен методом итерационного планирования эксперимента до плана РЦКП путем добавления строк (табл. 11). Как видно из табл. 13

наибольший выигрыш при оптимизации этой достройки позволяет получить метод роя частиц.

ВЫВОДЫ

В результате проведенного исследования была решена актуальная задача получения последовательности опытов при проведении многофакторного эксперимента, которая дает возможность получить его минимальную стоимость.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые предложено применение методов: роя частиц, табу-поиска, случайного поиска для оптимизации по стоимости реализации планов многофакторного эксперимента. На примерах исследования весоизмерительной системы и терморегулятора доказана работоспособность и эффективность предложенных методов. Наше исследование показало, что поиск оптимального или близкого к оптимальному плана эксперимента при исследовании весоизмерительной системы с использованием метода случайного поиска дал наилучшие результаты. При исследовании полупроводникового регулятора наибольшие выигрыши позволили получить метод роя частиц. Также этот метод обладает большими показателями быстродействия, чем метод табу-поиска и метод случайного поиска.

Исследование может быть полезно научным работникам, которые интересуются методами планирования экспериментов, а также различными методами оптимизации параметров системы. Разработанное программное обеспечение, реализующее предложенные методы, а также проведенные эксперименты, которые подтверждают его работоспособность, можно рекомендовать для формирования оптимальных матриц планирования эксперимента.

Кроме исследования весоизмерительной системы и терморегулятора, рассмотренных в данной работе, по нашему мнению было бы интересно изучить применение разработанных методов на более широком наборе практических задач планирования экспериментов, таких как технологические процессы изготовления РЭА, процесс получения пористых материалов, изготовление деталей горячей штамповкой и др.

ЛІТЕРАТУРА/ЛІТЕРАТУРА

1. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing / D. S. Hoskins // Applied Optimal Designs. – 2007. – Vol. 4. – P. 147–179.
2. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics. // Journal of the American Statistical Association. – 2005. – Vol. 100, No. 471. – P. 1092–1093.
3. Bailey R. A. Combinatorics of optimal designs / R. A. Bailey, P. G. Cameron // Surveys in Combinatorics. – 2009. – Vol. 365. – P. 19–73.
4. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment. / [N. D. Koshevoy, E. M. Kostenko, V. A. Gordienko, V. P. Syroklyn] // Telecommunications and Radio Engineering. – 2011. – Vol. 170, No. 8. – P. 731–734.
5. Koshevoy N. D. Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes / N. D. Koshevoy, V. A. Gordienko, Ye. A. Sukhobrus // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – Vol. 73, No. 15. – P. 1383–1386.
6. Кошевий Н. Д. Оптимальное по стоимостным и времененным затратам планирование эксперимента / Н. Д. Кошевий, Е. М. Костенко. – Полтава : издатель Р.В. Шевченко, 2013. – 317 с.
7. Poli R. An analysis of publications on particle swarm optimisation applications. Technical Report CSM-469 (Department of Computer Science, University of Essex, UK). – may 2007.
8. Poli, R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation / R. Poli //Journal of Artificial Evolution and Applications. – 2008. – P. 1–10. DOI: 10.1155/2008/685175.
9. Гальченко В. Я. Популяционные метаэвристические алгоритмы оптимизации роем частиц : учебное пособие / В. Я. Гальченко, А. Н. Якимов. – Черкассы : ФЛП Третяков А. Н., 2015. – 160 с.
10. Shi X. H. Particle swarm optimization based algorithms for TPS and generalized TPS / X. H. Shi, Y. C. Liang, H. P. Lee // Information Processing Letters. – 2007. – Vol. 103. – P. 169–176.
11. Пат. №58098, Украина, МПК G01F 11/00. Ваговимірювальна система / М. Д. Кошовий, О. М. Костенко ; Заявник і патентоволодар Нац. аерокосм. ун-т ім. М.С. Жуковського «ХАІ». – №U201013004; заявл. 01.11.2010; опубл. 25.03.2011, Бюл. № 6. – 4 с.
12. Барабашук В. И. Планирование эксперимента в технике / В. И. Барабашук, Б. П. Креденцер, В. И. Мирошниченко. – К. : Техника, 1984. – 200 с.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2018.
Після доробки 15.04.2018.

УДК 519.24

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВАГОВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ТА ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА

Кошевий М. Д. – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

Костенко Е.М. – д-р техн. наук, доцент, Полтавська державна аграрна академія, Полтава, Україна.

Беляєва А.А. – аспірант кафедри авіаційних приладів і вимірювань, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вперше запропоновано використання методів табу-пошуку, випадкового пошуку, рою часток для побудови оптимальних за вартістю планів експерименту при дослідженні ваговимірювальної системи і терморегулятора.

Мета роботи – провести порівняльний аналіз розроблених методів оптимізації, таких як табу-пошук, випадковий пошук, рою часток, при пошуку оптимальних планів проведення експерименту під час дослідження ваговимірювальної системи і терморегулятора.

Метод. Запропоновано методи побудови оптимальної за вартістю реалізації матриці планування експерименту з використанням алгоритмів рою частинок, табу-пошуку і випадкового пошуку. На початку вводиться кількість чинників і вартості переходів для кожного рівня факторів. Потім з урахуванням введеніх даних формується вихідна матриця планування експерименту. При використанні алгоритму табу-пошуку на кожному кроці ітерації в якості нового поточного рішення вибирається краще рішення в околіці поточного і здійснюється перевірка чи не перебуває воно в списку табу. Таким чином відбуваються обчислення, поки алгоритм не досягне заданого числа ітерацій. Список табу формується з рішень, що мають мінімальну вартість. Метод випадкового пошуку заснований на перестановці стовпців матриці планування. Кількість ітерацій алгоритму задається користувачем. Метод рою часток заснований на моделюванні поведінки популяції частинок. У кожній точці, де побувала частинка, розраховується значення вартості проведення експерименту. При цьому кожна частка запам'ятовує, яке (і де) краще значення вартості експерименту вона особисто знайшла і де розташована точка, яка є країною серед усіх точок, які розвідали частинки. На кожній ітерації частинки коректують свою швидкість (модуль і напрямок). Через деяку кількість ітерацій частинки збираються поблизу найбільш хорошої точки. Потім серед усіх нових точок здійснюється перевірка, чи не знайшли ми нову глобально кращу точку, і, якщо знайшли, запам'ятовуємо її координати і значення вартості проведення експерименту в ній. Потім розраховується виграш в порівнянні з вихідною вартістю проведення експерименту.

Результати. Розроблено програмне забезпечення, що реалізує запропоновані методи, які використано для проведення обчислювальних експериментів з дослідження властивостей цих методів при дослідженні ваговимірювальної системи і терморегулятора. Синтезовані оптимальні за вартістю реалізації плани експериментів, а також наведені виграші в результатах оптимізації в порівнянні з вихідною і максимальною вартостями проведення експерименту.

Висновки. Проведені експерименти підтвердили працездатність запропонованих методів і програмного забезпечення, що їх реалізує, а також дозволяють рекомендувати їх для застосування на практиці при побудові оптимальних матриць планування експериментів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: метод, оптимізація, рій частинок, планування експериментів, табу-пошук, оптимальний план, випадковий пошук, вартість.

UDC 519.24

COMPARATIVE ANALYSIS OF OPTIMIZATION METHODS IN THE INVESTIGATION OF A WEIGHING SYSTEM AND THERMOREGULATOR

Koshevoy N. D. – Dr. Sc., Professor, Head of Department of Aircraft Instrumentation and Measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho “HAI”, Kharkiv, Ukraine.

Kostenko E. M. – Doctor of Technical Science, Associate Professor, Poltava State Agrarian Academy, Poltava, Ukraine.

Beliaieva A. A. – Post-graduate student of Department of Aircraft Instrumentation and Measurements, National Aerospace University named after M. E. Zhukovskoho “HAI”, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. For the first time, the use of taboo-search methods, random search, a swarm of particles for the construction of cost-effective experiment plans for the study of a weighing system and a temperature regulator was proposed.

Objective – to carry out a comparative analysis of the developed optimization methods, such as taboo search, random search, particle swarm when searching for the optimal plans for the experiment during the study of the weighing system and thermostat.

Method. Methods for constructing the experimentally optimal implementation matrix for the experiment using algorithms of a swarm of particles, taboo search and random search are proposed. In the beginning, the number of factors and cost of transitions for each level of factors is introduced. Then, taking into account the input data, the initial experimental design matrix is formed. When using the taboo search algorithm at each iteration step, the best solution in the neighborhood of the current solution is chosen as the new current solution and the check is made whether it is in the taboo list. Thus, calculations occur until the algorithm reaches the specified number of iterations. The list of taboos is formed from decisions that have a minimum cost. The random search method is based on permuting the columns of the planning matrix. The number of iterations of the algorithm is specified by the user. The method of the particle swarm is based on modeling the behavior of the particle population. At each point where the particle visited, the value of the experiment is calculated. In this case, each particle remembers which (and where) the best value of the cost of the experiment, she personally found and where the point is located, which is the best among all the points that explored the particles. At each iteration, the particles correct their velocity (modulus and direction). After a certain number of iterations, the particles are collected near the best point. Then, among all the new points, we check whether we have found a new globally better point, and if found, remember its coordinates and the value of the cost of conducting the experiment in it. Then the gain is calculated in comparison with the initial cost of the experiment.

Results. The software that implements the proposed methods was developed, which was used to conduct computational experiments to study the properties of these methods in the study of a weighing system and a temperature regulator. Optimized for the cost of implementation of the experiment plans were synthesized, as well as the gains in optimization results as compared to the initial and maximum costs of the experiment.

Conclusions. The conducted experiments confirmed the efficiency of the proposed methods and the software that implements them, and also allow them to be recommended for application in practice when constructing optimal experimental design matrices.

KEYWORDS: method, optimization, particle swarm, experiment planning, taboo-search, optimal plan, random search, cost.

REFERENCES

1. Hoskins D. S. Combinatorics and Statistical Inferecing. Applied Optimal Designs, 2007, Vol. 4, pp. 147–179.
2. Morgan J. P. Association Schemes: Designed Experiments, Algebra and Combinatorics, *Journal of the American Statistical Association*, 2005, Vol. 100, No. 471, pp. 1092–1093.
3. Bailey R. A., Cameron P. G., Combinatorics of optimal designs, *Surveys in Combinatorics*, 2009, Vol. 365, pp. 19–73.
4. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Gordienko V. A., Syrolyn V. P. Optimum planning of experiment in manufacturing the electronic equipment, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2011, Vol. 170, No. 8, pp. 731–734.
5. Koshevoy N. D., Gordienko V. A., Sukhobrus Ye. A., Optimization for the design matrix realization value with the aim to investigate technological processes, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2014, Vol. 73, No. 15, pp. 1383–1386.
6. Koshevoy N. D., Kostenko E. M., Optimal’noe po stoinostnym i vremennym zatrataam planirovanie eksperimenta. Poltava, izdatel’ Shevchenko R. V., 2013, 317 p.
7. Poli, R. An analysis of publications on particle swarm optimisation applications. Technical Report CSM-469 (Department of Computer Science, University of Essex, UK). may 2007.
8. Poli R. Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation, *Journal of Artificial Evolution and Applications*, 2008, pp. 1–10. DOI:10.1155/2008/685175.
9. Gal’chenko V. Ja., Jakimov A. N., 2015. Populacionnye metajevresticheskie algoritmy optimizacii roem chastic: Uchebnoe posobie. Cherkassy, FLP Tretjakov A. N., 160 p.
10. Shi X. H., Liang Y. C., Lee H. P., Particle swarm optimization based algorithms for TPS and generalized TPS, *Information Processing Letters*, 2007, Vol. 103, pp. 169–176.
11. Koshevoj N. D., Kostenko E. M., Weighing system. Patent 58098 UA, MPK: G01F 11/00, 2010.
12. Barabashhuk V. Y’, Kredencer B. P., Plany’rovany’e ekspery’menta v texny’ke. Kiev, Tehnika, 1984, 200 p.

УДК 004.93

АДАПТИВНЫЕ МАТРИЧНЫЕ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ КОНТРОЛЯ ПОТОКОВ ВИДЕО

Машталир С. В. – д-р техн. наук, доцент, проф. кафедры информатики Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

Столбовой М. И. – аспирант кафедры информатики Харьковского национального университета радиоэлектроники, Харьков, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. В настоящее время анализ многомерных данных является одним из приоритетных направлений научных исследований. Это связано с практически не контролируемым ростом объемов информации и возникновением необходимости получения/поиска различного рода полезных данных из нее. При этом анализ видеоданных является одним из наиболее сложных с вычислительной точки зрения не только из-за больших объемов обрабатываемых данных, но и, учитывая слабую структурированность видео, а также тот факт, что в целом ряде задач обработки видео существуют ограничения на время обработки. Одним из направлений решения этих проблем анализа видео является предварительная обработка видеоданных с целью получения их разбиения на однородные сегменты (сцены), что значительно сокращает временные и вычислительные затраты при дальнейшем контекстном анализе больших объемов видео информации. И, несмотря, на имеющиеся результаты в этом направлении, задача кластеризации/сегментации видеопоследовательностей остается чрезвычайно актуальной.

Цель. В работе рассмотрена проблема кластеризации многомерных потоковых данных на примере временной сегментации видеопоследовательностей.

Метод. Предложен метод контроля изменений в потоковых данных, что позволяет отслеживать моменты, существенно изменившиеся характеристики входных многомерных данных, на основе адаптивных матричных моделей с введением специализированного алгоритма настройки прогнозирующей модели.

Результаты. Проведенный эксперимент на видеопоследовательностях произвольной природы продемонстрировал возможность обнаружения границ сегментов в видео. При этом следует отметить, что предложенный подход существенно зависит от результатов пространственной сегментации исходных данных, которая необходима для получения множества характеристик, описывающих каждый видеокадр последовательности.

Выводы. Предложенный в работе метод позволяет проводить кластеризацию-сегментацию многомерных входных данных при помощи адаптивных матричных моделей. В качестве исходных данных в экспериментальной части использовались видеопоследовательности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: видеоданные, кластеризация, адаптивные матричные модели, критерии настройки, следящий сигнал.

НОМЕНКЛАТУРА

$x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N), \dots$ – входная последовательность данных;

$x(k)$, $\hat{x}(k)$ – прогнозируемый элемент последовательности;

\tilde{A} , \tilde{B} – матрицы настраиваемых параметров;

$E(x, y)$ – критерий идентификации;

α – параметр сглаживания;

$T^{TL}(k)$ – следящий сигнал Тригга-Лича;

$x(k) = \{x_{i_1 i_2}(k)\}$ – матрица параметров, характеризующая результаты сегментации отдельного кадра входной последовательности;

$k = 1, 2, \dots, N, \dots$ – текущее дискретное время;

A^h, B^h – $(n \times n)$ и $(v \times v)$ – матрицы параметров, подлежащие оцениванию;

n_A – размерность матрицы;

$\xi(k) = (n \times v)$ – матричный белый шум;

$Sp(\bullet)$ – символ следа матрицы;

$\|\bullet\|$ – матричная норма Фробениуса;

Δ – некоторый порог, определяющий изменение свойств;

$v(k) = x(k) - \hat{x}(k)$ – ошибка прогнозирования на k -м такте контроля сигнала $x(k)$;

$\eta_A(k)$, $\eta_B(k)$ – параметры шага поиска.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обработка и анализ мультимедиа контента является одной из важнейших научно-технических задач. Это напрямую связано с техническим прогрессом и увеличением числа приборов сбора подобной информации, что привело к значительному росту количества мультимедиа информации. Это в свою очередь существенно усложняет задачу поиска релевантных данных ввиду необходимости обработки огромных объемов данных. Особняком в этом стоят видео данные, т.к. зачастую они представляют собой весь комплекс мультимедиа содержимого и при этом с ростом качества видео данных (т.е. с увеличением разрешения и количества передаваемых в секунду кадров) количество необходимой для анализа информации возрастает экспоненциально. При этом одной из особенностей видеоданных является их априори слабая структурированность, что значительно усложняет контекстный анализ.

В связи с этим возникает задача структуризации видео, которую можно интерпретировать как задачу поиска однородных по содержимому сегментов ин-

формации, что, по сути, является темпоральной сегментацией (кластеризацией) видеопоследовательностей. При этом следует учитывать, что классические подходы к кластеризации для подобных данных мало- (либо вообще не-) применимы, т.к. зачастую данные поступают не в виде некоего конечного объема, а потоково, т.е. априори невозможно предположить характер поступающих далее данных. К тому же поиск соответствий между кадрами необходимо проводить в реальном времени или хотя бы в online режиме. Таким образом, существует необходимость разработки подходов по сегментации-кластеризации видеоданных.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На входе имеются видео информация, заданная последовательностью кадров. Для каждого кадра получена пространственная сегментация методом JSeg.

Результаты пространственной сегментации всей видеопоследовательности представлены в виде многомерной матричной последовательности $x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N), \dots$ $x(k) = \{x_{i_1 i_2}(k)\}; i_1 = 1, 2, \dots, n;$

$$i_2 = 1, 2, \dots, v.$$

В качестве итогового результата необходимо получить последовательность данных $\hat{x}(k)$, которую используем для отслеживания изменений свойств исходных данных, что, в свою очередь, используется для временной сегментации видеопоследовательностей.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящее время существует целый ряд подходов к сегментации видео [1–3]. В то же время, задачи сегментации-кластеризации с точки зрения обнаружения изменения свойств временных рядов достаточно часто встречаются во множестве практических приложений, а для их решения на сегодня разработано множество подходов и конкретных алгоритмов [4, 5]. Задача существенно усложняется, если контроль не обходимо производить в режиме реального времени, когда данные поступают на обработку одно за другим, зачастую с достаточно высокой частотой. В этой ситуации на первый план выходят методы раннего обнаружения разладок [6] и online кластеризации-сегментации [7]. Еще более задача усложняется, если объемом контроля являются потоки видео, при этом объектом контроля являются не скалярные или векторные наблюдения, а последовательности матричных сигналов. Конечно, матрицы наблюдений могут быть векторизованы, однако при этом резко возрастает размерность обрабатываемых векторов. В подобной ситуации более предпочтительными оказываются методы, основанные на непрямом подходе к кластеризации последовательности наблюдений [8], в рамках которого контролируются не собственно наблюдения, подлежащие анализу, а некоторые их характеристики, для расчета которых должен быть введен дополнительный контур предобработки входных

сигналов. Так в [9] была предложена процедура обнаружения изменений в многомерных потоках видео на основе последовательной кластеризации, при этом объектом кластеризации являлись статистические характеристики контролируемых процессов, такие как средние, дисперсии, коэффициенты корреляции, рассчитываемые в online режиме с помощью рекуррентных процедур. Такой подход подтвердил свою эффективность, однако он неявно предполагает, что обрабатываемая информация имеет стохастическую природу, что не всегда корректно в задачах обработки потоков видео. В связи с этим предполагается целесообразным разработать метод контроля и анализа потоков матричных сигналов, не апеллирующий к статистической природе обрабатываемых данных.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для описания входных сигналов, представленных в виде многомерной матричной последовательности, в [10] была введена прогнозирующая матричная автoregressионная модель вида

$$x(k) = \sum_{h=1}^{n_A} A^h x(k-h)B^h + \xi(k). \quad (1)$$

Вводя далее составные матрицы параметров $\tilde{A} = (A^1 : A^2 : \dots : A^{n_A})$ размерности $n \times nn_A$, $\tilde{B} = (B^1 : B^2 : \dots : B^{n_A})^T$ размерности $vn_A \times v$ и

$$\tilde{x}(k-1) = \begin{pmatrix} x(k-1) & \dots & 0 \\ \vdots & x(k-h) & \vdots \\ 0 & \dots & x(k-n_A) \end{pmatrix}$$

размерности $nn_A \times vn_A$. Выражение (1) может быть к компактной форме

$$x(k) = \tilde{A}\tilde{x}(k-1)\tilde{B} + \xi(k),$$

в соответствие которой может быть поставлена адаптивная матричная модель вида [8]

$$\hat{x}(k) = \tilde{A}(k-1)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1), \quad (2)$$

при этом $\tilde{A}(k-1)$, $\tilde{B}(k-1)$ получаются на основании предыдущих $(k-1)$ наблюдений $\tilde{x}(1), \tilde{x}(2), \dots, \tilde{x}(k-1)$.

Для настройки параметров адаптивной матричной модели (2) в [11] был предложен оптимальный градиентный алгоритм идентификации, минимизирующий одношаговые критерии

$$\begin{aligned} E(\tilde{x}(k), \tilde{A}) &= Sp(x(k) - \tilde{A}(k-1)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1)) \cdot \\ &\cdot (x(k) - \tilde{A}(k-1)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1))^T = \\ &= SpV^A(k)V^{AT}(k) = \|V^A(k)\|^2, \\ E(\tilde{x}(k), \tilde{B}) &= Sp(x(k) - \tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1)) \cdot \\ &\cdot (x(k) - \tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1))^T = \\ &= SpV^B(k)V^{BT}(k) = \|V^B(k)\|^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$(4)$$

Процедура градиентной минимизации критериев (3), (4) может быть записана в виде

$$\begin{cases} \tilde{A}(k) = \tilde{A}(k-1) + \eta_A(k)V^A(k)\tilde{B}^T(k-1)\tilde{x}^T(k-1), \\ \tilde{B}(k) = \tilde{B}(k-1) + \eta_B(k)\tilde{x}^T(k-1)\tilde{A}(k)V^B(k). \end{cases} \quad (5)$$

Оптимизация процедуры (5) по быстродействию ведет к алгоритму

$$\begin{cases} \tilde{A}(k) = \tilde{A}(k-1) + (SpV^A(k)\tilde{B}^T(k-1)\tilde{x}^T(k-1)) \cdot \\ \cdot \tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1)V^{AT}(k)(SpV^A(k)\tilde{B}^T(k-1)) \cdot \\ \cdot \tilde{x}^T(k-1)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1)\tilde{B}^T(k-1)\tilde{x}^T(k-1)\tilde{x}(k-1) \cdot \\ \cdot \tilde{B}(k-1)V^{AT}(k))^{-1}V^A(k)\tilde{B}(k-1)\tilde{x}^T(k-1), \\ \tilde{B}(k) = \tilde{B}(k-1) + (SpV^{BT}(k)\tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{x}^T(k-1)) \cdot \\ \cdot \tilde{A}^T(k)V^B(k)(Sp\tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{x}^T(k-1)\tilde{A}^T(k)) \cdot \\ \cdot V^B(k)V^{BT}(k)\tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{x}^T(k-1)\tilde{A}^T(k))^{-1} \cdot \\ \cdot \tilde{x}^T(k-1)\tilde{A}^T(k)V^B(k). \end{cases} \quad (6)$$

Алгоритм (6), являясь матричной модификацией алгоритма Качмажа и обладая максимальным быстродействием в классе градиентных процедур, не обладает фильтрующими свойствами, а, следовательно, чувствителен к действию помех, что ограничивает его возможности при работе с зашумленными сигналами.

Эффективными сглаживающими свойствами обладают процедуры идентификации, основанные на методе наименьших квадратов, однако он не может быть использован в исходной форме для модели типа (2).

Для преодоления этого затруднения поставим в соответствие модели (2) выражение

$$\hat{x}(k) = \tilde{A}x^B(k),$$

(здесь $x^B(k) = \tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k-1)$) и введем критерий идентификации

$$\begin{aligned} E(x^B(k), \tilde{A}) &= \\ &= \sum_{\tau=1}^k Sp(x(\tau) - \tilde{A}(k)x^B(\tau))(x(\tau) - \tilde{A}(k)x^B(\tau))^T, \end{aligned}$$

минимизация которого по $\tilde{A}(k)$ ведет к оценке [10]

$$\tilde{A}(k) = p_{\tilde{A}}(k)R_{\tilde{A}}^{-1}(k), \quad (7)$$

при условии, что

$$p_{\tilde{A}}(k) = \sum_{\tau=1}^k x(\tau)x^{B^T}(\tau), \quad (8)$$

$$R_{\tilde{A}}(k) = \sum_{\tau=1}^k x^B(\tau)x^{B^T}(\tau). \quad (9)$$

Расчет матриц (8),(9) несложно организовать в рекуррентной форме, при этом

$$\begin{cases} p_{\tilde{A}}(k) = x(k)x^{B^T}(k) + p_{\tilde{A}}(k-1), \\ R_{\tilde{A}}(k) = x^B(k)x^{B^T}(k) + R_{\tilde{A}}(k-1). \end{cases}$$

Или

$$\begin{cases} p_{\tilde{A}}(k) = \frac{1}{k}x(k)x^{B^T}(k) + \frac{k-1}{k}p_{\tilde{A}}(k-1), \\ R_{\tilde{A}}(k) = \frac{1}{k}x^B(k)x^{B^T}(k) + \frac{k-1}{k}R_{\tilde{A}}(k-1). \end{cases} \quad (10)$$

Аналогично предыдущему введем модель

$$\hat{x}(k) = x^A(k)\tilde{B}$$

(здесь $x^A(k) = \tilde{A}\tilde{x}(k-1)$) и критерий идентификации

$$E(\tilde{B}, x^A(k)) = \sum_{\tau=1}^k Sp(x(\tau) - x^A(\tau)\tilde{B}(k))(x(\tau) - x^A(\tau)\tilde{B}(k))^T$$

минимизация которого по $\tilde{B}(k)$ ведет к соотношениям аналогичным (7)–(9):

$$\tilde{B}(k) = R_{\tilde{B}}^{-1}(k)p_{\tilde{B}}(k), \quad (11)$$

при $p_{\tilde{B}}(k) = \sum_{\tau=1}^k x^T(\tau)x^A(\tau)$, $R_{\tilde{B}}(k) = \sum_{\tau=1}^k x^{AT}(\tau)x^A(\tau)$ или
в рекуррентной форме

$$\begin{cases} p_{\tilde{B}}(k) = x^T(k)x^A(k) + p_{\tilde{B}}(k-1), \\ R_{\tilde{B}}(k) = x^{AT}(k)x^A(k) + R_{\tilde{B}}(k-1), \\ p_{\tilde{B}}(k) = \frac{1}{k}x^T(k)x^A(k) + \frac{k-1}{k}p_{\tilde{B}}(k-1), \\ R_{\tilde{B}}(k) = \frac{1}{k}x^{AT}(k)x^A(k) + \frac{k-1}{k}R_{\tilde{B}}(k-1). \end{cases} \quad (12)$$

Очевидно, что использование подобного подхода ведет к тому, что сглаживаются не только случайные возмущения, но и изменения в полезном сигнале, которые необходимо обнаружить.

В подобной ситуации целесообразно воспользоваться идеями экспоненциального сглаживания Р. Брауна, занимающими место между одношаговыми

процедурами идентификации и классическим методом наименьших квадратов.

Вводя параметр сглаживания $0 < \alpha < 1$ в соотношения (10), (12), окончательно приходим к процедуре настройки адаптивной матричной модели:

$$\begin{cases} \tilde{A}(k) = p_{\tilde{A}}(k)R_{\tilde{A}}^{-1}(k), \\ p_{\tilde{A}}(k) = \alpha x(k)x^{B^T}(k) + (1-\alpha)p_{\tilde{A}}(k-1), \\ R_{\tilde{A}}(k) = \alpha x^B(k)x^{B^T}(k) + (1-\alpha)R_{\tilde{A}}(k-1). \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} \tilde{B}(k) = R_{\tilde{B}}^{-1}(k)p_{\tilde{B}}(k), \\ p_{\tilde{B}}(k) = \alpha x^T(k)x^A(k) + (1-\alpha)p_{\tilde{B}}(k-1), \\ R_{\tilde{B}}(k) = \alpha x^{A^T}(k)x^A(k) + (1-\alpha)R_{\tilde{B}}(k-1). \end{cases} \quad (14)$$

Контроль за изменениями свойств матричного сигнала $x(k)$ удобно организовывать базируясь на идеях экспоненциального сглаживания. Наиболее подходящей основой для этого является использование, так называемого, следящего сигнала [12], наиболее эффективным из которых с точки зрения процесса обнаружения свойств является сигнал Д. Тригга-А. Лича [13], который известен в скалярной форме, ориентированной на анализ одномерных последовательностей. В [14] введена модификация метода Тригга-Лича, ориентированная на анализ векторных временных рядов, при этом необходимо отметить, что процедура требует использования набора параметров, задаваемых извне, что естественно вносит в процесс контроля значительный элемент субъективизма. Понятно, что использование этого подхода для контроля матричных процессов вряд ли может обеспечить требуемое качество контроля.

Базовый следящий сигнал Тригга-Лича в одномерном случае может быть записан в виде [12]

$$T^{TL}(k) = \frac{T'(k)}{T''(k)}, \quad (15)$$

при условии, что

$$T'(k) = \alpha v(k) + (1-\alpha)T'(k), \quad (16)$$



Рисунок 1 – Примеры входных видеопоследовательностей

$$T''(k) = \alpha |v(k)| + (1-\alpha)T''(k). \quad (17)$$

При этом факт изменений свойств сигнала $x(k)$ в каждый момент времени фиксируется в ситуации когда

$$T^{TL}(k) - T^{TL}(k-1) \geq \Delta. \quad (18)$$

Введем в рассмотрение апостериорную ошибку настройки модели (2)

$$v(k) = x(k) - \tilde{A}(k)\tilde{x}(k-1)\tilde{B}(k) = \{v_{i_1 i_2}(k)\},$$

задаваемую в виде $(n \times v)$ – матрицы отклонений выходов модели от реального сигнала.

В качестве следящего сигнала будем рассматривать выражение (15), где вместо (16), (17) введем оценки:

$$\begin{cases} T'(k) = \alpha \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^v v_{i_1 i_2}(k) + (1-\alpha)T'(k-1), \\ T''(k) = \alpha \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^v |v_{i_1 i_2}(k)| + (1-\alpha)T''(k-1), \end{cases}$$

которые также могут быть записаны в форме

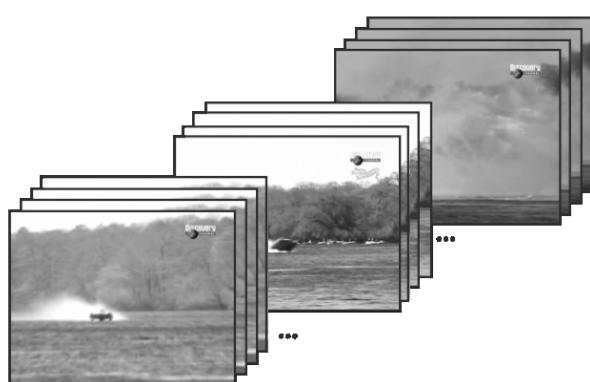
$$\begin{cases} T'(k) = \alpha(nv)^{-1} \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^v v_{i_1 i_2}(k) + (1-\alpha)T'(k-1), \\ T''(k) = \alpha(nv)^{-1} \sum_{i_1=1}^n \sum_{i_2=1}^v |v_{i_1 i_2}(k)| + (1-\alpha)T''(k-1) \end{cases}$$

более удобной для online контроля.

Собственно контроль сигнала производится на основе неравенства (18) и, в случае обнаружения существенного изменения свойств, производится обновление параметров сглаживания согласно соотношения [10] $\alpha = |T^{TL}(k)|$.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для эксперимента использовались видео фрагменты из документального сериала “Destroyed in Seconds”. Примеры кадров входных видеопоследовательностей представлены на рис. 1. Каждый из роли-



ков представляет собой совокупность сцен, в которых происходит резкая смена от обычной съемки некоего процесса, до съемки чрезвычайной ситуации, и ее последствий.

Для проведения анализа предложенного подхода к поиску изменений свойств многомерных временных рядов исходные кадры видеопоследовательностей подвергаются пространственной сегментации, пример которой показан на рис. 2.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результатом работы предложенного метода кластеризации является одномерная последовательность данных, соответствующая исходным многомерным данным. Моменты существенных скачков значений в этой последовательности являются границами сегментов в видео. Пример результата для входной последовательности данных показан на рис. 3.

6 ОБСУЖДЕНИЯ

По полученным результатам можно отметить моменты наиболее существенных изменений потоковых данных в виде пиков на графиках, в частности изменения между сценами произошли в 35, 140, 263 и 374 кадрах, что соответствует реальным данным. Это позволяет выделить сегменты видео однородной природы и моменты переходов между ними, что, в свою очередь, приводит к возможности получения сегментации/кластеризации входных видеопоследовательно-

стей. При этом надо отметить, что некоторые сегменты обладали не совсем однородной структурой, что в целом объясняется спецификой данного видео, т.к. происшествие происходило на песке и из-за возникновения и изменения облаков песка, поднятых в результате падения гонщика, в процессе пространственной сегментации получались не совсем однозначные результаты для этого временного сегмента. Т.е. нужно отметить существенную зависимость результата временной сегментации/кластеризации от предварительной пространственной сегментации.

ВЫВОДЫ

В работе решена задача кластеризации видео данных при помощи аддитивных матричных моделей. Предложена процедура контроля потоков видео, заданных в форме последовательности матричных сигналов, последовательно поступающих на обработку. Для анализа изменений в потоке данных используется аддитивная матричная модель, настраиваемая с помощью специализированного алгоритма настройки, являющегося гибридом градиентных процедур и алгоритмов оптимизации второго порядка с использованием идеи экспоненциального сглаживания. Предлагаемый подход ориентирован на обнаружение, как плавных изменений сигнала, так и скачков. Процедура, характеризуется высоким быстродействием и простотой численной реализации.

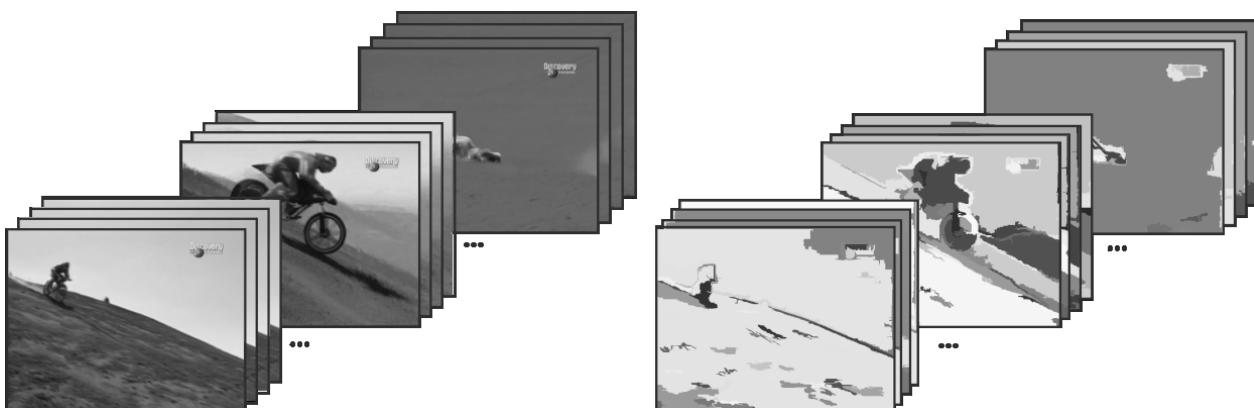


Рисунок 2 – Пример пространственной сегментации видеопоследовательности

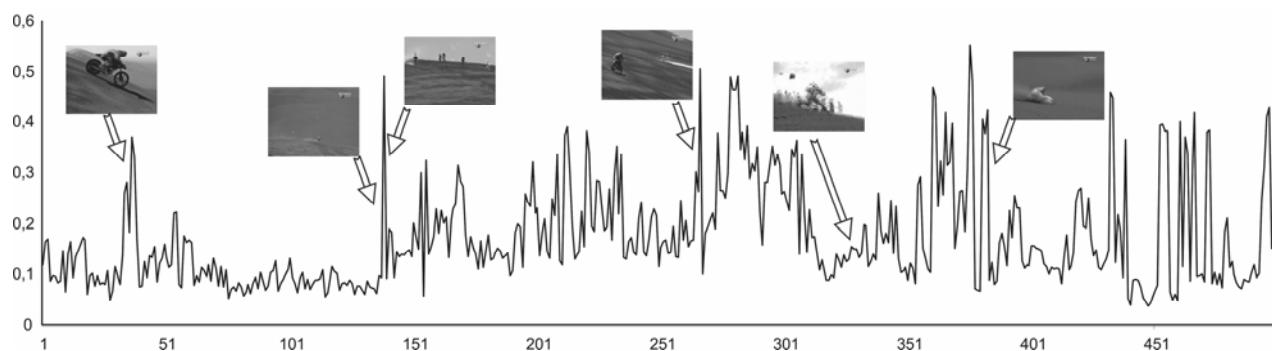


Рисунок 3 – Результаты кластеризации входной видеопоследовательности

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

- Efficient hierarchical graph-based video segmentation / [Grundmann M., Kwatra V., Han M., et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2010. – P. 2141–2148. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539893
- Galasso F. Video Segmentation with Superpixels / F. Galasso, R. Cipolla, B. Schiele // 11-th Asian Conference on Computer Vision (ACCV). – 2012. – Volume I. – P. 760–774. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37331-2_57
- Instance-level video segmentation from object tracks / [Seguin G., Bojanowski P., Lajugie R., et al.] // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016. – P. 3678–3687. DOI: 10.1109/CVPR.2016.400
- Fuzzy clustering based segmentation of timeseries / [Abonyi J., Feil B., Nemeth S., et al.] // Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer. – 2003. – Vol. 2810. – P. 275–285. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45231-7_26
- Modified Gath–Geva clustering for fuzzy segmentation of multivariate time-series / [Abonyi J., Feil B., Nemeth S., et al.] // Fuzzy Sets and Systems. – 2005. – Vol. 149, Issue 1. – P. 39–56. DOI: 10.1016/j.fss.2004.07.008
- Bädavas P.C. Real-time statistical process control / P. C. Bädavas. – Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall, 1993. – 232 p.
- Аналіз та обробка даних засобами обчислювального інтелекту / [Є. В. Бодянський, Д. Д. Пелешко, О. А. Винокурова та ін.]. – Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2016. – 236 с. ISBN: 978-617-607-902-6
- Hoeppner F. Fuzzy clustering of sampled functions / F. Hoeppner, F. Klawonn // In: Proc. 19th Int. Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), Atlanta, USA, 2000. – P. 251–255. DOI: 10.1109/NAFIPS.2000.877431
- Mashtalir S. Video shot boundary detection via sequential clustering / S. Mashtalir, V. Mashtalir, M. Stolbovyy // International Journal “Information Theories and Applications”. – 2017. – Vol. 24, Number 1. – P. 50–59.
- Мантула Е. В. Матрична прогнозуюча модель і її обчислення в задачі екологічного моніторинга / Е. В. Мантула, С. В. Маштальєр // Електротехніческі і комп’ютерні системи. – 2013. – №10(86). – С. 152–156.
- Бодянський Е. В. О розв’язанні задачі управління матричним об’єктом в умовах неопределеності / Е. В. Бодянський, І. П. Плісс // Автоматика і телемеханіка. – 1990. – №2. – С. 175–178.
- Чуев Ю.В. Прогнозирование количественных характеристик процессов. / Ю. В. Чуев, Ю. Б. Михайлов, В. И. Кузьмин. – М. : Сов. Радио, 1975. – 400 с.
- Trigg D. W. Exponential smoothing with an adaptive response rate / D. W. Trigg, A. G. Leach // Operational Research Quarterly. – 1967. – 18, №1. – P. 53–59.
- Маштальєр С. В. Многомерное экспоненциальное сглаживание в задачах анализа видеоданных / С. В. Маштальєр // VI Міжнародна школа-семінар «Теорія прийняття рішень». Праці школи-семінару. – Ужгород : УжНУ, 2012. – С. 136–137.

Стаття поступила в редакцію 20.06.2018.
После доработки 23.07.2018.

УДК 004.93

АДАПТИВНІ МАТРИЧНІ МОДЕЛІ В ЗАДАЧІ КОНТРОЛЮ ПОТОКІВ ВІДЕО

Маштальєр С. В. – д-р техн. наук, доцент, проф. кафедри інформатики Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

Столбовий М. І. – аспірант кафедри інформатики Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. В даний час аналіз багатовимірних даних є одним з пріоритетних напрямків наукових досліджень. Це пов’язано з практично не контролюванням зростанням обсягів інформації і виникненням необхідності отримання/пошуку різного роду корисних даних з неї. При цьому аналіз відеоданих є одним з найбільш складних з обчислювальної точки зору не тільки через великі обсяги оброблюваних даних, а й з огляду на слабку структурованість відео, а також той факт, що в цілому ряді задач обробки відео існують обмеження на час обробки. Одним з напрямків вирішення цих проблем аналізу відео є попередня обробка відеоданих з метою отримання їх розбиття на однорідні сегменти (сцени), що значно скорочує часові і обчислювальні витрати при подальшому контекстному аналізі великих обсягів відеоінформації. І, не дивлячись, на наявні результати в цьому напрямку, задача класифікації/сегментації відеопослідовностей залишається надзвичайно актуальну.

Мета. У роботі розглянута проблема класифікації багатовимірних потокових даних на прикладі часової сегментації відеопослідовностей.

Метод. Запропоновано метод контролю змін потокових даних, що дозволяє відстежувати моменти, істотної зміни характеристик вхідних багатовимірних даних, на основі адаптивних матричних моделей з введенням спеціалізованого алгоритму налаштування прогнозуючої моделі.

Результати. Проведений експеримент на відеопослідовність довільної природи продемонстрував можливість виявлення границь сегментів в відео. При цьому слід зазначити, що запропонований підхід суттєво залежить від результатів просторової сегментації вхідних даних, яка необхідна для отримання множини характеристик, що описують кожен видеокадр послідовності.

Висновки. Запропонований в роботі метод дозволяє проводити класифікацію багатовимірних вхідних даних за допомогою адаптивних матричних моделей. В якості вихідних даних в експериментальній частині використовувалися відеопослідовності.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: відеодані, класифікація, адаптивні матричні моделі, критерій настройки, стежачий сигнал.

ADAPTIVE MATRIX MODELS IN THE VIDEO STREAMS CONTROL PROBLEM

Mashtalir S.V. – Dr. Sc., Associate Professor, Professor of Informatics Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

Stolbovyi M.I. – PhD student of Informatics Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine.

ABSTRACT

Context. At present, the multidimensional data analysis is one of the priority scientific research areas. This is due to the almost uncontrollable growth in the information size and the need to obtain/search for various kinds of useful data from it. At the same time, video data analysis is one of the most difficult from a computational point of view, not only because of BigData being processed, but also due to the video unstructuredness, and also the fact that in a bunch of video processing applications exist limitations on the processing time. One of the ways to solve these video analysis problems is to pre-process the initial data in order to get them split into homogeneous segments (shots), which significantly reduces the time and computational costs for further content-based video analysis in video database. And, despite the existing results in this direction, the video sequences clustering/segmentation problem remains extremely relevant.

Objective. The paper considers the problem of clustering multidimensional streaming data as example of temporal video segmentation.

Method. A method for controlling changes in streaming data is proposed, which allows you to detect the moments of a significant change in the input multidimensional data characteristics, based on adaptive matrix models with the specialized tuning algorithm for the predictive model introduction.

Results. The conducted experiment on an arbitrary video sequences demonstrated the video shot detection possibility. It should be noted that the proposed approach essentially depends on the input data spatial segmentation results, which is necessary to obtain a characteristics set describing each frame of the video sequence.

Conclusions. The proposed method allows multidimensional input data clustering/segmentation by adaptive matrix models. As initial data in the experimental part, video sequences were used.

KEYWORDS: video data, clustering, adaptive matrix models, tuning criteria, tracking signal.

REFERENCES

1. Grundmann M., Kwatra V., Han M., et al. Efficient hierarchical graph-based video segmentation, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2010, pp. 2141–2148. DOI: 10.1109/CVPR.2010.5539893
2. Galasso F., Cipolla R., Schiele B. Video Segmentation with Superpixels, *11-th Asian Conference on Computer Vision (ACCV)*, 2012, Volume I, pp. 760–774. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-37331-2_57
3. Seguin G., Bojanowski P., Lajugie R. et al Instance-level video segmentation from object tracks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, 2016, pp. 3678–3687. DOI: 10.1109/CVPR.2016.400
4. Abonyi J., Feil B., Nemeth S. et al. Fuzzy clustering based segmentation of timeseries, *Lecture Notes in Computer Science*. Berlin, Springer, 2003, Vol. 2810, pp. 275–285. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-45231-7_26
5. Abonyi J., Feil B., Nemett S. et al. Modified Gath-Geva clustering for fuzzy segmentation of multivariate time-series, *Fuzzy Sets and Systems*, 2005, Vol. 149, Issue 1, pp. 39–56. DOI: 10.1016/j.fss.2004.07.008
6. Badavas P. C. Real-time statistical process control. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 1993, 232 p.
7. Bodjans'kyj Je. V., Peleshko D. D., Vynokurova O. A. et al Analiz ta obrabka danyh zasobamy obchislivalnogo in-telektu. L'viv, Vyd-vo L'viv's'koi' politehniky, 2016, 236 p. ISBN: 978-617-607-902-6
8. Hoeppner F., Klawonn, F. Fuzzy clustering of sampled functions, In: Proc. 19th Int. Conf. of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS). Atlanta, USA. 2000, pp. 251–255. DOI: 10.1109/NAFIPS.2000.877431
9. Mashtalir S., Mashtalir V., Stolbovyi M. Video shot boundary detection via sequential clustering, *International Journal "Information Theories and Applications"*, 2017, Vol. 24, Number 1, pp. 50–59.
10. Mantula E. V., Mashtalir S. V. Matrichnaja prognozirujushhaja model' i ee obuchenie v zadache jekologicheskogo monitoringa, *Jelektrotehnicheskie i kompjuternye sistemy*, 2013, No. 10(86), pp. 152–156.
11. Bodjanskij E. V., Pliss I. P. O reshenii zadachi upravlenija matrichnym ob'ektom v uslovijah neopredelennosti, *Avtomatika i telemehanika*, 1990, No. 2, pp. 175–178.
12. Chuev Ju. V., Mihajlov Ju. B., Kuz'min V. I. Prognozirovaniye kolichestvennyh harakteristik processov. Moscow, Sov. Radio, 1975, 400 p.
13. Trigg D. W., Leach A. G. Exponential smoothing with an adaptive response rate, *Operational Research Quarterly*, 1967, 18, No. 1, pp. 53–59.
14. Mashtalir S. V. Mnogomerneje eksponencial'noe sglazhivanie v zadachah analiza videodanniyh, *VI Mizhnarodna shkola-seminar «Teoriya prijnattja rishen'»*. Praci shkoli-seminaru. Uzhgorod, UzhNU, 2012, pp. 136–137.

ANALYSIS OF WAYS FOR EXCHANGING DATA IN NETWORKS WITH PACKAGE COMMUTATION

Minukhin S. V. – Doctor of Science, Professor of Information Systems Department of Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine.

Losev M. U. – PhD, Associate Professor of Information Systems Department of Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, Kharkiv, Ukraine.

Sitnikov D. E. – PhD, Professor of Systems Engineering Department of Kharkiv National University of Radio Electronics.

ABSTRACT

Context. The important problem of increasing the effectiveness of functioning telecommunication networks with package commutation is considered. Some ways are suggested for improving algorithmic tools for information exchange based on using methods and means of diagnosing errors in packages with data transferred. The object of this investigation is the process of data transfer and determining spoilt packages in messages.

Objective. The objective of this paper is to decrease the average relative time of package delivery and also to increase the probability of faultless information transfer to user on the basis of modelling various data exchange protocols.

Method. A method is suggested for the synthesis of universal, fast-acting multi-channel devices designated for controlling and diagnosing messages in data exchange networks with package commutation. Determining faulty packages is carried out based on using cyclic codes and the signature analysis method, which allows creating simple and sufficiently effective devices for data control. A comparative analysis of data exchange protocols is carried out based on using the method of probability-time graphs.

Results. There have been obtained recommendations as to effective using protocols for information exchange with respect to usage conditions and characteristics of networks with package commutation.

Conclusions. In this research the formalization of information processing based on the signature analysis has been accomplished and the method for the synthesis of multi-channel control devices with localizing errors in message packages has been improved. At that, the approach to data exchange in networks with package commutation has been improved. A comparative analysis of the three main scientific approaches that use cyclic error detecting codes has been carried out with the help of probability-time graphs.

KEYWORDS: package, message, signature analysis, datagram channel, data transfer.

ABBREVIATIONS

PTG is a probability-time graph;

GF is a Galois field;

NOMENCLATURE

H is a state matrix for signature analyzer;

h_i is a column of state matrix H ;

$v(t)$ is a input data sequence;

a_i is a i -th coefficient of characteristic polynomial;

$P(x)$ is a characteristic polynomial;

S is a transition matrix for analyzer states;

$Sign(t)$ is a input sequence signature;

Σ is a sum modulo 2;

v_i is the i -th element of the input sequence;

w is the number of elements in the input sequence;

z is the number of device working cycles;

g_i is a signature of the i -th group (package);

φ, ψ are error syndromes for the input sequence;

E_1, E_2 are etalon signatures;

e_i is an etalon of the i -th group of digits;

T_p is a package transfer time;

T_{pd} is a package delivery time;

T_{to} is a time-out time;

T_{rec} is a receipt transfer time;

P_{pd} is a package delivery probability;

P_{los} is a package loss time;

P_{de} is a package error detection probability;

P_{ne} is a package error non-detection probability;

P_{rd} is a receipt delivery probability;

P_1 is a probability of error appearance in one package;

P_m is a probability of error appearance in several packages;

Z is a formal variable.

INTRODUCTION

A characteristic feature of distributed systems that make them differ from single devices is a possibility of partial failure. A partial failure happens when one component of the distributed system starts malfunctioning. This failure can affect the work of some components, whereby the other components continue functioning normally. If a global failure occurs in a distributed system, it affects all its components and can easily prevent the entire system from normal functioning.

When a distributed system is developed, it is very important to provide means for automatic system recovery after partial failures, the productiveness of the entire system being probably decreased. In particular, whenever a failure happens, the distributed system during the recovery process should work in an acceptable manner, i.e. it should be resistant to failures and stay at some level of its functionality.

The main reason for complicating data exchange networks is related with the fact that digital data transfer systems are sensible to different influences that can cause the appearance of random data, information losses or spoiling [1]. Therefore, it is important to be able to detect many errors in the network of distributed systems when

the volume of service information does not increase in each data unit.

This aim can be reached by developing universal means for message control. As a basis for this research methods and algorithms for antijamming coding are used. Means for information control with the help of cyclic redundant codes are now broadly applied. Their software and hardware implementation does not cause serious difficulties [2].

A cyclic redundant code simplifies detecting the following types of errors. Firstly, hardware malfunctions sometimes cause damage to certain sets of bits. Cyclic redundant codes detect such errors better than check sums do. Secondly, cyclic redundant codes are particularly convenient for detecting error packages [3]. The detection of such packages is very important as they cause many problems that should be eliminated with the help of network hardware tools.

The object of study is the process of data transfer and the detection of damaged packages in messages.

The subject of study can be formulated as methods for searching and diagnosing errors in message packages.

The purpose of the work is to decrease the message transfer time and to increase the probability of faultless information transfer to user on the basis of modelling different data exchange protocols.

1 PROBLEM STATEMENT

The state matrix of a signature analyzer can be built with the help of a characteristic polynomial over the Galois field GF(2). At that, each column of this matrix can be determined according to the following expression [1]:

$$h_i = S^i \cdot h_0, i = 0, 1, \dots, w, \quad (1)$$

where $h_0 = \|10\dots0\|^T$; the corresponding matrix S uniquely describes the characteristic polynomial [3]:

$$P(x) = a_n x^n \oplus a_{n-1} x^{n-1} \oplus \dots \oplus a_1 x^1 \oplus 1, \quad (2)$$

where $a_i \in \{0, 1\}$.

The process of obtaining a signature for the input sequence $v(t)$ can be represented with the help of the following expression:

$$\text{sigv}(t) = \sum_{i=0}^w S^i v_i h_0. \quad (3)$$

Expression (3) can be transformed to the following form:

$$\text{sigv}(t) = \sum_{i=0}^w h_i v_i. \quad (4)$$

Thus, the input sequence signature equals the sum of those state matrix columns that correspond to nonzero elements v_i .

The problem consists in synthesizing simple in implementation, fast-acting multi-channel signature analyzers for data control that allow detecting spoiled

packages in transferred messages. At that, the results of information convolutions should strictly correspond to the classical single-channel device [4].

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The development of network technologies substantially increases requirements to the effectiveness of data transfer systems, including an increase in transfer reliability and bandwidth, which has always been attracting attention of specialists in information technologies and telecommunications.

Issues related to assessing and substantiating principles of developing methods for information exchange in distributed computer networks are considered in [1, 5–8]. In these papers concepts of building systems for dynamic control of information exchange have been investigated. Some recommendations for increasing the effectiveness of hardware and software of known and prospective computer nets have been suggested.

In the process of data transfer very high requirements are put forward as to the correctness of message delivery. The satisfaction of these requirements is based on using feedback in combination with anti-jamming codes that are described and investigated in the classical literature on this matter [2, 3].

One of such scientific approaches to using cyclic codes is the signature analysis that is successfully applied not only to information transfer control, but also to checking the working capacity of electronic digital equipment. The usage of this method was substantiated in [4]. In order to decrease time and increase reliability of information transfer, in recent papers [5–12] different methods for data exchange modelling are suggested. In order to increase the speed and broaden the functionality of signature analyzers, in recent papers [13] multi-channel signature analyzers are proposed. Nevertheless, enhancing their possibilities as to detecting and localizing errors leads to a significant increase in information or hardware redundancy.

At present, when requirements to the reliability of information being transferred between various objects increase, the problem of developing simple and effective methods for decreasing the average relative data delivery time becomes very important. Increasing the probability of faultless information transfer to user is of current importance as well.

3 MATERIALS AND METHODS

Managing data exchange can be carried out by selecting a strategy for distributing resources (centralized, hierarchical, decentralized), a method for information support, a method for controlling channel, buffer, information and time resources [1]. When controlling channel resources, it is possible to influence both the parameters of the information channel and the structure and parameters of the multigrip route. The selection of parameters for computer network control is hard to formalize. It is often based on personal preferences of managers and researcher. One of the most important

directions for such investigations is the analysis of data exchange effectiveness with package commutation based on probability-time graphs [5–12]. Nonetheless, all of them are oriented towards investigating existing rules for information exchange (protocols). Changing protocols is possible on the basis of applying new technologies, methods and tools for data transfer and control.

Improving fast-action of devices for controlling message transfer is of particular importance when data are exchanged via a datagram channel, in which each package is delivered to user and processed as a separate message. The phases of conjunction and disjunction are absent here. After delivering all packages a message is formed on the reception side. The last actions can substantially increase the message delivery time if at least one package is delayed.

Let us consider some possibilities of extending the diagnostic functions of the signature analysis. Let an input sequence be entered into the signature analyzer by groups, each group containing m digits. Then formula (4) can be transformed to the following expression:

$$sig1v(t) = \sum_{i=1}^{z-1} S^{m(i-1)} \sum_{j=0}^{m-1} S^j v_j, \quad (5)$$

where the input sequence is checked for m digits per cycle. During the first cycle the device processes a group of digits $v_{m(r-1)}, v_{(m+1)(r-1)}, \dots, v_{mr-1}$, and during the last cycle the group v_0, v_1, \dots, v_{m-1} is processed. In order that the result corresponds to expression (12), it is necessary to multiply the signature of the first digit group by the matrix $S^{m(r-1)}$, and the result should be added modulo 2 to the second group of digits from the input sequence, which should be multiplied by matrix $S^{m(r-2)}$. These actions are repeated till data checking is not finished and the last group of digits is input.

Let us fulfill a linear transformation of the obtained signature (5) according to the following rule [14]:

$$sig2v(t) = \sum_{j=1}^z g_j S^{j-1}. \quad (6)$$

Thus, we have obtained two signatures or two checking code words: $sig1v(t)$ and $sig2v(t)$. As a checking code combination, it is necessary to use two etalon signatures (or two checking words) $E1$ and $E2$, which consist of the set of etalons for digit groups of the information sequence [13]:

$$\begin{aligned} E_1 &= e_1 + e_2 + \dots + e_z, \\ E_2 &= e_1^1 + e_2^1 + \dots + e_z^1, \end{aligned} \quad (7)$$

where $e_j^I = e_j S^{j-1}$. If an error appears in the i -th package, the signature g_i will change and the error syndromes will be calculated as follows:

$$\begin{aligned} \varphi n &= g_i + e_i, \\ \psi &= g_i S^{i-1} + e_i S^{i-1}. \end{aligned} \quad (8)$$

Thus, in order that both error syndromes coincide, it is necessary to multiply one of them by S^{i-1} or fulfill $i - 1$ shifting cycles in the registry of the signature analyzer. The number of such shifting cycles for the syndrome ψ will show the number of the digit group or the package number in which an error occurred. In case the syndromes have not coincided, a conclusion can be drawn that there is an error in several packages.

A peculiarity of message transfer by packages via a datagram channel implies the possibility for each package to use its own separate route. At that, packages can be delivered to user at different time moments and from different directions. In case each package contains a code word for checking the information being transferred, this check can be accomplished immediately on package arrival. Nonetheless, the presence of check words in each package, although it increases reliability of transferred data, leads to a substantial increase in information redundancy. If a network is reliable and the probability of error occurrence is not high, this redundancy cannot be justified. In order to decrease redundancy, it is possible to use two check words for the entire message and fulfill error searching based on expression (9).

Using such an approach to detecting errors in packages leads to changes in the data exchange protocol. Since feedback is used for improving the quality of serving traffic in many protocols, let us consider the process of transferring and receiving a message in systems with negative answerback feedback.

In Fig. 1 a probability-time graph (PTG) is shown that characterizes the process of message transfer in accordance with the suggested protocol. In this figure the following notation is introduced:

- vertex “0” is the start of message transfer;
- vertex “ i ” ($i = 1 \dots w$) is the start of transferring the i -th package of the message;
- vertexes “los”, “cor”, “ne”, “de” correspondingly denote the loss of a package (“los”), its correct reception (“cor”), the reception of a package with an undetected error (“ne”), and the detection of an error in a package “de”.

A sequential transfer of packages in a message is described with the arc f_0 :

$$f_0 = Z^{T_p}. \quad (9)$$

In accordance with the protocol a package can be lost. The transition to this state (vertex “los”) is characterized by the following function [1]:

$$f_{los} = P_{los} Z^{T_{pd}}. \quad (10)$$

As a result of the package loss, after the time-out T_{to} , a receipt will be sent to user:

$$f_{to} = P_{rd} dZ^{T_{to}}. \quad (11)$$

4 EXPERIMENTS

Let us consider data exchange process with an unlimited number of repetitions of package or message transfers.

PTG characterizing the process of message transfer is equivalently transformed to the following form (Fig. 2).

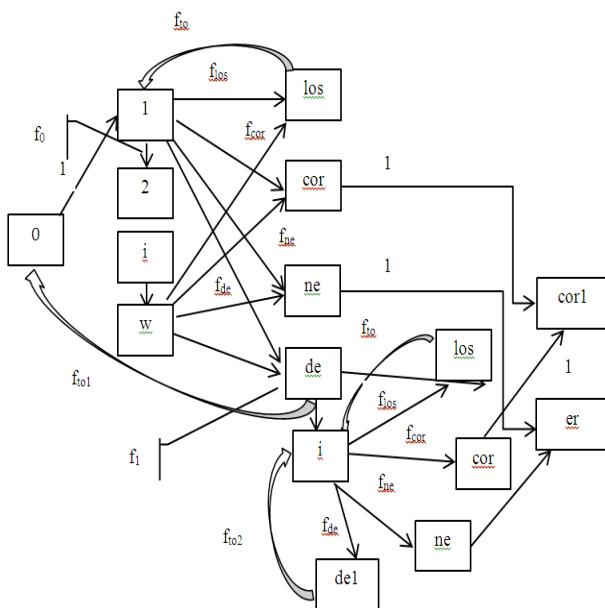


Figure 1 – PTG characterizing the process of message transfer

By analogy the functions describing the transitions to the vertexes "cor", "ne", "de" are defined:

$$\begin{aligned} f_{cor} &= P_{cor} Z^{T_{pd}} ; \\ f_{ne} &= P_{ne} Z^{T_{pd}} ; \\ f_{de} &= P_{de} Z^{T_{pd}} . \end{aligned} \quad (12)$$

If there are no errors or an undetectable error occurs, a decision is made regarding the reception of the message (vertices "cor1" and "er").

The result of this algorithm can be a conclusion as to the correct reception of the message or an error occurred. At that, if an error occurred in several packages, after the time-out T_{t0} a receipt will be set to user about the necessity of repeating the entire message (transition from the vertex "de" to the vertex "0"). This process is characterized by the following function:

$$f_{to1} = P_m Z^{T_{rec}} . \quad (13)$$

If an error has occurred in a single i -th package, a receipt is sent about the necessity of its repetition (transition from the vertex "de" to the vertex "i"). This process is characterized by the following function:

$$f_1 = P_1 Z^{T_{rec}}. \quad (14)$$

When a package is transferred repeatedly, errors can occur or the package can be lost (transitions from the vertex “i” to the vertex “de1” and “los” correspondingly), and also the correct reception or a reception with an error can happen (transitions from the vertex “i” to the vertexes “cor” and “ne” correspondingly). For example, when an error is detected in the package a function characterizing this process is calculated according the following formula:

$$f_{to2} = P_{rd} Z^{T_{rec}} . \quad (15)$$

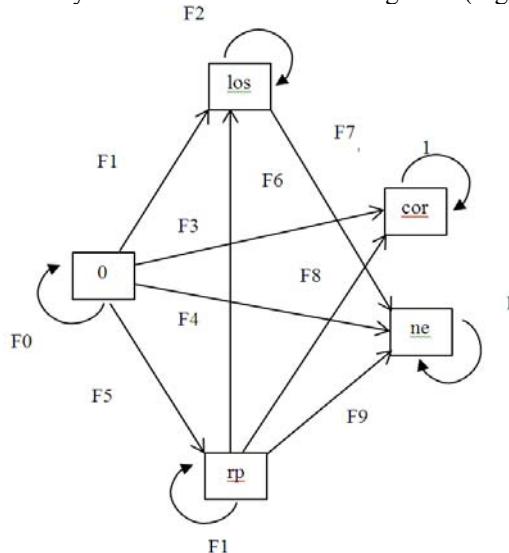


Figure 2 – Transformed PTG characterizing the process of message transfer

In Fig. 2 the following notation is used:

$$\begin{aligned}
F_0 &= P_{de} Z^{T_{pd}} \cdot P_m Z^{T_{to}}; \\
F_1 &= P_{cor} Z^{T_{pd}}; \\
F_2 &= P_{rec} Z^{T_{rec}}; \\
F_3 &= P_{cor} Z^{T_{pd}}; \\
F_4 &= P_{ne} Z^{T_{pd}}; \\
F_5 &= P_{de} Z^{T_{pd}} \cdot P_1 Z^{T_{rec}}; \\
F_6 &= P_{los} Z^{T_{pd}}; \\
F_7 &= (1 - P_{rec}) Z^{T_{rec}}; \\
F_8 &= (1 - P_{rec} - P_{los} - P_1) Z^{T_{rec}}; \\
F_9 &= P_1 Z^{T_{pd}} \cdot P_{ne} Z^{T_{pd}}; \\
F_{10} &= P_1 Z^{T_{rec}} \cdot (P_{los} Z^{T_{pd}} \cdot P_{rec} Z^{T_{to}} + \\
&\quad + P_{de} Z^{T_{pd}} \cdot P_{rec} Z^{T_{to}}).
\end{aligned} \tag{16}$$

The generating function corresponding to the graph is the sum of the functions for all paths connecting the start and end vertexes of the graph [1]. Since in this case the end vertex is split into two components that correspond to the correct reception and the package reception with an error, the generating function can be represented as follows:

$$F(Z) = F_{cor}(Z) + F_{ne}(Z). \quad (17)$$

From the transformed graph (Fig. 2) we can find values of the generating functions:

$$\begin{aligned} F_{ne} &= 1 / (1 - F_0)(F_4 + F_1 F_7 / (1 - F_2) + \\ &F_5 / (1 - F_{10}) \cdot (F_9 + F_6 F_8 / (1 - F_2)); \\ F_{cor} &= 1 / (1 - F_0)(F_3 + F_5 F_8 / (1 - F_{10})). \end{aligned} \quad (18)$$

According to the obtained generating functions it is possible to find the probability of the correct package delivery, the probability of a package delivery with an error, and also the average time for package delivery with the help of the following expressions [1]:

$$\begin{aligned} P_{cor} &= F_{cor}(Z) |_{Z=1}; \\ P_{ne} &= F_{ne}(Z) |_{Z=1}; \\ T_{av} &= F(Z) / dZ |_{Z=1}. \end{aligned} \quad (19)$$

5 RESULTS

A comparative analysis of ways for data exchange in networks with package commutation will be carried out for three main approaches that use cyclic error detecting codes. The following ways are considered:

- for data checking two convolutions (code words) are sent that detect errors according expressions (5–10);
- a data convolution (code word) is available in each package;
- a single data convolution is available in the message.

The first case is described above, on the basis of which PTG is built (Fig. 1, 2) and there have been obtained expressions for calculating the average time of package delivery to user. The second option of data exchange rules is characterized with PTG [12], and there have been obtained expressions for calculating the average relative time of package delivery to user. The third option of data exchange rules can be described with the help of PTG like Fig. 1 when graph vertexes implementing a repeated package transfer are absent. A comparative analysis of the data delivery ways can be carried out with respect to the average relative way of package delivery to user (T_{av}/T_{pd}) depending on the probability of error detection. In Fig. 1 graphs for such dependencies are presented. At that, $T_{av}(P_{de})$ represents the first option of data exchange organization, $T_{av1}(P_{de})$ represents the second one, and $T_{av11}(P_{de})$ represents the third one.

Based on the obtained graphs, we can deduce that when the probability of error detection is low ($P_{de} < 0.4$), for obtaining the minimum time of package delivery to user, we should use the first control option with two code words per entire message. When $P_{de} > 0.4$ the second option is preferable, with one checking convolution in the package. Such a result is conditioned by the fact that when the error detection probability increases, the possibility of repeating the message but not the package increases, which in turn causes a significant increase in the package transfer average time.

In Fig. 4 a dependence is presented for the average relative time of package delivery both on the error detection probability and on the probability of error detection in one package.

The results presented in Fig. 4 are somehow associated with the results shown in Fig. 3. In particular, the indicators of the package transfer average relative time growth are equal in both figures. Nevertheless, an error detection probability increase in one package by 0.1 on average leads to an increase in the average package delivery time by 10–15%. The error detection probability in a message (in several packages) similarly influences the average package delivery time.

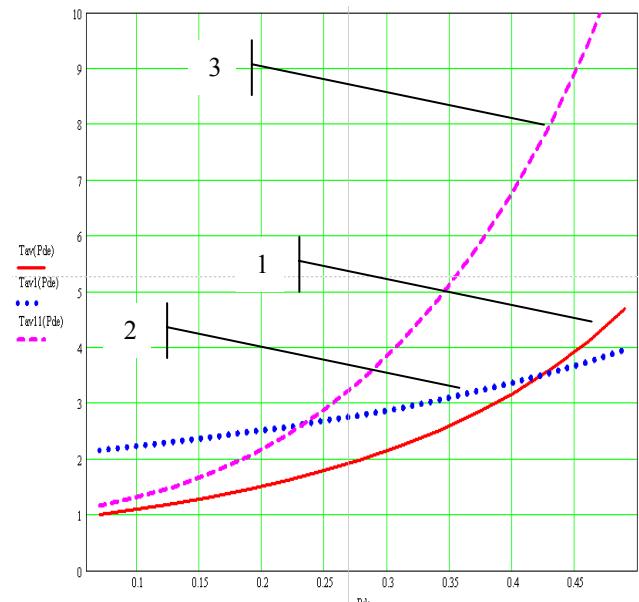


Figure 3 – Dependencies of the average relative time for package delivery on the error detection probability

Notation:

- 1 – Average time of package delivery when there are two check words in a message;
- 2 – Average time of package delivery when there is a check word in each package;
- 3 – Average time of package delivery when there is a single check word in a message

In Fig. 5 some results are shown for investigating the dependency of the average probability of message reception with an error on the probability of the error detection in the route for the three cases of data transfer control. In order to receive data with the minimum error, one should select the second option that uses a check word in each package. When values of the error detection probability are low ($P_{de} < 10^{-2}$) the probability of message reception with an error for the second control option with two check words becomes approximately 5% worse than for the others. This can be explained by the necessity of package or message transfer repetition as compared with the second and third options.

In Fig. 6 some results are shown for investigating the dependence of receiving a message with an error on the probability of error non-detection for the same options of data exchange control.

Fig. 6 shows that in order to receive data with the minimum possible undetected error, one should select the second option that uses a check word in each package. If

values of the error detection probability are low ($P_{de} < 10^{-2}$), the probability of message reception with an error for the first control option with two check words becomes approximately the same as for the second option. At that, the probability of error non-detection approaches asymptotically to 0.008.

When the network load increases, the number of occupied memory cells in the commutation center buffer devices increases, which leads to decreasing the bandwidth. In Fig. 7 some results are shown for investiga-

ting the dependence of the average relative package delivery time on the probability of losing a package in the network, which can happen because of network overload or errors in the address part of the package.

Some research represented in Fig. 7 has been carried out for different values of the package length and time-outs. It can be seen in Fig. 7 that the average relative package delivery time decreases as the size of a package or time-out decrease. Such results reflect a tendency similar to that demonstrated in [1, 11].

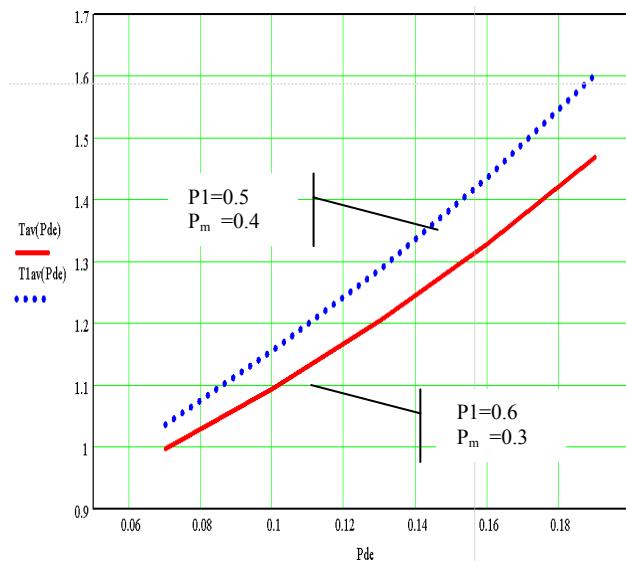


Figure 4 – Dependencies of the package delivery average relative time on the probability of error detection in one package

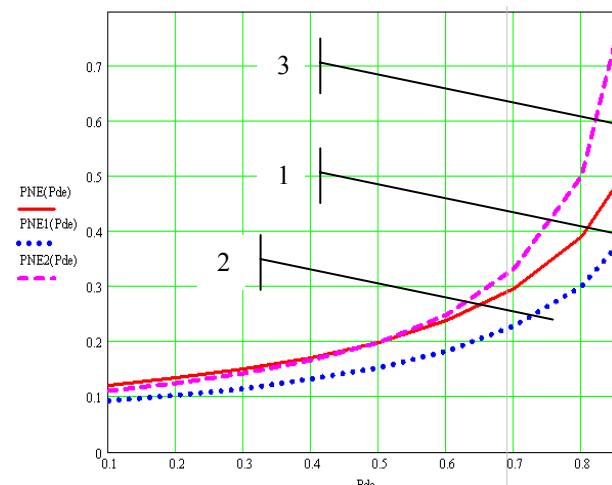


Figure 5 – Dependencies for the average probability of message reception with an error on the probability of error detection

Notation:

- 1 – Average probability of message reception with an error when there are two check words in the message;
- 2 – Average probability of receiving a message with an error when there is a check word in each package;
- 3 – Average probability of receiving a message with an error when there is a single check word in the message

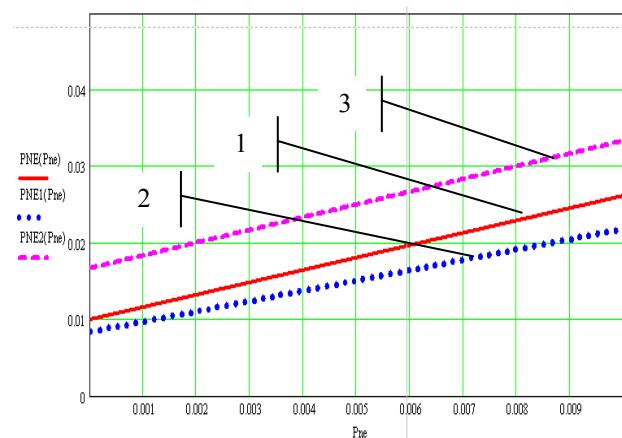


Figure 6 – Dependencies for the average probability of message delivery with an error on the probability of error non-detection

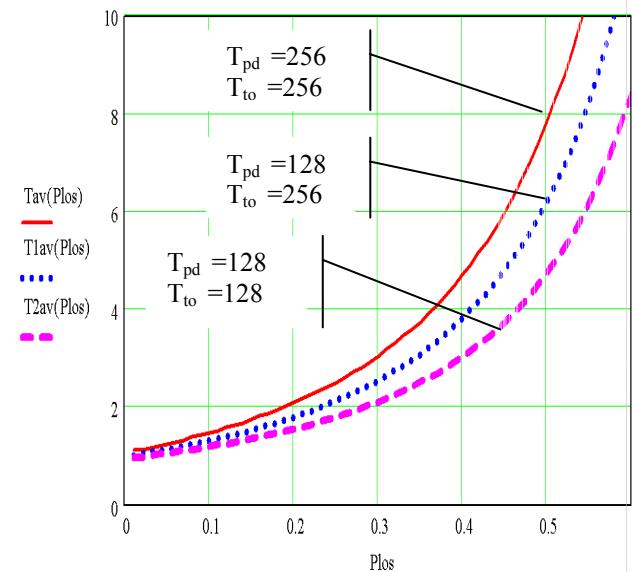


Figure 7 – Dependences of the package delivery average relative time on the probability of package loss in the network

6 DISCUSSION

On the basis of probability-time graphs a comparative analysis has been carried out for the three main methods of controlling information transfer with the help of error detecting cyclic codes. At that, the following ways have been investigated:

- for data checking two convolutions (code words) detecting errors are sent;

- check data convolution (code word) is available in each package;
- a single check data convolution is available in a message.

The comparative analysis carried out allows making the following inferences:

– if the probability of error detection is low ($P_{de} < 0.4$), in order to get the minimum time of package delivery to user, one should use the first control option (with two code words per entire message);

– if $P_{de} > 0.4$, the second option with a single check convolution in a package is preferable;

– increasing the probability of error detection in one package by 0.1 on average leads to an increase in the average relative package delivery time by 10–15%;

– if values of the error detection probability are low ($P_{de} < 10^{-2}$), the probability of receiving a message with an error in the case of the control option with two check words becomes approximately 5% worse than for the other options;

– to receive data with the minimum error non-detection probability, one should apply the option that uses a check word in each package;

– if values of the error detection probability are low ($P_{de} < 10^{-2}$), the probability of receiving a message with an error in the case of the control option with two check words becomes approximately the same as for the option with a check word in each package. At that, the non-detection probability approaches asymptotically to 0.008;

the average relative package delivery time decreases with decreasing both the package size and time-out.

Research has been carried out for different values for probabilities of detecting errors in a package and a message, the length of a package and time-out. All the obtained results do not contradict those received in [1–12] and can be used as a basis for selecting data exchange ways.

In the process of receiving a set of messages of different sizes with different numbers and lengths of packages the signature analyzer should work with time-sharing. For processing each message, it is necessary to provide a time period depending on the length of packages in messages and the number of packages, and also their availability on the user side. At that, according to expression (9), one should flexibly change the matrix S^t .

CONCLUSIONS

In this paper the problem of a comparative analysis for ways of information exchange in package commutation networks has been solved. Recommendations as to the application of different data exchange methods have been formed.

The scientific novelty of this work consists in an improvement of the data exchange methods and the development of a mathematical model for this improvement implementation. The developed mathematical model allows accomplishing a comparative analysis of different protocols for information transfer

that apply cyclic codes for detecting errors in networks with package commutation.

A practical importance of this work follows from the usage of the research results for selecting the most effective ways of data exchange in networks with package commutation depending on their parameters, and also possibilities of detecting and correcting errors in messages.

As possible prospects of this research, we consider the investigation of various data exchange protocols and the development of algorithms and software for working with vague input data.

REFERENCES

1. Losev Ju. I., Volovik B. M., Dresvjankin V. V., Losev M. Ju. Avtomatizacija v setjah s kommutacijoj paketov: monografija. Kiev, Tehnika, 1994, 215 p.
2. Piterson U., Ujeldon Je. per. s angl. pod red. R. L. Dobrushina, S. I. Samojlenko Kody, ispravljajushchie oshibki. Moscow, Mir, 1986, 590 p. (Redakcija literatury po novoj tehnike)
3. Bljejkut R. Teorija i praktika kodov, kontrolirujushhih oshibki: per. s angl. Moscow, Mir, 1986, 576 p.
4. Gordon G., Nadich H. Lokalizacija nespravnostej v mikroprocessornyh sistemah pri pomoshchi shestnadcatirichnyh kljuchevyh kodov, *Jelektronika*, 1977, No. 5, pp. 23–33.
5. Alam T., Raza Z. A Dynamic Load Balancing Strategy with Adaptive Thresholds (DLBAT) for Parallel Computing System, *International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJDST)*, 2014, Vol. 5, Issue 1, pp. 54–69.
6. Losev Ju. I., Shmatkov S. I., Rukkas K. M. Metody i modeli obmena informacij v raspredelennyh adaptivnyh vychislitel'nyh setjah s vremennoj parametrizacijoj parallel'nyh processov, monografija. Har'kiv, HNU imeni V. N. Karazina, 2011, 204 p.
7. Qureshi K. N., Abdullah A. H., Hassan A. N., Sheet D. K., Anwar R. W. Mechanism of Multiprotocol Label Switching for Forwarding Packets & Performance in Virtual Private Network, *Anwar Middle-East Journal of Scientific Research*, 2014, Vol. 20, No. 12, pp. 2117–2127.
8. Solowjow F., Mehrjou A., Schölkopf B., Trimpe S. Minimum Information Exchange in Distributed Systems, *57th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*. [Electronic resource], 2018. Access mode: <https://arxiv.org/abs/1805.09714>.
9. Ponomarenko V. S. za zag. red. Informacijni tehnologii: suchasnj stan ta perspektivi, monografija. Har'kov, TOV «DISA PLJuS», 2018, pp. 102–118.
10. Jang I., Pyeon D., Kim S., Yoon H. A Survey on Communication Protocols for Wireless Sensor Networks, *Journal of Computing Science and Engineering*, 2013, Vol. 7, No. 4, pp. 231–241.
11. Ahlawat M., Mitta A. Different Communication Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review, *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 2015, Vol. 4, Issue 3, pp. 213–216.
12. Zakirov Z. Z. Metodika opredelenija jekvivalentnoj veroyatnosti oshibki, srednego znachenija i dispersii vremeni pri peredeche kodovoj kombinacii v sistemah s obratnoj sviaz'ju, *Sistemi obrobki informacij: zbirnik naukovih prac'*. Har'kiv, Harkiv's'kij universitet Povitranih sil imeni Ivana Kozheduba, 2010, Vip. 1 (82), pp. 34–36.

13. Losev M. Ju., Glushenkov S. O., Evsjukov M. S., Patrakeev I. M., Shostak A. V. (Ukraina). Patent na korisnu model' 74159, MKI3G06F11/00, Analizator signatur paralel'nogo potoku danih № u201201522; zajavl. 13.02.12; opubl. 25.10.12, Bjul.№20, 6 p.: il.
14. Ponomarenko V. S. pod. red. Informacionnye sistemy v upravlenii, obrazovanii, promyshlennosti: monografija. Har'kiv, Vid-vo "Shhedra sadiba pljus", 2014, pp. 62–76.

Received 21.05.2018.
Accepted 06.06.2018.

УДК 621.372

АНАЛІЗ СПОСОБІВ ІНФОРМАЦІЙНОГО ОБМІNU ДАНИМИ В МЕРЕЖАХ З КОМУТАЦІЮ ПАКЕТІВ

Мінухін С. В. – д-р техн. наук, доцент, професор кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, Харків, Україна.

Лосев М. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри інформаційних систем Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, Харків, Україна.

Сітников Д. Е. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри системотехніки Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглядається актуальна проблема підвищення ефективності функціонування телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів. Пропонуються шляхи вдосконалення алгоритмічного забезпечення процесу інформаційного обміну на основі використання можливостей методів і засобів діагностування помилок в пакетах даних, що передаються. Об'єктом дослідження є процес передачі даних і визначення зіпсованих пакетів в повідомленнях.

Мета. Мета роботи зниження середнього відносного часу доставки пакетів, а також підвищення ймовірності безпомилкової передачі інформації абоненту на основі моделювання різних протоколів обміну даними.

Метод. Пропонується методика синтезу універсальних, швидкодіючих багатоканальних пристрій, призначених для контролю і діагностування повідомлень в мережах обміну даними з комутацією пакетів. Визначення помилкових пакетів здійснюється на основі використання циклічних кодів і методу сигнатурного аналізу, які дозволяють створювати прості і досить ефективні пристрій контролю даних. На основі використання методу імовірнісно-часових графів виконано порівняльний аналіз протоколів обміну даними.

Результати. Отримано рекомендації щодо ефективного використання протоколів інформаційного обміну в залежності від умов застосування і характеристик мереж з комутацією пакетів.

Висновки. У проведенню дослідження виконана формалізація процесу обробки інформації на основі сигнатурного аналізу та удосконалено методику синтезу багатоканальних пристрій контролю з локалізацією помилок в пакетах повідомлень. При цьому вдосконалений спосіб обміну даними в мережах з комутацією пакетів. З використанням ймовірнісно-часових графів проведено порівняльний аналіз для трьох основних напрямків, які застосовують циклічні коди, що виявляють помилки.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: пакет, повідомлення, сигнатурний аналіз, дейтаграммний канал, передача даних.

УДК 621.372

АНАЛИЗ СПОСОБОВ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ В СЕТЯХ С КОММУТАЦИЕЙ ПАКЕТОВ

Минухін С. В. – д-р техн. наук, доцент, професор кафедры информационных систем Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнецца, Харьков, Украина.

Лосев М. Ю. – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры информационных систем Харьковского национального экономического университета имени Семена Кузнецца, Харьков, Украина.

Ситников Д. Э. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедры системотехники Харьковского национального университета радиоэлектроники.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Рассматривается актуальная проблема повышения эффективности функционирования телекоммуникационных сетей с коммутацией пакетов. Предлагаются пути совершенствования алгоритмического обеспечения процесса информационного обмена на основе использования возможностей методов и средств диагностирования ошибок в пакетах передаваемых данных. Объектом исследования является процесс передачи данных и определения испорченных пакетов в сообщениях.

Цель. Цель работы снижение среднего относительного времени доставки пакетов, а также повышение вероятности безошибочной передачи информации абоненту на основе моделирования различных протоколов обмена данными.

Метод. Предлагается методика синтеза универсальных, быстродействующих многоканальных устройств, предназначенных для контроля и диагностирования сообщений в сетях обмена данными с коммутацией пакетов. Определение ошибочных пакетов осуществляется на основе использования циклических кодов и метода сигнатурного анализа, которые позволяют создавать простые и достаточно эффективные устройства контроля данных. На основе использования метода вероятностно-временных графов выполнен сравнительный анализ протоколов обмена данными.

Результаты. Получены рекомендации по эффективному использованию протоколов информационного обмена в зависимости от условий применения и характеристик сетей с коммутацией пакетов.

Выводы. В проведенном исследовании выполнена формализация процесса обработки информации на основе сигнатурного анализа и усовершенствована методика синтеза многоканальных устройств контроля с локализацией ошибок

© Minukhin S. V., Losev M. U., Sitnikov D. E., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-19

в пакетах сообщений. При этом усовершенствован способ обмена данными в сетях с коммутацией пакетов. С использованием вероятностно-временных графов проведен сравнительный анализ для трех основных направлений, применяющих циклические коды, обнаруживающие ошибки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: пакет, сообщение, сигнатуальный анализ, дейтаграммный канал, передача данных.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Лосев Ю. И. Автоматизация в сетях с коммутацией пакетов : монография / [Ю. И. Лосев, Б. М. Воловик, В. В. Дресвянкин, М. Ю. Лосев]. – К: «Техника», 1994. – 215 с.
2. Питерсон У. Коды, исправляющие ошибки / У. Питерсон, Э. Уэлдон ; пер. с англ. под ред. Р. Л. Добрушина, С. И. Самойленко] – М. : Мир, 1986. – 590 с. – (Редакция литературы по новой технике)
3. Блэйкхут Р. Теория и практика кодов, контролирующих ошибки: пер. с англ. – М. : Мир, 1986. – 576 с.
4. Гордон Г. Локализация неисправностей в микропроцессорных системах при помощи шестнадцатиричных ключевых кодов / Г. Гордон, Х. Надич // Электроника. – 1977. – № 5.– С. 23–33.
5. Alam T. A Dynamic Load Balancing Strategy with Adaptive Thresholds (DLBAT) for Parallel Computing System / T. Alam, Z. Raza // International Journal of Distributed Systems and Technologies (IJDST). – 2014. – Vol. 5, Issue 1. – P. 54–69.
6. Лосев Ю. И. Методы и модели обмена информацией в распределенных адаптивных вычислительных сетях с временной параметризацией параллельных процессов : монография / Ю. И. Лосев, С. И. Шматков, К. М. Руккас: – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2011. – 204с.
7. Qureshi K. N., Abdullah A. H., Hassan A. N., Sheet D. K., Anwar R. W. Mechanism of Multiprotocol Label Switching for Forwarding Packets & Performance in Virtual Private Network / K. N. Qureshi, A. H. Abdullah, A. N. Hassan, D. K. Sheet, R. W. // Anwar Middle-East Journal of Scientific Research. – 2014. – Vol. 20. – No.12. – P. 2117–2127.
8. Minimum Information Exchange in Distributed Systems / [F. Solowjow, A. Mehrjou, B. Schölkopf, S. Trimpe] // 57th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). – [Electronic resource]. – 2018. – Access mode: <https://arxiv.org/abs/1805.09714>.
9. Інформаційні технології: сучасний стан та перспективи: монографія / за заг. ред. В. С. Пономаренка. – Х. : ТОВ «ДІСА ПЛЮС», 2018. – С. 102–118.
10. A Survey on Communication Protocols for Wireless Sensor Networks / [I. Jang, D. Pyeon, S. Kim, H. Yoon] // Journal of Computing Science and Engineering. – 2013. – Vol. 7. – No. 4. – P. 231–241.
11. Ahlawat M., Mitta A. Different Communication Protocols for Wireless Sensor Networks: A Review/ M. Ahlawat, A. Mitta // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. – 2015. – Vol. 4. – Issue 3. – P. 213–216.
12. Zakirov Z. Z. Metodika opredelenija jekvivalentnoj veroyatnosti oshibki, srednego znachenija i dispersii vremeni pri peredeche kodovoj kombinacii v sistemah s obratnoj svjaz'ju / Z. Z. Zakirov // Sistemi obrobki informaciij: zbirnik naukovih prac'. – H. : Harkiv's'kij universitet Povitranjih sil imeni Ivana Kozheduba, 2010. – Vip. 1 (82). – P. 34–36.
13. Patent na korisnu model' 74159, MKI3G06F11/00, Analizator signatur paralel'nogo potoku danih / M. Ju. Losev, S. O. Glushenkov, M. S. Evsjukov, I. M. Patrakeev., A. V. Shostak (Ukraїna). – № u201201522; zajavl. 13.02.12; opubl. 25.10.12, Bjul.№20. – 6 p.: il.
14. Informacionnye sistemy v upravlenii, obrazovanii, promyshlennosti : monografija / pod. red. V. S. Ponomarenko. – H. : Vid-vo «Shhedra sadiba pljus», 2014. – P. 62–76.

IDENTIFICATION OF “HUMAN ERROR” NEGATIVE MANIFESTATION IN MARITIME TRANSPORT

Nosov P. S. – PhD, Associate Professor, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Ben A. P. – PhD, Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Head of the Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Matejchuk V. N. – Head of Laboratory navigation simulator, Kherson State Maritime Academy, Ukraine.

Safonov M. S. – PhD, Kherson Polytechnic College, Ukraine.

ABSTRACT

Context. There is a problem of identifying the subjective entropy of the navigator as an indication of negative human error in maritime transport. The aim of the study is to develop the data system to identify the negative manifestations of the human error for ensuring safety in maritime transport.

Objective. The objective of the work is to design the data system consisting of two levels. Levels are targeted at detection of primary factors and secondary factors of subjective entropy of the navigator increase.

Method. Within the scope of this work, the phases of the navigator's activity are determined, in which negative manifestations of the human error arise. This most often occurs during emergency situations. It is determined that the navigator's loss of focus leads to inadequate actions in relevant situations. Stressful situations are the second reason that affects self-control level. The factors' expanses influencing the navigator's subjective entropy increase as well as the vector affecting the subjective entropy at the first level of the formal system are determined. The arrangement of sets of factors was carried out. The arrangement result represents the formal system's first level description. Multi-objective optimization problem is vital for optimal solutions identification. The patterning's target is error evaluation on finding a vector, which is an essential stage. The lower limit of the system identification level is determined. The formal description of actions at the second level of the system is carried out and vector is specified at this level. The dependences of second-level vectors' impacts on navigator subjective entropy increase are specified with maximum accuracy. Time input estimation for system actuation allows us to determine three operating modes of the system. The input data for operating modes specification is indicated. The matrix-based framework algorithm of navigator's behavior during emergency situations is given.

Results. Formal approaches were confirmed by simulation patterning using the navigation simulator NTPRO 5000. The data obtained allowed to build an algorithm in navigator's shaping of in various situations.

Conclusions. The proposed formal approaches, patterns and algorithms will provide a basis for navigator's behavior analysis during emergency situations. The search of the best practice of human error data mining based on real data and simulator training data can be the direction for future research. This will allow to determine the mathematical expectation of navigator's behavior in emergency situations, as well as when performing operations with a low coefficient of experience.

KEYWORDS: human error, behavior pattern, subjective entropy, emergency situations.

ABBREVIATIONS

NTPRO 5000 – navigation simulator “Navi-Trainer Professional 5000”.

NOMENCLATURE

δ is a nonnegative number function;

π is the result provided by the system when choosing the level vectors;

ξ is the system result after the second level;

φ_s is a continuous function of system status;

M is a Euclidean factors expanse affecting the navigator's subjective entropy increase manifested at the first level;

J is a Euclidean factors expanse affecting the navigator's subjective entropy increase manifested at the second level;

W is a navigator's personal factors set;

\dot{W} is an acceptable limit of factors at the first and second levels;

E is a parallelepiped display expanse;

\bullet M is an acceptable limit of factors at the first level, which are displayed in the second level;

Y is a Euclidean subjective entropy manifestations expanse;

\hat{y} is the vector required at the first level;

$F(m, y)$ is a identification criterion;

$\dot{Y}(\cdot)$ is the set of y vector values by factor analysis;

\bullet M_a is a sufficient factors set for vector identification; H is a Euclidean vectors expanse z ;

z is the control impact vector on subjective entropy level decrease

c is an actuation system time input

S is a system status index

A is an individual navigator's reactions, dependent on work experience;

B is a navigator's focus;

C is a navigator's optimism;

d is a modes I and II constant (invariable).

INTRODUCTION

One of significant reasons for emergencies to occur in maritime transport is the human error. Statistics provides evidence of maritime accidents reason in 75–96% of cases to be human errors [1, 4]. Most often this occurs when ships collide, as well as when servicing the tankers.

One of reasons for the human error negative manifestations is poor safety culture management in maritime transport. High-level indicators of emergencies causes are also low level of competence of marine officers [5].

From practical experience it was noted that due to simultaneous manifestation of distracting information factors, the individual's focus is lost when taking decisions (navigators) while ship handling. This is the serious problem for the safety management and requires thorough analysis and solution.

1 PROBLEM STATEMENT

The study is aimed to create identification information system and to prevent navigator's human error negative manifestations. In relation to sector-specific issues, the information system is proposed to be divided into two levels: detection of primary factors and detection of secondary factors of navigator's subjective entropy increase. There is a dependency: the more information resources are consumed by the system at the first level, the more accurate the formal description at the second level is. This will make it possible to perform the functions of navigator's subjective entropy elimination in emergency situations more effectively. The system should be designed so that the balance of information resources could be changed at the time of navigator's individual behavior pattern identification.

At the first level, the system forms approximate values of the subjective entropy level, depending on navigator's behavior. The second level depends on the time indices of navigator's steady negative manifestations.

Therefore, it is essential to complete following tasks:

1. To identify M and J factor feature spaces, which affect navigator's subjective entropy increase. The requirement to determine M and J space edges is that their Cartesian product will represent individual set of navigator's factors W .

2. To find an individually-oriented vector of navigator's subjective entropy increase \hat{y} by identification criterion $F(m,y)$ utilizing minimization function on m parameters.

3. In order to increase modeling accuracy, it is necessary to determine lower limits of critical factors individual set identification that affect the subjective entropy \hat{y} , by nonnegative number function implementation $\delta(m)$.

4. To determine control action vectors space to subjective entropy level z reduction by implementing $\Phi(m,y,j,z)$ function as the final characteristics of formal system performance after the second level.

5. To specify most likely system actuation modes in emergency situations at first and second levels, depending on factors manifestations from y and from m .

6. To design the information system scheme for human error negative manifestation identification in maritime transport.

7. To confirm experimentally the hypothesis of sudden factors negative influence on subjective entropy increase and, therefore, navigator's management decisions leading to devastating consequences.

8. To design algorithm of navigator's behavior pattern creation in various situations to prevent human error negative impact in maritime transport.

Thus, the highlighted tasks implementation will create an information system for identification and prevention of human error negative manifestations in maritime transport.

2 LITERATURE REVIEW

One of indicators of focus loss while ship operation is subjective entropy level increase [6].

Our study is targeted at navigator's operational stages during emergency situations, in which negative manifestations of the human error [2] and [3] occur. This leads to navigator's inadequate actions when focus loss occurs. [7]. Factor identification process is an objective problem for safety system management in maritime transport and this occurs in conditions of uncertainty.

From practical experience [8] it is noted that stressful situations have a direct impact on self-control level and increases navigator's negative subjective behavior. Stress reasons can be tensions between crew [2, 13] and [3] that happens quite often.

The study purpose is to build an information system for identifying human error negative effects to ensure safety in maritime transport.

3 MATERIALS AND METHODS

Let M and J be the Euclidean factors expanses that affect the navigator's subjective entropy increase shown at the first and second levels of formal system [11], respectively. Let's take that the system can determine their level. For each navigator there is a psychological barrier to work in conditions of factors actuation from M and J expanses, as well as an individual set of factors such that, $W = M \times J$, $W \subset w$, $\overset{\bullet}{W}$ – a set of acceptable limit of factors $w = (m, j) \in W$ at the first and second levels.

The system task is to find an individual-oriented vector of navigator's subjective entropy increase.

We assume that:

$$M = \left\{ m \in M : \exists j \in J \text{ such that } w = (m, j) \in \overset{\bullet}{W} \right\},$$
$$J(m) = \left\{ w \in W : (m, j) \in \overset{\bullet}{W} \right\} \left(m \in \overset{\bullet}{M} \right),$$

$M \cup J(m), \left(m \in \dot{M} \right)$ – acceptable limits of factors sets at the first and second levels.

Sets arrangement of \dot{M} and $J(m)$ is true when $M = J = E$, \dot{M} – is a parallelepiped in E , and $J(m) = \left\{ j \in E : (m + j) \in \dot{M} \right\}$.

Let Y be the Euclidean manifestations expanse of subjective entropy, is subject to system analysis. \hat{y} – the vector required at the first level out of Y , which is identified by a number of features from factors m , $\dot{Y}(m)$ is the set of vector values y in the analysis by factors m , $F(m, y)$ – the identification criterion.

Formal description of the first level will be:

$$F(m, y) \rightarrow \min y \in \dot{Y}(m).$$

This patterning approach represents the task of multicriteria optimization [9, 12].

Then the point-set mapping $\dot{Y}(m)$ for $F(m, y)$ assumes that the $\dot{Y}(\cdot) = \left\{ \tilde{m} \in \dot{M} : \dot{Y}(\tilde{m}) \neq \emptyset \right\}$ and set of optimal problem solutions is not empty (1):

$$\dot{Y}(m) = \text{Arg min} \left\{ F(m, y) : y \in \dot{Y}(m) \right\} \neq \emptyset. \quad (1)$$

It should be assumed that in cases where the set $\dot{Y}(m)$ consists of a single point $y(m)$ for any $m \in \text{dom } \dot{Y}(\cdot)$, then the operator $y(\cdot) : \text{dom } \dot{Y} \rightarrow Y$ providing with an approximate vector value \hat{y} will be called the navigator's subjective entropy identification operator.

We will assume that the closed set of subjective entropy manifestations will be fully analyzed by the system for the main navigator's functions when handling a ship: $\dot{M}_a \subset \text{dom } \dot{Y}(\cdot)$ for precise vector identification \hat{y} , if $\dot{Y}_0(m) = \{\hat{y}\} \forall m \in \dot{M}_a$.

Error evaluation in finding a vector is an important step in the patterning \hat{y} , for this purpose we introduce a nonnegative number function $\delta(m)$ defined on a set $\text{dom } \dot{Y}(\cdot)$ such that (2):

$$\sup \left\{ \|y - \hat{y}\| : y \in \dot{Y}_0(m) \right\} \leq \delta(m). \quad (2)$$

While $\delta(m) = 0$ for $m \in \dot{M}_a$ and $\delta(m) > 0$ and for $m \in \text{dom } \dot{Y}(\cdot) \setminus \dot{M}_a$, where \dot{M}_a – a sufficient sets of factors for the vector identification.

This will allow us to determine the lower limit of the system ability at the time of individual set of critical factors identification affecting subjective entropy.

To describe the second level, we denote: H is the Euclidean z vectors expanse controlling impacts on subjective entropy level decrease, that are planned together with vector \hat{y} .

Let $Z(y, j) \subset Z$ and the number function is $\Phi(m, y, j, z)$ – acceptable limit of human factors set and criterion for choosing the vector z , $\Phi(m, y, j, z)$ is the final characteristic of the system after the second level.

The introduction of Φ dependence on both y and m is caused by the need to determine the time balance of the system operation at the first and second levels.

The aim of controlling impacts of the system is to determine influence vectors on navigator's subjective entropy increase most accurately.

It is possible to obtain after the second level, considering the time input of system actuation $c_1(m)$ and $c_2(j)$ regarding factors m and j , such that,

$$\Phi(m, y, j, z) = -[\pi(y, z) - c_1(m) - c_2(j)],$$

where $\pi(y, z)$ is the result provided by the system when selecting vector z of controlling impacts with the original vector y data.

The second level model is (3):

$$\Phi(m, y, j, z) \rightarrow \min, j \in J(m), z \in Z(y, j). \quad (3)$$

The effectiveness at the second level is based on the value of $\delta(m)$ – error evaluation function of vector \hat{y} location after the first level. The system task at the second level after dominant factors selection $m \in \dot{M}$ at the first level, and looks like:

$$\Phi(m, \hat{y}, j, z) \rightarrow \min, j \in J(m), z \in Z(\hat{y}, j).$$

For any $m \in \dot{M}$ function $\xi(m)$ defined on the set \dot{M} , we will call the system result after the second level.

$$\min \{ \Phi(m, \hat{y}, j, z) : j \in J(m), z \in Z(\hat{y}, j) \} \leq \xi(m).$$

The set $Z(y, j)$ is set by a finite number of dependencies on y, j :

$$Z(y, j) = \{ z \in Z : \varphi_s(y, j, z) \leq 0 (s \in S), \varphi_s(y, j, z) = 0 (s \in S'') \},$$

(here $\varphi_s, S \in S = S' \cup S''$, continuous functions in $(Y \times J \times Z)$).

The system result after the second level can be considered for three most likely modes.

Mode I. The functions $\varphi_s(s \in S = S' \cup S'')$ do not depend on vectors y , therefore, in the second level task only the objective function of Φ depends on vectors y , there is a constant of navigator's individual reactions, dependent on work experience – A [10,14]. Moreover,

$A > 0$ for any $m \in M, j \in J(m), y(m) \in Y_0(m), z \in Z(j)$, so that the inequality follows (4):

$$\Phi(m, y, j, z) \leq \Phi(m, y(m), j, z) + A \|y(m) - y\|. \quad (4)$$

Mode II. The indexing set $S'' = \emptyset$, but there are constants $A > 0, A_s > 0 (s \in S)$ such that for any $m \in M, y \in Y, y(m) \in Y_0(m), z \in Z$ inequality is true (4), as well as the inequality:

$$\varphi_s(y, j, z) \leq \varphi_s(y(m), j, z) + A_s \|y(m) - y\| (s \in S'),$$

and the set $Z(y, j)$ is the closure of an open set in $Z\{z \in Z : \varphi_s(y, j, z) < 0 (s \in S')\}$.

Mode III. There are constants $A > 0, B > 0, A_s > 0 (s \in S = S' \cup S''), C > 0$ (where B and C are individual indicators of human error manifestations that prevent subjective entropy increase – focus and optimism) such that for any:

$$m \in M, y \in Y, y(m) \in Y_0(m), \|y(m) - y\| \leq \delta(m),$$

$$z \in Z(y(m), j), \hat{z} \in Z(y, j),$$

$$\varphi_s(y, j, z) \leq \varphi_s(y(m), j, z) + A_s \|y(m) - y\| (s \in S),$$

$$\Phi(m, y, j, \hat{z}) \leq \Phi(m, y(m), j, z) + A \|y - y(m)\| + B \|\hat{z} - z\|.$$

in this way,

$$\text{dist}(z, Z(\hat{y}, j)) \leq C \left\{ \sum_{s \in S'} \varphi_s^+(\hat{y}, j, z) + \sum_{s \in S''} |\varphi_s(\hat{y}, j, z)| \right\},$$

$$\text{dist}(z, Z(\hat{y}, j)) = \min \left[\|z - \tilde{z}\| : \tilde{z} \in Z(\hat{y}, j), \varphi_s^+ = \max(\varphi_s, 0) \right].$$

The task of system result optimization will be (5):

$$\xi(m) \rightarrow \min, m \in M. \quad (5)$$

Then, if

$$m_* \in \text{Arg min} \left\{ \xi(m) : m \in M \right\}, y_* \in Y_0(m_*),$$

and a pair

$\{j_*, z_*\} \in \text{Arg min} \{\Phi(m_*, y_*, j, z) : j \in J(m_*)\}, z \in Z(y_*, j)\}$
 then (m_*, y_*, j, z) we take as the system result.

This solution optimizes the result obtained after the second level, considering the error $\delta(m)$ in vector y identification at the first level.

In each of modes I, II, III, the task (5) is equivalent to the task of minimizing a function $\varphi(m, y, j, z)$ on a certain set under conditions of extreme restriction $y \in Y(m)$ to connect m and y .

We put $d = A$ in mode I, II, and in mode III we assume that $d = A + BC \left(\sum_{s \in S} A_s \right)$

$$\text{wherein } \varphi(m, y, j, z) = d\delta(m) + \Phi(m, y, j, z).$$

$$\begin{aligned} \text{Then for modes I-III, } \min \left\{ \xi(m) : m \in M \right\} = \\ \min \left\{ \varphi(m, y, j, z) : m \in M, y \in Y_0(m), j \in J(m), z \in Z(j) \right\}, \\ \min \left\{ \varphi(m, y, j, z) : m \in M, y \in Y_0(m), j \in J(m), z \in Z(m, y, j) \right\}, \\ \min \left\{ \varphi(m, y, j, z) : m \in M, y \in Y_0(m), j \in J(m), z \in Z(y, j) \right\}. \end{aligned}$$

System operating modes regulation is carried out individually for each navigator during the training using the Navi-Trainer Professional 5000 (NTPRO 5000) navigational simulator. The experiments are held at Kherson State Maritime Academy (Ukraine). The first individual signs of subjective entropy manifestation are determined at the stage of training cadets and depend on the set of influence factors.

The system is adjusted to locations and tasks carried out during the ship operation in real conditions, based on navigators' dispositions. Data allows us to regulate and improve the system.

The final stage is the design of navigator's behavior when emergency occurs.

The NTPRO 5000 system identifies 55 indicators, which are generalized into two groups of factors, m_i and y_i , where $i \in (1, 55)$. Each navigator takes individual approaches when makes decisions in ship operation. Consequently, the interdependence of these 55 factors will characterize navigator's behavior in various situations. The general system operation scheme looks like (Fig. 1).

This process is cyclical and data-base is designed for each navigator. Data processing allows the system to identify the most vulnerable categories of factors leading to emergency situations. The function of backward recurrence makes it possible to make corrective influence on navigator's retraining or improvement of his individual psycho-emotional characteristics.

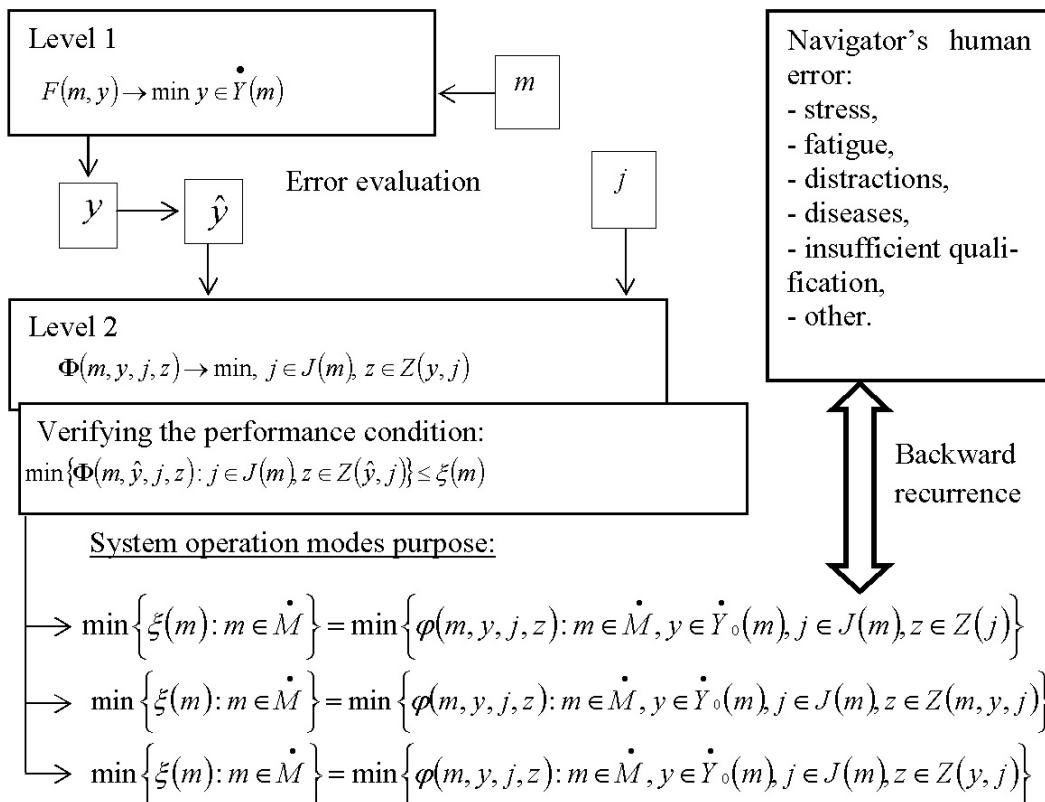


Figure 1 – Information system operation scheme for human error negative manifestations identification for safety in maritime transport

4 EXPERIMENTS

We will carry out human error negative manifestation simulation patterning while operating a ship.

We will carry out the experiment using the Navigator Trainer Professional 5000 navigational simulator (NTPRO 5000) at Kherson State Maritime Academy (Ukraine). The experiment purpose is to determine subjective entropy areas of influence while operating a ship.

Prior to exercise commencement, cadets made course plotting to pass “Bosfor”, with initial parameters:

- board time is set at 12:00:00;
- wind, 13 knots (direction 0 degrees);
- wave height, 1.3 m;
- current, 0 knots.

Chronology of events during the experiment (Fig. 2):

1. **12:00:19**; Ship movement start.
2. **12:09:39**; Start of overtaking ship #1 (Bulk carrier 21); complexity – low (Fig. 2a).
3. **12:16:40**; Finish of overtaking ship #1 (Bulk carrier 21); complexity – low.
4. **12:22:00**; Start of passing procedure with the vessel No. 2 (Coast guard boat 1); sudden event (Fig. 2b).
5. **12:24:20**; Finish of passing procedure with the vessel 2 (Coast guard boat 1); sudden event.
6. **12:24:20**; Wind 10 knots (direction 0 degrees); reduced from 13 knots.

7. **12:24:20**; The current is 0.3 knots (direction 0 degrees); increased from 0 knots.

8. **12:29:40**; Start of passing procedure with the vessel No. 3 (Passenger ferry 2); sudden event.

9. **12:30:09**; Suddenly snow started; the intensity 70% (Figure 2, c).

10. **12:30:11–12:30:26**; During the passing procedure, the maneuver is to bypass from the right side; (right to the side 6°–16°).

11. **12:30:28**; Short shift left on board 4 °(Fig. 2 d).

12. **12:30:30**; Quick setting right 50 ° (Fig. 2 e).

13. **12:30:31**; Quick left-sideways 44 °(Fig. 2 f).

14. **12:30:36**; Engine stop.

15. **12:30:43**; Turn on reverse; power 30%.

16. **12:30:49**; Turn on reverse; power 40%.

17. **12:30:52**; Collision with vessel number 3 (Passenger ferry 2); sudden event (Fig. 2 g).

18. **12:30:53**; Reverse actuation; sudden event.

19. **12:31:18**; The wave height is 1.5 m.

20. **12:36:00**; Overtaking ship No. 4 (Container ship 22); complexity – low.

21. **12:37:19**; Reducing visibility; from 10 miles to 4 miles.

22. **12:38:00**; The wave height is 1.6 m.

23. **12:41:50**; Detecting an obstacle; drifting container “40 foot”.

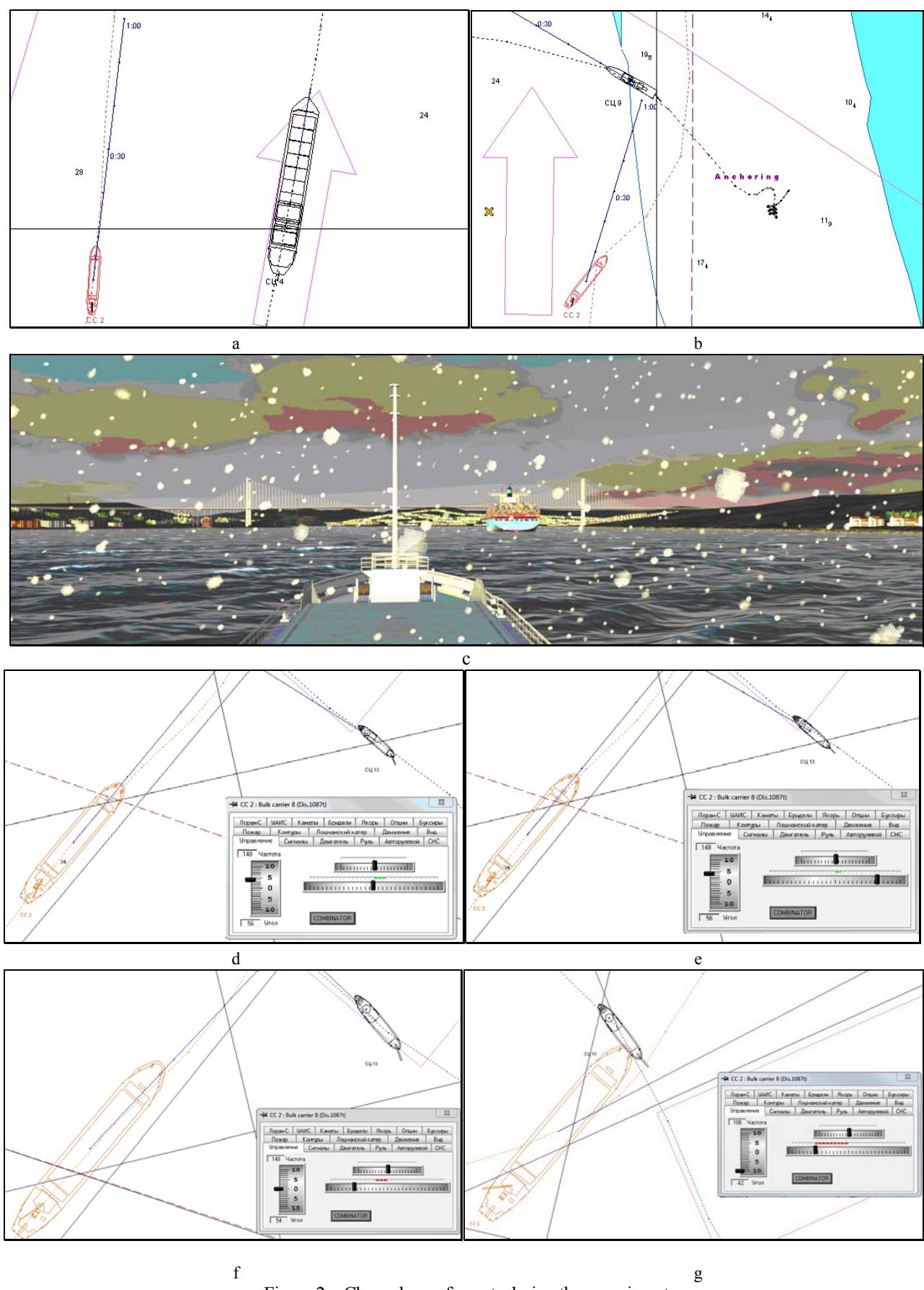


Figure 2 – Chronology of events during the experiment

24. **12:42:28**; Current 0.6 knots (direction 0 degrees); increased from 0.3 knots.

25. **12:43:06**; Passing with an obstacle; drifting container “40 foot”.

26. **12:48:34**; The start of passing procedure with the vessel No. 4 (Passenger ferry 1). The passing procedure was predetermined as well as maneuver speed and course; sudden event.

27. **12:50:30**; Finish of passing procedure from vessel No. 4 (Passenger ferry 1); sudden event.

28. The rest of the time has no significant events

The experiment shows significant navigator's focus loss after first two maneuvers with low complexity. When adding random factors “Sudden snow”, navigator's readiness to perform adequate maneuvers while passing procedure with vessel No. 3 was decreased.

5 RESULTS

To determine the degree of mutual dependence of the factors $F(m_i, y_i)$, the Spearman correlation coefficient was chosen [15]. This coefficient represents the measure of the linear relationship between random variables. It becomes possible to create a behavioral matrix P_k of a certain navigator in a particular situation k , where $k \in (1, \infty)$.

There is an opportunity based on dependencies between factors to build navigator's behavior pattern in various situations. That's important to mention that the trainee's experience does not always reflect his experience in unusual situations for him. Navigator's in certain situations does not guarantee a high level of competency in the whole range of possible events, especially during emergency situations.

$$P_k = \begin{bmatrix} F_k(m_1, y_1) & F_k(m_2, y_1) & F_k(m_3, y_1) & \dots & F_k(m_i, y_1) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ F_k(m_1, y_3) & F_k(m_2, y_3) & F_k(m_3, y_3) & \dots & F_k(m_i, y_3) \\ F_k(m_1, y_2) & F_k(m_2, y_2) & F_k(m_3, y_2) & \dots & F_k(m_i, y_2) \\ F_k(m_1, y_1) & F_k(m_2, y_1) & F_k(m_3, y_1) & \dots & F_k(m_i, y_1) \end{bmatrix}$$

Because the matrix displays the data of one situation only, it becomes necessary to select the corresponding behavioral matrices for unusual cases. To do this, it is essential to determine the set of matrices P_k of the dependencies of the indicators that are specific to a particular navigator. This model displays knowledge of navigator's behavior in particular situations, which corresponds to the specific matrix P_k (Fig. 3).

Since the model is a 3D matrix, it can be stored and processed as a database object. The algorithm of this model formation is shown in Fig. 4.

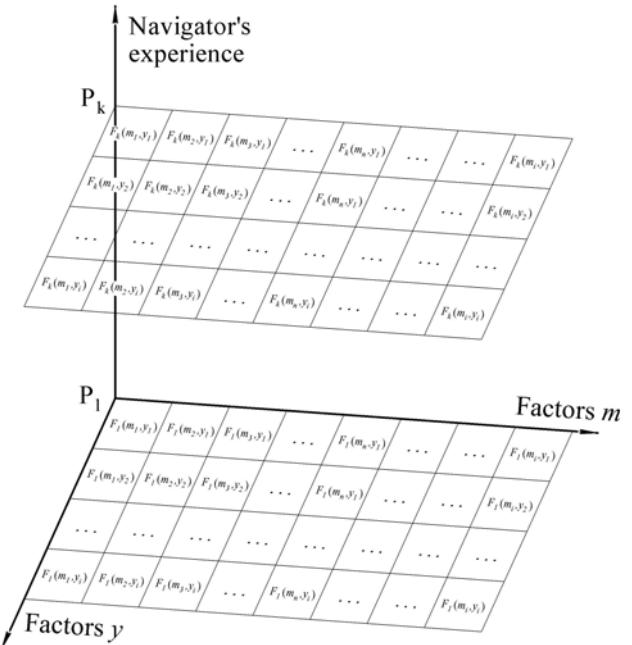


Figure 3 – Skipper's behavior model in a specific situation

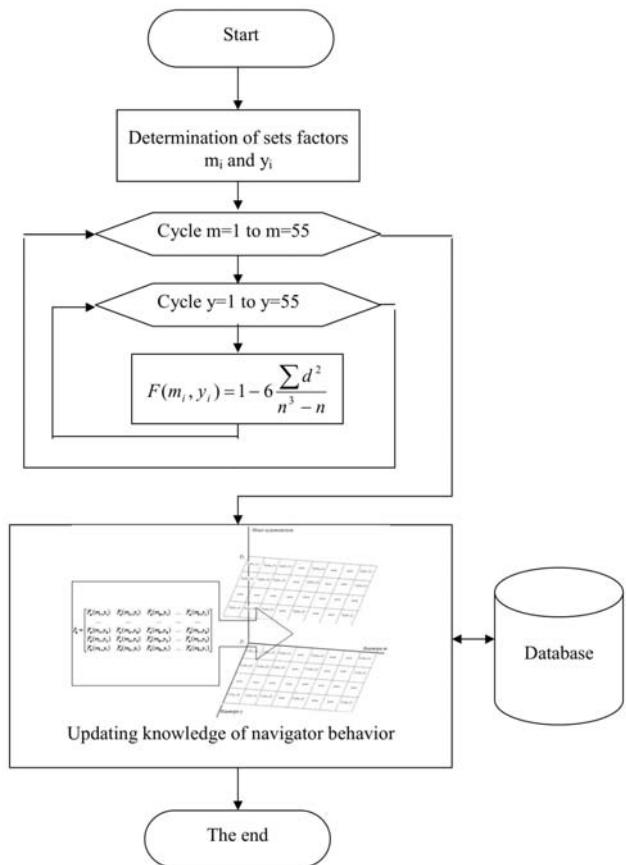


Figure 4 – The algorithm of navigator's behavior pattern formation in different situations

6 DISCUSSION

The experiments conducted have confirmed the feasibility of the study. The highlighted approaches are based on the analytical experience of emergency situations investigations, both during simulator practice, and in real conditions. The designed models, methods and algorithms for subjective entropy identification as the reason of human error negative manifestation were implemented into training program of NTPRO 5000 simulator at Kherson State Maritime Academy (Ukraine). Besides, the studies' results were talked through at the 10th International Scientific and Practical Conference "Modern Information and Innovation Technologies in Transport" MINTT-2018 [16].

The implementation of highlighted solutions will make it possible to minimize human error negative manifestation in maritime transport. The technology will also assist in tracing Marine Officers competency level.

The information system knowledge base increases continuously, which, eventually, will lead to real time result obtaining rate reduction. In the long term, further studies of evolutionary system development to prevent emergency situations in maritime transport are intended for the purpose of both system actuation rate and forecast time step increase.

CONCLUSIONS

The result of the simulation is the determination of three operating modes of the system, which depend on the level of preparedness of the navigator. For the most experienced navigators, the control of the system is carried out at the second level. Identification of factors of emergency situations is carried out in mode I. For mid-level navigators, the forms of control that monitor the most complex functions during ship operation in the regime of III will be characteristic. Finally, for the least experienced navigators, the system is to be monitored at both the first and second levels, identifying all the influencing factors in Mode II.

The construction of the system based on the proposed formal approaches will significantly improve safety in ship operation in conditions of human error negative manifestations.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is carried out within the framework of "Creation of high-accuracy intellectual systems for military-oriented and commercial ship's navigation" (state registration number 0117U002176), of navigation and ECDIS departments of Kherson State Maritime Academy Navigation Faculty (scientific adviser: PhD Associate Professor, Deputy Rector for scientific and pedagogical work, Head of the Navigation and Electronic Navigation Systems Department, Kherson State Maritime Academy, Ukraine, Ben A. P.).

REFERENCES

1. Berg, H. P. Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety, *The International Journal on Marine Navigation and Safety*, 2006, Vol. 37, Issue 4, pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.

© Nosov P. S., Ben A. P., Matejchuk V. N., Safonov M. S., 2018
DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-20

- Safety of Sea Transportation, 2013, Vol. 7, Number 3, . pp. 343–352. DOI: 10.12716/1001.07.03.04.
2. Guidance notes on safety culture and leading indicators of safety. [Effective from 01.01.2012]. Houston:American Bureau of Shipping (ABS), 2012, 74 p.
 3. Havold, J. I. Safety culture and safety management aboard tankers, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol. 95, Issue 5, 2010, pp. 511–519. DOI: 10.1016/j.ress.2010.01.002
 4. Corović B., Djurović P. Research of Marine Accidents through the Prism of Human Factors, *Promet Traffic & Transportation*, 2013, Vol. 25, No. 4, pp. 369–377. DOI: 10.7307/ptt.v25i4.1210
 5. Charles A., O'Reilly I. Variations in Decision Makers' Use of Information Sources: *The Impact of Quality and Accessibility of Information*, *Journal Academy of Management ACAD MANAGE*, 1982, Vol. 25, No. 4, P. 756–771. DOI: 10.2307/256097
 6. Kasianov V. Subjective entropy of preferences. Poland, Istitut of Aviation Scientific Publications, ALKOR, Warsaw, 2013, P. 637. DOI: 10.12691/rpbs-2-3-2
 7. Arslan O., Er I. D. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board TransNav, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2007, Vol. 1, Number 3, September, pp. 345–349.
 8. Carotenuto A. Angiola M. F., Ivana M., Sibilio F., Saturnino A., Traini E., Amenta F. *The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships*, *International Maritime Health*, 2013, 64(4), pp. 215–220. DOI: 10.5603/IMH.2013.0007
 9. Raymond M. S. Theory of Formal Systems, Annals of Mathematics Studies. Princeton University Press, 1961, P. 156.
 10. Taylor A. E. Introduction to functional analysis. NY, John Wiley and Sons, 1958, P. 423. DOI: 10.2307/3617971.
 11. Jech, T. Set theory. corr. ed. Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo; Springer, 1997, P. 243. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.
 12. Stadler I., Wolfram S. Multicriteria optimization in engineering and in sciences. New York, Springer Science, Business Media, 1988, P. 401. DOI: 10.1007/978-1-4899-3734-6.
 13. Hyun C. L., Poong H. S. A computational model for evaluating the effects of attention, memory, and mental models on situation assessment of nuclear power plant operators, *Reliability Engineering & System Safety*, 2009, Vol. 94, Issue 11, pp. 1796–1805. DOI: 10.1016/j.ress.2009.05.012.
 14. Hetherington C., Flin R., Mearns K. Safety in shipping: The human element, *Journal of Safety Research*, 2006, Vol. 37, Issue 4, pp. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
 15. Dowdy S., Wearden S. Statistics for Research. Wiley, 1983, P. 230, ISBN 0-471-08602-9. DOI: 10.1002/0471477435.ch1.
 16. Nosov P. S., Ben A. P., Safonov M. S. Model construction of individual scenarios for the elimination of the human factor, *Suchasni informacijni ta innovacijni tehnologii na transporti*, MINTT-2018, Materiali X Mizhnarodnoi naukovo-praktichnoi konferencii. Xerson, 29–31 May 2018, pp. 224–225.

Received 24.05.2018.
Accepted 12.06.2018.

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕГАТИВНОГО ПРОЯВУ ЛЮДСЬКОГО ФАКТОРА НА МОРСЬКОМУ ТРАНСПОРТІ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент, Херсонська державна морська академія, Україна.

Бень А. П. – канд. техн. наук, доцент, заступник ректора з науково-педагогічної роботи, завідувач кафедри судноводіння та електронних навігаційних систем, Херсонська державна морська академія, Україна.

Матейчук В. Н. – завідувач лабораторії, Херсонська державна морська академія, Україна.

Сафонов М. С. – канд. техн. наук, Херсонський політехнічний коледж, Україна.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. Існує проблема ідентифікації суб'єктивної ентропії судноводія як показника негативного людського фактора на морському транспорті. Метою дослідження є побудова інформаційної системи ідентифікації негативних проявів людського фактора для забезпечення безпеки на морському транспорті.

Завдання. Метою роботи є проектування інформаційної системи що складається з двох рівнів, виявлення первинних факторів і виявлення вторинних факторів підвищення суб'єктивної ентропії судноводія.

Метод. В рамках дослідження визначено фази діяльності судноводія, в яких виникають негативні прояви людського фактора, а саме під час позаштатних ситуацій. Визначено, що втрата концентрації уваги призводить до неадекватних ситуацій дій з боку судноводія. Крім того, другою причиною можуть служити стресові ситуації, що впливають на рівень самоконтролю. Визначено простір факторів, що впливають на підвищення суб'єктивної ентропії судноводія у вигляді вектора що проявляються на першому рівні формальної системи. Проведена компонування множин факторів, в результаті чого отримано формальний опис першого рівня системи. Завдання зводиться до багатокритеріальної оптимізації з метою знаходження множин оптимальних рішень. Важливим етапом в ході моделювання є оцінка похибки при знаходженні вектора і визначення нижньої грани можливості системи. Виконано формальний опис дій другого рівня системи і визначення векторів. Визначено Отримано максимально достовірне визначення векторів впливу на підвищення суб'єктивної ентропії судноводія на етапі другого рівня з урахуванням тимчасових витрат спрацьовування системи, що дозволяє визначити три режими роботи. Позначено вхідні дані для визначення режимів роботи системи у вигляді матриць поведінки судноводія під час позаштатних ситуацій.

Результати. Формальні підходи були підтвердженні імітаційним моделюванням із застосуванням навігаційного тренажера NTPRO 5000 і стали основою для побудови алгоритму формування моделі поведінки судноводія в різних ситуаціях.

Висновки. Запропоновані формальні підходи, моделі та алгоритми дозволяють створити підставу для аналізу поведінки судноводіїв під час позаштатних ситуацій. Перспективами подальших дослідень може бути знаходження найбільш оптимальних методів інтелектуального аналізу людського фактора на основі реальних даних і даних тренажерної підготовки. Це дозволить визначати математичне очікування поведінки судноводіїв в нестандартних ситуаціях, а також при виконанні операцій з невисоким коефіцієнтом досвіду.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: людський фактор, модель поведінки, суб'єктивна ентропія, позаштатні ситуації.

ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕГАТИВНОГО ПРОЯВЛЕНИЯ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА МОРСКОМ ТРАНСПОРТЕ

Носов П. С. – канд. техн. наук, доцент, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Бень А. П. – канд. техн. наук, доцент, заместитель ректора по научно-педагогической работе, заведующий кафедрой судовождения и электронных навигационных систем, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Матейчук В. Н. – заведующий лабораторией, Херсонская государственная морская академия, Украина.

Сафонов М. С. – канд. техн. наук, Херсонский политехнический колледж, Украина.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Существует проблема идентификации субъективной энтропии судоводителя как показателя негативного человеческого фактора на морском транспорте. Целью исследования является построение информационной системы идентификации негативных проявлений человеческого фактора для обеспечения безопасности на морском транспорте.

Задачи Целью работы является проектирование информационной системы состоящей из двух уровней для обнаружения первичных факторов и обнаружение вторичных факторов повышения субъективной энтропии судоводителя.

Метод. В рамках исследования определены фазы деятельности судоводителя, в которых возникают негативные проявления человеческого фактора – во время внештатных ситуаций. Определено, что потеря концентрации внимания приводит к неадекватным ситуациям действиям со стороны судоводителя. Кроме того, вторичной причиной могут служить стрессовые ситуации, влияющие на уровень самоконтроля. Определены пространства факторов влияющих на повышение субъективной энтропии судоводителя в виде вектора проявляемых на первом уровне формальной системы. Проведена компоновка множеств факторов, в результате чего получено формальное описание первого уровня системы. Задача сводится к многокритериальной оптимизации для нахождения множеств оптимальных решений. Важным этапом в ходе моделирования является оценка погрешности при нахождении вектора и определение нижней границы возможности системы. Выполнено формальное описание действий второго уровня системы и определение вектора. Максимально достоверное определение векторов влияния на повышение субъективной энтропии судоводителя, получаемое после второго

уровня с учетом временных затрат срабатывания системы, позволяет определить три режима ее работы. Обозначены входные данные для определения режимов работы системы в виде матриц поведения судоводителя во время внештатных ситуаций.

Результаты. Формальные подходы были подтверждены имитационным моделированием с применением навигационного тренажера NTPRO 5000 и стали основой для построения алгоритма формирования модели поведения судоводителя в различных ситуациях.

Выводы. Предложенные формальные подходы, модели и алгоритмы позволяют создать основание для анализа поведения судоводителей во время внештатных ситуаций. Перспективами дальнейших исследований может быть нахождение наиболее оптимальных методов интеллектуального анализа человеческого фактора на основе реальных данных и данных тренажерной подготовки. Это позволит определять математическое ожидания поведения судоводителей в нестандартных ситуациях, а также при выполнении операций с невысоким коэффициентом опыта.

Ключевые слова: человеческий фактор, модель поведения, субъективная энтропия, внештатные ситуации.

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Berg H. P. Human Factors and Safety Culture in Maritime Safety / H. P. Berg // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2013. – Vol. 7, Number 3. – P. 343–352. DOI: 10.12716/1001.07.03.04.
2. Guidance notes on safety culture and leading indicators of safety. – [Effective from 01.01.2012]. – Houston : American Bureau of Shipping (ABS), 2012. – 74 p.
3. Havold J. I. Safety culture and safety management aboard tankers / J. I. Havold // Reliability Engineering & System Safety. – 2010. – Vol. 95, Issue 5. – P. 511–519. DOI: 10.1016/j.ress.2010.01.002
4. Corović B. Research of Marine Accidents through the Prism of Human Factors / B. Corović, P. Djurovic // Promet Traffic & Transportation. – 2013. – Vol. 25, No. 4. – P. 369–377. DOI: 10.7307/ptt.v25i4.1210
5. Charles A. Variations in Decision Makers' Use of Information Sources: The Impact of Quality and Accessibility of Information / A. Charles, I. O'Reilly // Journal Academy of Management ACAD MANAGE. – 1982. – Vol. 25, No. 4. – P. 756–771. DOI: 10.2307/256097
6. Kasianov V. Subjective entropy of preferences / V. Kasianov. – Poland, Istitut of Aviation Scientific Publications, ALKOR, Warsaw, 2013. – P. 637. DOI: 10.12691/rpbs-2-3-2
7. Arslan O. Effects of Fatigue on Navigation Officers and SWOT Analyze for Reducing Fatigue Related Human Errors on Board TransNav / O. Arslan, I. D. Er // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. – 2007. – Vol. 1, Number 3, September. – P. 345–349.
8. The Psychological General Well-Being Index (PGWBI) for assessing stress of seafarers on board merchant ships / [A. Carotenuto, M. F. Angiola, M. Ivana et al] // International Maritime Health. – 2013. – 64(4). – P. 215–220. DOI: 10.5603/IMH.2013.0007
9. Raymond M. S. Theory of Formal Systems / M. S. Raymond. – Annals of Mathematics Studies, Princeton University Press, 1961. – P. 156.
10. Taylor A. E. Introduction to functional analysis/ A. E. Taylor. – NY : John Wiley and Sons, 1958. – P. 423. DOI: 10.2307/3617971.
11. Jech T. Set theory / T. Jech // corr. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest; Hong Kong; London; Milan; Paris; Santa Clara; Singapore; Tokyo; Springer, 1997. – P. 243. DOI: 10.1007/3-540-44761-X.
12. Stadler I. Multicriteria optimization in engineering and in sciences/ I. Stadler, S. Wolfram. – New York : Springer Science, Business Media, 1988. – P. 401. DOI: 10.1007/978-1-4899-3734-6.
13. Hyun C. L. A computational model for evaluating the effects of attention, memory, and mental models on situation assessment of nuclear power plant operators / C. L. Hyun, H. S. Poong // Reliability Engineering & System Safety. – 2009. – Vol. 94, Issue 11. – P. 1796–1805. DOI: 10.1016/j.ress.2009.05.012.
14. Hetherington C. Safety in shipping: The human element / C. Hetherington, R. Flin, K. Mearns // Journal of Safety Research. – 2006. – Vol. 37, Issue 4. – P. 401–411. DOI: 10.1016/j.jsr.2006.04.007.
15. Dowdy S. Statistics for Research / S. Dowdy, S. Wearden. – Wiley, 1983. – P. 230. ISBN 0-471-08602-9. DOI: 10.1002/0471477435.ch1.
16. Nosov P. S. Model construction of individual scenarios for the elimination of the human factor / P. S. Nosov, A. P. Ben, M. S. Safonov // Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорти, MINTT-2018: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, Херсон, 29–31 Мая 2018. – С. 224–225.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.514:658.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ ПРОИЗВОДСТВА ГАЗОБЕТОНА

Каминская Ж. К. – ассистент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Кулинич Э. М. – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода и автоматизации промышленных установок, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

Сердюк С. Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры программных средств, Запорожский национальный технический университет, Запорожье, Украина.

АННОТАЦІЯ

Актуальність. Рассмотрена проблема повышения эффективности и качества процессов функционирования автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП) производства газобетона. Актуальность данной проблемы обуславливается необходимостью учета человеческого фактора при разработке систем данного типа. Объект исследования – методы и средства автоматизации процессов управления сложными технологическими процессами (ТП). Предмет исследования – модели, методы и средства повышения эффективности и качества автоматизации процессов управления технологическими комплексами газобетонного производства.

Цель работы – повышение эффективности и качества процессов управления ТП приготовления газобетона на основе создания комплексной математической модели, формализующей деятельность человека-оператора и физические процессы, происходящие в ходе ТП, с учетом характеристик исполнительных механизмов и режимов их управления, а также ее практическая реализация в виде имитационной модели (ИМ) процесса управления дозированием материалов газобетонной смеси на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

Метод. Предложено решение рассматриваемой проблемы в виде ИМ процесса функционирования АСУТП приготовления газобетона, основанной на комплексной математической модели процессов дозирования, смешивания компонентов газобетонной смеси и интерактивного взаимодействия оператора с человеко-машинным интерфейсом (ЧМИ) АСУТП при решении им задач управления ТП. В ИМ человеко-машинная система «оператор-АСУТП» представлена в виде системы массового обслуживания. Для формализации алгоритма деятельности оператора использован обобщенный структурный метод А.И. Губинского. Особенность данной ИМ заключается в том, что она может быть использована для оценки и отладки работы АСУТП, алгоритмов работы с ЧМИ.

Результаты. Разработано программное обеспечение и имитационная модель ТП изготавления газобетона на ЗАО «Мотор Сич», реализующие предложенную комплексную модель на основе транзактного способа организации квазипараллелизма в ИМ.

Выводы. В работе предложена комбинированная (аналитико-имитационная) модель процесса автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона, которая в отличие от известных моделей управления, включающих процессы дозирования и смешивания, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП, количественно оценить показатели его информационной загрузки, а также дополнительно учитывать в процессе дозирования влияние динамической составляющей веса набора компонентов в бункеры дозаторов и скорость истечения компонентов из расходных емкостей. Проведенные эксперименты подтвердили работоспособность предложенного математического обеспечения и позволяют рекомендовать его для использования на практике при решении задач обоснования оптимального выбора структуры, способов управления, вариантов ЧМИ, уточнения параметров системы управления указанным ТП, а также при создании интеллектуальных тренажеров для подготовки операторов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: математическая модель, имитационная модель, оператор, газобетон, человеко-машинный интерфейс, дозирование, смешивание, транзакт.

АББРЕВІАТУРЫ

АСУТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;
АФО – алгоритма функционирования оператора;
ИКВ – известково-кремнеземисто вяжущий;
ИМ – имитационная модель;
ОСМ – обобщенный структурный метод;
ТП – технологический процесс;
ТФЕ – типовая функциональная единица;
ТФС – типовая функциональная структура;
ФС – функциональная сеть;
ЧМИ – человеко-машинный интерфейс;
ЧМС – человеко-машинная система.

НОМЕНКЛАТУРА

B^1 – вероятность безошибочного выполнения алгоритма функционирования;
 D_3 – диаметр заслонки;
 $f_{i1}(t)$ – функция распределения получения дозы сыпучих материалов;
 F_i – векторный параметр потока i -го компонента;
 $F_i(t,q)$ – поток i -го компонента из расходной емкости;
 F_{iA} – поток i -го компонента на выходе заслонки питателя дозатора;
 F_{iB} – поток i -го компонента в точке касания;
 $f_{\text{вых}}$ – частота на выходе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель-редуктор»;
 g – ускорение свободного падения;
 G – вес дозатора с компонентами газобетонной смеси;
 G_i – вес i -го компонента газобетона;
 $G_{\text{доз}}$ – вес пустого дозатора;
 h – высота падения частиц компонентов;
 $h_{\text{доз}}$ – высота бункера дозатора;
 $h_{\text{цил}}$ – высота цилиндрической части дозатора;
 $h_{y,\text{кон}}$ – высота усеченного конуса дозатора;
 K^{00} – вероятность обнаружения ошибки при ее наличии;
 K^{11} – вероятность обнаружения отсутствия ошибки при ее отсутствии;
 m – масса компонентов в дозаторе;
 $m_{\text{доз}}$ – масса пустого дозатора;
 M – математическое ожидание;
 $P_i(t,q)$ – производительность шнекового питателя i -го компонента;
 P_{\max} – максимальная производительность шнекового питателя;
 $P_{\text{дин}}$ – динамическая сила воздействия падающего материала;
 $P_{\text{стат}}$ – статическая сила воздействия падающего материала;
 q – параметр, характеризующий особенности системы управления;
 Q_i' – сигнал на открытие заслонки на 90 градусов;
 Q_i – сигнал на открытие заслонки на 30 градусов;
 $Q_{\text{упр}i}$ – управление контактором привода шнека;
 $Q_{\text{засл}i}$ – состояние i -й двухпозиционной заслонки;
 R – радиус цилиндрической части дозатора;

r – радиус выходного отверстия дозатора;
 S – среднеквадратичное отклонение;
 S_i – площадь открытия i -й заслонки;
 t – время;
 t_0 – момент времени выключения дозирования сыпучих материалов;
 t_1 – момент получения дозы компонента сыпучих материалов;
 $t_{i\text{д}}$ – время дозирования i -го компонента;
 $t_{i\text{дир}}$ – директивное время дозирования компонентов;
 $t_{\text{д}(0,i)}$ – директивное время дозирования в пределах заданной погрешности;
 V – объем набранных в дозатор компонентов;
 $V_{\text{доз}}$ – объем бункера дозатора;
 $V_{\text{кон}}$ – объем конусной части бункера дозатора;
 $V_{\text{цил}}$ – объем цилиндрической части дозатора;
 v_B – скорость частиц падающего материала в области касания с поверхностью неподвижного материала;
 $v_{\text{фло}}$ – скорость истечения/прохождения компонента;
 $v_{i\text{фло}i}$ – скорость истечения i -го компонента из расходной емкости в дозатор;
 α – угол конуса дозатора;
 α_3 – угол открытия заслонки;
 δ – погрешность дозирования;
 δ_{\min} – минимальный заданный предел погрешности дозирования;
 δ_{\max} – максимальный заданный предел погрешности дозирования;
 Δp – перепад давления на выходе заслонки;
 μ_i – коэффициент расхода i -го компонента;
 π – константа 3,14;
 ρ_i – плотность дозируемого i -го компонента;
 τ – время падения частиц компонентов.

ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения эффективности, качества и надежности ТП производства газобетона необходим комплексный учет и анализ как «машинной части» АСУТП, так и человеческого фактора. Следовательно, необходимо анализировать информацию о состоянии отдельных звеньев и блоков всей линии, осуществлять контроль энергозатрат, состояний электрического и технологического оборудования, наличия сырья и его физических характеристик, режимов работы электроприводов, гидроприводов и пневмоприводов (машинная часть системы), а также учитывать возможности оператора по приему, переработке технологической информации, принятию им решения и исполнению управляющих воздействий (человеческий фактор).

Таким образом, в процессе разработки АСУТП возникает необходимость получения комплексной математической модели, достаточно точно описывающей, как взаимодействие оператора с ЧМИ, так и работу ТП, динамику исполнительных механизмов,

потоки дозируемых компонентов, оборудования ТП, датчики и т. д.

Система «оператор-АСУТП» является ЧМС. Применение математических методов для разработки ЧМС, ввиду сложности операторской деятельности, часто позволяет оценивать ее лишь приближенно [1]. В этом случае, эффективно использование имитационного моделирования ЧМС и математического аппарата теории массового обслуживания [1, 2].

Поэтому, на основе комплексной математической модели целесообразно построить ИМ управления конкретным ТП. На основании результатов имитационного моделирования делается вывод об обоснованности предлагаемого варианта ЧМИ, алгоритма управления, принимается решение об их дальнейшей разработке, либо о переходе на другие варианты ЧМИ, методы или алгоритмы управления.

Объектом исследования являются методы и средства автоматизации процессов управления сложными ТП.

Предметом исследования являются модели, методы и средства повышения эффективности автоматизации процессов управления технологическими комплексами газобетонного производства.

На практике в производстве газобетона используются процессы, как многокомпонентного дозирования (в один общий дозатор несколько компонентов), так и однокомпонентного дозирования. Модели однокомпонентного, например [3–5], и многокомпонентного дозирования [6, 7], построены без учета человеческого фактора.

Цель работы – повышение эффективности и качества процессов управления ТП приготовления газобетона на основе создания комплексной математической модели, формализующей деятельность человека-оператора и физические процессы, происходящие в ходе ТП, с учетом характеристик исполнительных механизмов и режимов их управления, а также ее практическая реализация в виде ИМ процесса управления дозированием материалов газобетона на ЗАО «Мотор Сич» (г. Запорожье, Украина).

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Деятельность оператора связана с объектом автоматизированного управления в виде технологической линии производства газобетона. ТП приготовления газобетона укрупнено может быть представлен следующей последовательностью операций: дозирование; смешивание; сушка; порезка; термическая обработка и возврат отходов на дозирование после смешивания и порезки.

АСУТП дозирования материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич» предназначена для выполнения первых двух операций. Поэтому, необходима разработка математической модели процессов дозирования (многокомпонентного и однокомпонентного) компонентов газобетонной смеси (жидких и сухих) и их смешивания.

Реализовать точное дозирование сыпучих материалов довольно сложно [8]. Причиной потери точности дозирования является влияние множества факторов на поведение сыпучего материала. Вследствие этого для порционного (дискретного) дозатора момент получения дозы является случайной величиной t_1 со своим распределением $f_{t1}(t)$. Таким образом, при принятии решения о выключении в момент t_0 вероятность ошибки имеет вид

$$P = \int_{t_0}^{t_1} f_{t1}(t) dt.$$

Смеситель, как объект управления описывается системой дифференциальных уравнений, число которых зависит от количества компонентов смеси. Математическая модель сводится к формированию ряда независимых решений, которые отображают режимы отдельных стадий ТП производства газобетона. В такой модели эффективность достижения оптимального управления зависит от степени согласованности соответствующих параметров, точностных характеристик датчиков, инерционности исполнительных механизмов и контроля потоков компонентов газобетонной смеси. Кроме этого оптимальное управление подразумевает достижение качества получаемой смеси совместно с обеспечением $t_{\text{дир}}$ в пределах заданной погрешности

$$t_{J(\theta,t)} = \sum_{i=1}^N t_{i\Delta} \rightarrow \sum_{i=1}^N t_{i\text{дир}} \\ \delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$$

Несоответствие директивному времени приводит к удлинению времени цикла, рассогласованию режимов и к снижению технологической эффективности вследствие неоптимальной загрузки оборудования.

Полученная комплексная математическая модель является базой для построения ИМ ТП приготовления газобетона. Для оценки количественных характеристик деятельности оператора АСУТП возможно использовать номенклатуру предложенных показателей [1, 9].

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Так как процесс дозирования сухих и жидких компонентов ТП приготовления газобетона является сложным и состоит из нескольких более мелких стадий, то были исследованы модели схожих ТП и аппаратов. В [10] описывается модель весового дозирования сыпучих материалов, использующая модель асинхронного двигателя при двухскоростном способе весового дозирования без описания преобразователя частоты. Здесь также учитывается задержка, с которой материал попадает в бункер, определяемая временем падения. Высота и время падения определяются по упрощенной (цилиндрической) геометрии бункера. При этом не учитывается скорость истечения материала из расходной емкости и динамическая со-

ставляющая его веса. В [3–5] исследованы динамика потоков различных материалов, свойства различных материалов и их истечения из бункеров, что позволяет описать отдельные процессы, бункерные устройства, но в основном описано однокомпонентное дозирование, а в [5] – непрерывное дозирование жидкостей. Наиболее подробно процесс дискретного дозирования сыпучих материалов описан в работах [6, 7]. Однако, в них описан только набор компонентов с помощью вибропитателя без выгрузки. Кроме того, высота падения компонента не связана с геометрией бункера и с объемом набранного материала.

Имеющиеся математические описания процессов и агрегатов дозирования в этих и многих других работах, представляют собой ценный, но разрозненный материал, который требовал обобщения в виде одной модели дозирования компонентов в составе ТП производства газобетона с учетом операторской деятельности по управлению этим ТП.

Для описания и количественной оценки деятельности человека в эргономике и инженерной психологии используется большое количество различных математических методов. В связи с этим, выбор математического аппарата и построения на его основе адекватной математической модели становится самостоятельной проблемой [1]. Однако, по результатам проведенного в [11–13] анализа моделей процесса функционирования ЧМС, наиболее универсальными из них являются функционально-структурная теория и ОСМ А. И. Губинского [14].

Недостатком ОСМ является то, что его можно применять только для процессов без последействия и при отсутствии зависимых операций.

Функционально-структурная теория и ОСМ получили дальнейшее развитие в многочисленных работах коллег и последователей. Найдены также методы решения указанных выше недостатков ОСМ, например [11], где предложена интеграция ОСМ с методом имитационного моделирования. Поэтому, для достижения поставленной цели, для моделирования деятельности оператора был выбран ОСМ.

Для построения комплексной математической и имитационной моделей ТП необходимо исследовать влияние основных факторов и возможных режимов на динамику процесса дозирования газобетонной смеси [15].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Комплекс дозировочно-смесительного отделения ЗАО «Мотор Сич» предназначен для дозирования составляющих газобетонной смеси согласно установленной в технологии рецептуре, приготовления смеси в смесителе и ее выгрузки в тележку с формой. Комплекс осуществляет дозирование пяти компонентов смеси: шлама, алюминиевой суспензии, воды, ИКВ и цемента. При этом, используются два двухкомпонентных дозатора (для сыпучих компонентов и шлама) и один однокомпонентный дозатор суспензии. Сухие компоненты подаются в дозатор при помощи шнековых питателей. Для измерения веса всех компонентов смеси используются тензометрические датчики.

Рассмотрим математическую модель процесса двухкомпонентного дозирования сухих компонентов. Конечным параметром, характеризующим производительность дозатора технологической линии и системы управления, является весовой показатель i -го компонента газобетона:

$$G_i(t) = \int_{t_1}^{t_2} F_i(t, q) \cdot \rho_i(t) \cdot g dt, \quad (1)$$

При этом поток компонента модулируется производительностью шнекового питателя $P_i(t, q)$, которая зависит от максимальной производительности шнекового питателя $P_{\max}(q)$ [10], частоты на выходе «преобразователь частоты-асинхронный двигатель – редуктор» $f_{\text{вых}}(t)$ и управления контактором привода шнека $Q_{\text{упр}}(t)$:

$$P_i(t, q) = P_{\max}(q) \cdot f_{\text{вых}}(t) Q_{\text{упр}}(t). \quad (2)$$

Введем векторный параметр потока i -го компонента $F_i(t)$, который описывается вектором следующих параметров:

$$F_i(t) = \{F_i(t, q), \rho_i(t)\}. \quad (3)$$

Поток $F_i(t, q)$ компонентов из расходной емкости зависит от состояния выходной заслонки $Q_{\text{засл}}(t)$ и находится по формуле:

$$F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{iflo}(t). \quad (4)$$

Площадь открытия заслонки вычисляется по формуле:

$$S_i(t, q, \alpha_3) = \frac{\pi \cdot D_3^2}{4} \cdot (1 - \cos \alpha_3(t)). \quad (5)$$

Поток компонентов на выходе из шнекового питателя (поток в дозатор) рассчитываем по формуле:

$$F_{iA}(t) = \begin{cases} F_i(t, q) = S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{iflo}(t), & \text{если } P_i(t, q) \geq F_i(t, q); \\ P_i(t, q) = P_{\max}(q) \cdot f_{\text{вых}}(t) \cdot Q_{\text{упр}}(t), & \text{если } F_i(t, q) > P_i(t, q). \end{cases} \quad (6)$$

Масса компонентов в дозаторе m и масса пустого дозатора $m_{\text{доз}}$ создают статическое усилие $P_{\text{стат}}$, пропорциональное весу дозатора с компонентами газобетонной смеси $G(t)$. Практика дозирования показывает, что после закрытия заслонки вес в дозаторе еще некоторое время (в течение около 0,5 с) увеличивается, а затем стабилизируется на меньшем значении. Это обусловлено инерционностью исполнительных механизмов и временем стабилизации падения частиц компонентов от выходного патрубка заслонки питатель (точка A рис. 1) до точки падения (точка B рис. 1), а также динамическим воздействием $P_{\text{дин}}$ падающих компонентов на емкость дозатора в течении времени дозирования.

Таким образом, в данной модели необходимо найти $P_{\text{дин}}(t)$. С этой целью, скорость падения частиц набираемого компонента v_B определяется по высоте падения частиц компонентов $h(t)$ и времени падения частиц компонентов τ .

Объем дозатора состоит из объема его цилиндрической $V_{цил}$ и конической $V_{кон}$ (усеченный конус) части (рис. 1):

$$V_{доз} = V_{цил} + V_{кон} = \pi \cdot R^2 \cdot h_{цил} + \frac{1}{3} \cdot \pi \cdot h_{y,кон} \cdot (R^2 + R \cdot r + r^2). \quad (7)$$

Поток дозируемых в точке B компонентов определяется по формуле:

$$F_{iB}(t) = F_{iA}(t - \tau). \quad (8)$$

Высота падения частиц компонентов $h(t)$ изменяется по мере наполнения дозатора и определяется по формуле:

$$h(t) = \begin{cases} h_{доз} - \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V(t)}{\pi \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha}}, & \text{если } V(t) < V_{кон}; \\ \frac{V_{доз} - V(t)}{\pi \cdot R^2}, & \text{если } V(t) > V_{кон}. \end{cases} \quad (9)$$

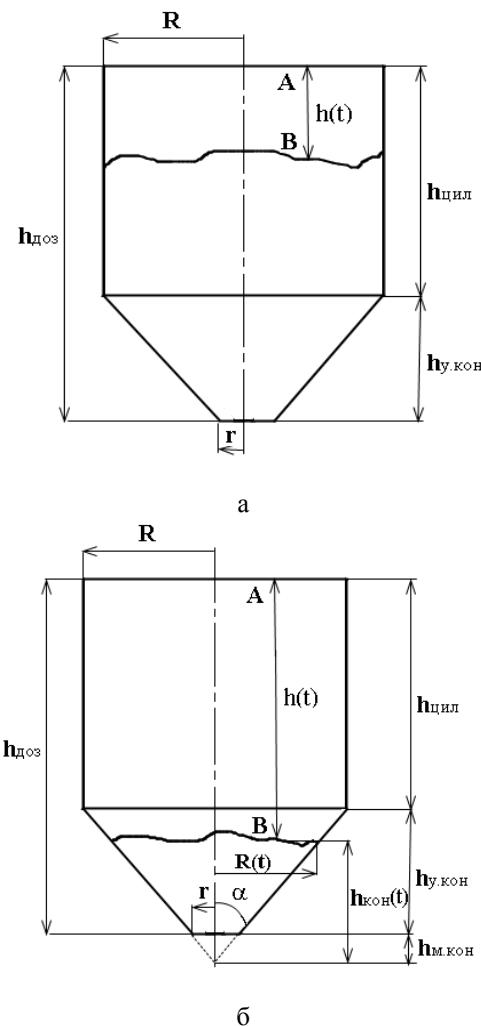


Рисунок 1 – Возможные варианты загрузки компонентами газобетонной смеси:

а – в цилиндрической; б – в конической части дозатора

Объем набранных в дозатор компонентов определяется по формуле:

$$V(t) = \sum_{i=1}^{2} \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) dt. \quad (10)$$

Скорость падающего компонента вблизи области касания с поверхностью уже поступивших в дозатор компонентов определяется по формуле:

$$v_B = \tau g = \sqrt{2g h(t)}. \quad (11)$$

При абсолютно неупругом соударении (скорость после взаимодействия равна нулю) динамическая сила воздействия падающего материала определяется [7] по формуле:

$$P_{дин}(t) = F_{iB}(t) \cdot \rho_i \cdot v_B = \sqrt{2g h(t)} \cdot F_{iB}(t) \cdot \rho_i(t). \quad (12)$$

Сила воздействия на тензометрический датчик веса для набора складывается из веса пустого дозатора $G_{доз}$, статической и динамической компонент и определяется по формуле:

$$P_{\Sigma}(t) = G_{доз} + g \cdot \sum_{i=1}^{2} \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) \cdot \rho_i dt + v_B \cdot F_{iB}(t) \cdot \rho_i, \quad (13)$$

В соответствие с рецептом, производится также подача и дозирование жидких компонентов газобетонной смеси. При наборе компонентов используется трехпозиционная круглая поворотная заслонка. Ее пропускная способность зависит от площади открытия, которая регулируется двумя сигналами на открытие заслонки на 90 градусов ($Q_i(t)$) и открытие заслонки на 30 градусов ($Q_{ig}(t)$) сигналов управления, соответственно грубого и точного набора i -го компонента смеси [7].

Поток i -го компонента на входе дозатора в точке A (выход из заслонки) определяется параметром потока $F_i(t, q)$ компонентов из расходной емкости:

$$F_{iA} = F_i(t, q) = \mu S_i(t, q, \alpha_3) \cdot v_{iflo,A}(t). \quad (14)$$

Скорость истечения компонентов из расходной емкости в начальном приближении принята постоянной и равна [5]:

$$v_{iflo,A}(t) = \sqrt{\Delta p \cdot \frac{2g}{\rho_i}}. \quad (15)$$

Скорость истечения меняется случайным образом вследствие: изменения перепада давления; колебаний уровня в расходной емкости; неоднородности материалов; погодных условий; набора компонентов в расходные емкости во время дозирования. Поэтому, в процессе дозирования требуется идентификация скоп-

рости истечения потока компонентов и, с учетом этого, изменение момента переключения набора (грубо/точно) и стабилизация потока дозируемых компонентов.

Вода подается в дозатор не из накопительной емкости, а по трубопроводу с давлением в 5 бар. Поэтому, для расчета ее скорости истечения в формуле (15) необходимо принять Δp постоянной и равной 500000 Па.

При падении потока компонента, исходя из условия сохранения энергии, его скорость в момент касания поверхности (точка *B*) определяется по формуле:

$$v_{iB}(t) = \sqrt{v_{ifloA}^2(t) + 2g h(t)}. \quad (16)$$

Поток в этой точке определяется согласно выражению (8), а высота падения частиц и объем набранной воды рассчитываются по формулам (9) и (10) соответственно. Суммарный вес дозатора получается последовательным преобразованием изменяющегося потока жидкых компонентов газобетонной смеси в весовые показатели в дозаторе. Потоки на выходе соответствующих дозаторов рассчитываются по формулам (14) и (15), а сила воздействия (масса компонентов) на тензометрический датчик весов дозаторов рассчитываются по формуле (13).

Оператор не в состоянии отслеживать динамику набора массы компонентов в дозаторы с цифрового поля вывода на экране ЧМИ. Ему важна только фиксация момента конечной набранной массы компонента. Поэтому, геометрией (точки *A* и *B*) дозаторов можно пренебречь, принять поток в точке *B* равным потоку на входе в дозатор (точка *A*), т.е. $F_{iB}(t) = F_{iA}(t)$ и в формуле (13) учитывать только статическую составляющую:

$$P_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^2 \int_{t_1}^{t_2} F_{iB}(t) \cdot \rho_i dt. \quad (17)$$

На основании разработанных моделей дозирования сухих и жидких компонентов, принятых ограничений и начальных условий, конечных директивных заданных значений веса каждого компонента, а также, исходя из скорректированных, по результатам выполнения предыдущего цикла, параметров модели (v_{iflo} и др.) определяется время дозирования компонентов и стадий дозирования в ИМ.

Приведенные выше модели формализуют только «машинную» часть АСУТП. Для моделирования процесса функционирования АСУТП с учетом деятельности оператора используется ОСМ. В соответствие с данным методом, процесс функционирования задается в виде ФС и представляется состоящим из ряда ТФЕ, комбинации из которых образуют ТФС. Существует библиотека ТФС с расчетными формулами для определения таких основных показателей качества функционирования как: вероятность безошибочного

выполнения АФО B^1 ; математическое ожидание M и среднеквадратичное отклонение S времени выполнения АФО [14]. Для определения данных показателей производится постепенное «сворачивание» всей ФС путем замены ТФС на эквивалентные ТФЕ. Редукция продолжается до тех пор, пока вся ФС не будет сведена до одной эквивалентной рабочей операции. Показатели качества ее выполнения и будут равны показателям качества выполнения всей ФС.

Приведем АФО при проверке нулевых значений в дозаторе «Сухие», с указанием ТФЕ, моделирующих реальные операции, выполняемые оператором линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич». ЧМИ состоит из пульта управления и набора экранных форм, отображаемых на операторской панели ОР 177В.

1) Считывание значений массы сухих компонентов с экрана «Общий вид» (моделируется рабочей операцией P_1).

2) Проверка на равенство считанных значений нулю (контрольная операция K_1). Если значение равны нулю, то «Конец», иначе п. 3).

3) Переключение двухпозиционного тумблера на пульте управления в ручной режим «РУЧ» (рабочая операция P_2).

4) Переход в «Стартовый экран дозировки» посредством нажатия кнопки F14 (рабочая операция P_3).

5) Задержка на открытие формы «Стартовый экран дозировки» (операция задержки Z_1).

6) Выбор дозатора сухих посредством нажатия соответствующей кнопки (рабочая операция P_4).

7) Задержка на время открытия формы «Дозатор сухих» (операция задержка Z_2).

8) Открыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F11 (рабочая операция P_5).

9) Задержка на время открытия заслонки (операция задержки Z_3).

10) Включение обдува дозатора посредством нажатия кнопки F10 (рабочая операция P_6).

11) Задержка на время обдува (операция задержки Z_4).

12) Выключение обдува посредством нажатия кнопки F10 (рабочая операция P_7).

13) Ожидание снятия избыточного давления в дозаторе (операция задержки Z_5).

14) Закрыть заслонку на выгрузку посредством нажатия кнопки F12 (рабочая операция P_8).

15) Задержка на время закрытия заслонки (операция задержки Z_6).

16) Считывание значений массы сухих компонентов с экрана «Дозатор сухих» (рабочая операция P_9).

17) Проверка на равенство считанных значений нулю (контрольная операция K_2). Если значение равны нулю, то «Конец», иначе п. 10).

Модель данного АФО представляется в виде ФС с использованием языка ОСМ (рис. 2).

Исходные показатели качества выполнения рабочих, контрольных операций и операций задержек

(табл. 1) взяты из [14, 16], технических условий, а также частично получены в ходе производственного эксперимента и учитывают конструктивные особенности ЧМИ, используемого оператором. Фрагмент ФС, отмеченный как $P_{\exists 1}$ (рис. 2), является ТФС №2 – «последовательное выполнение рабочей операции и контроля функционирования» [14]. Фрагменты ФС, отмеченные как $P_{\exists 2}$ и $P_{\exists 3}$ (рис. 2), являются ТФС №1 – «последовательное выполнение рабочих операций». Эквивалентная ТФЕ $P_{\exists 3}$ и контрольная операция K_2 (рис. 2), образуют ТФС №12 – «рабочая операция с контролем функционирования без ограничения числа циклов» (эквивалентная ТФЕ $P_{\exists 4}$). И, наконец, эквивалентные ТФЕ $P_{\exists 1}$, $P_{\exists 2}$ и $P_{\exists 4}$ также образуют ТФС №1. Протокол свертки ФС (рис. 2) можно представить в табличном виде (табл. 2).

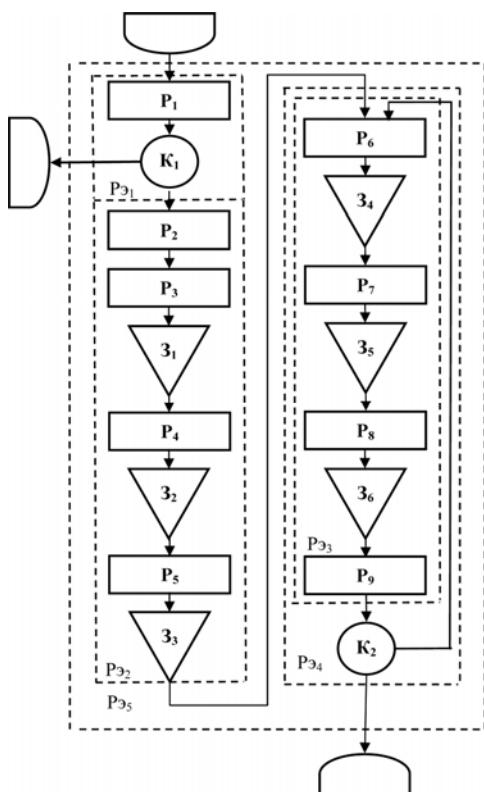


Рисунок 2 – Функциональная сеть алгоритма функционирования оператора при проверке нулевых значений в дозаторе «Сухие»

В соответствие с данными табл. 2 итоговые показатели качества АФО следующие: вероятность безошибочного выполнения АФО $B^1 = 0,9711$; математическое ожидание $M(T) = 66,164$ с и среднеквадратичное отклонение времени выполнения АФО $S(T) = 13,63$ с.

Рассмотренные выше модели образуют комплексную математическую модель формализующую, как процессы дозирования и смешивания, так и деятельность оператора и являются основой для построения ИМ процесса функционирования АСУТП дозирова-

ния материалов для изготовления газобетона на ЗАО «Мотор Сич».

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Имитационное моделирование проводилось с использованием авторского инструментария в виде системы имитационного моделирования СИМ-СИ, предназначеннной для моделирования систем массового обслуживания (Свидетельство о регистрации авторского права на произведение № 74996 от 27.11.2017). Для создания ИМ и их формального описания в СИМ-СИ используется транзактный способ организации квазипараллелизма. Модели оформляются в виде типовых процедур на языке C++, а также процедур и функций разработанной специализированной библиотеки (в виде файла simc.cpp). Для реализации функциональности данной библиотеки и обеспечения работоспособности ИМ, разработана компонента дополнения simc.h для среды разработки QtCreator. Линия приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» работает по две восьмичасовые смены в день. Моделировалась ее работа в течение 30 дней. Единицей времени в модели выбрана одна секунда. Время загрузки программной части АСУТП, а также время перехода между экранами ЧМИ данной АСУТП равномерно распределено и составило 30 ± 2 с и $2,0 \pm 0,2$ с соответственно. Количество рецептов газобетонной смеси равно 11. Для моделирования выбран рецепт №6 приготовления газобетона: ИКВ – 180,3 кг, цемент – 76,5 кг; суспензия 17,4 кг, шлам 323,1 кг, вода 120,1 кг. Диаметры заслонок набора цемента и ИКВ дозатора сухих равны 125 мм. Диаметры входных заслонок: дозатор шлама – 100 мм и 50 мм (для воды); суспензии – 40 мм. Диаметры выходных заслонок: смесителя – 250 мм; дозаторов сухих – 200 мм, суспензии – 50 мм и шлама – 100 мм. Время открытия и закрытия всех заслонок равномерно распределено и равно $1,95 \pm 0,05$ с. Скорость истечения ИКВ принята $0,050 \text{ м}^3/\text{с}$. Производительность шnekового питателя составляла $3,7 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$. Плотность шлама, суспензии и смеси составляет $2,65 \times 10^3$, $2,7 \times 10^3$ и $1,8 \times 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ соответственно. Перепад давления при снижении уровня в дозаторах шлама и суспензии учитывался для пяти уровней с шагом 20%. Директивное время для всех рецептов не должно превышать 17 минут при соблюдении точности дозирования для шлама и воды 1%, для суспензии 0,5%.

Кроме возможных ошибок оператора, в ИМ была учтена наиболее часто встречающаяся в ходе ТП неисправность – зависание материала в бункере сухих. Данная неисправность поступает в модель в соответствии с распределением Пуассона со средней интенсивностью пять раз в течение каждого восьми часов. Так как в полученной ИМ все емкости расходных материалов считались неограниченными и не учитывались иные виды возможных неисправностей, можно говорить о том, что она является моделью некоего «идеализированного» процесса функционирования АСУТП приготовления газобетонной смеси.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты имитационного моделирования ТП приведены на рис. 3 и в табл. 3. На рис. 3 приведена временная диаграмма дозирования и смешивания компонентов смеси по рецепту №6 для двух вариантов диаметра входной заслонки дозатора сухих (125 и 150 мм). В табл. 3 представлен фрагмент итоговых статистических данных за 30 рабочих дней, позволяющих дать количественную оценку работы оператора АСУТП и ТП в целом.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Адекватность математических моделей процессов дозирования и смешивания была доказана при их практическом применении в моделировании АСУТП приготовления газобетона Бершадского завода газобетонных изделий. Приведенные результаты [17] согласуются с экспериментальными данными с погрешностью, не превышающей 6% в динамическом и менее 1% в статическом режимах.

Таблица 1 – Показатели качества выполнения рабочих, контрольных операций и задержек

Показатель	Операции							
	P_1, P_9	P_2	P_3, P_5, P_6, P_7, P_8	K_1, K_2	$3_1, 3_2$	$3_3, 3_6$	3_4	3_5
Вероятность, B^1	0,998	0,9969	0,9951	-	1,0	1,0	1,0	1,0
Вероятность	K^{11}	-	-	0,990	-	-	-	-
	K^{00}	-	-	0,975	-	-	-	-
Временной	$M, \text{с}$	0,178	0,94	0,48	0,29	2,00	1,95	50,0
	$S, \text{с}$	0,018	0,12	0,13	0,11	0,20	0,05	10,0
								0,10

Таблица 2 – Табличный протокол свертки функциональной сети

№	Сворачиваемые ТФЕ	Эквивалентная ТФЕ		
		Обозначение	B^1	M
1	P_1, K_1	$P_{\exists 1}$	0,988	0,468
2	$P_2, P_3, 3_1, P_4, 3_2, P_5, 3_3$	$P_{\exists 2}$	0,9833	8,330
3	$P_6, 3_4, P_7, 3_5, P_8, 3_6, P_9$	$P_{\exists 3}$	0,9833	55,568
4	$P_{\exists 3}, K_2$	$P_{\exists 4}$	0,9996	57,366
5	$P_{\exists 1}, P_{\exists 2}, P_{\exists 4}$	$P_{\exists 5}$	0,9711	66,164
				13,630

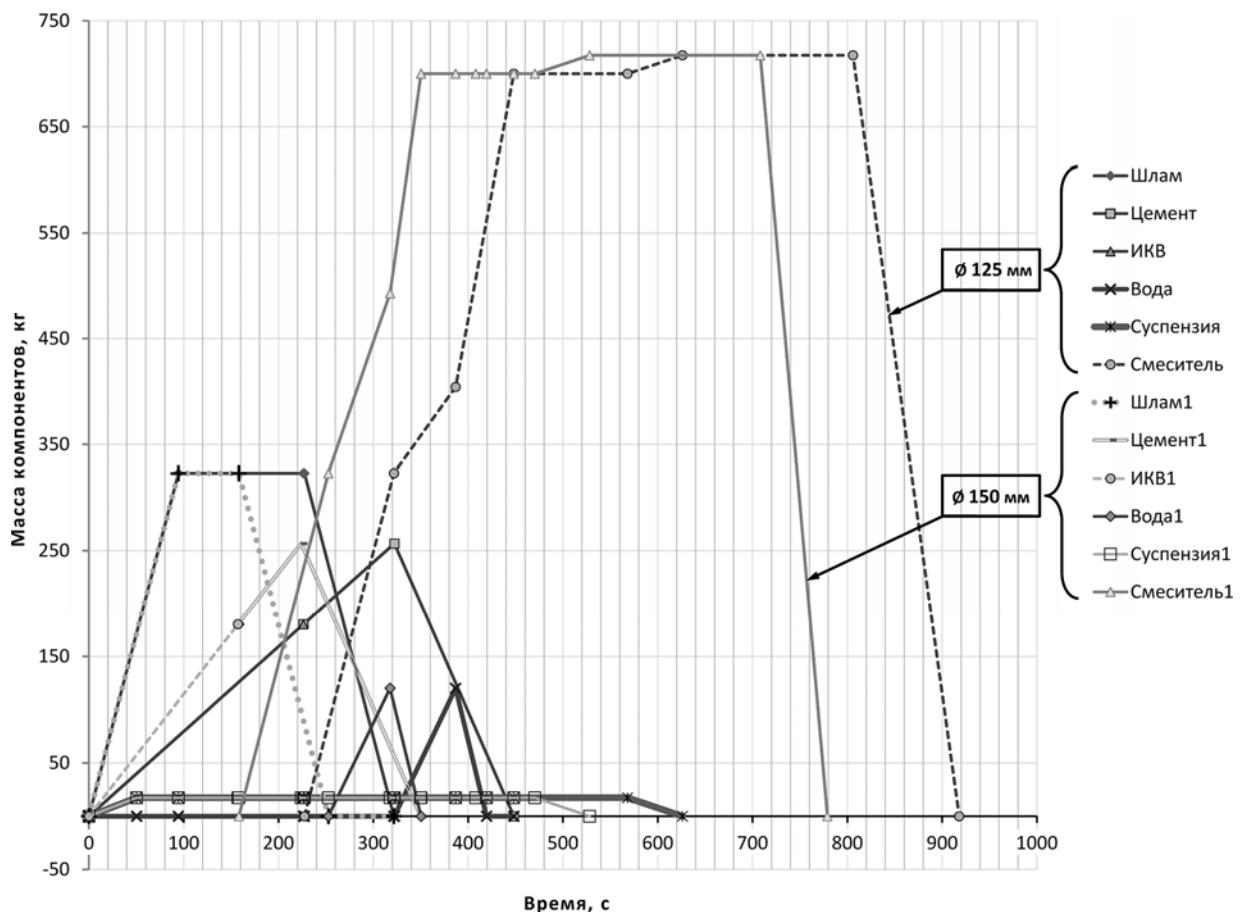


Рисунок 3 – Временная диаграмма дозирования и смешивания компонентов смеси

Таблица 3 – Показатели, характеризующие технологический процесс и деятельность оператора АСУТП

Показатель	Диаметр 125 мм			Диаметр 150 мм			Диаметр 200 мм			Оптимальное (предельное) значение
	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	Рецепт №1	Рецепт №6	Рецепт №9	
Коэффициент загруженности	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,06	0,09	0,09	(0,75)
Максимальный период занятости, мин	1,88	3,35	2,93	1,31	2,33	2,03	0,66	1,31	1,14	(15 ÷ 20)
Средняя длина очереди	0,66	0,11	0,33	0,46	0,43	0,25	0,23	0,43	0,43	2 ÷ 3
Максимальная длина очереди	2	2	2	2	2	2	2	2	2	(5 ÷ 9)
Период цикла ТП, с	767	918	883	656	780	752	546	643	623	Директивное время 1020

Результаты эксперимента для линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» показали, что использующиеся заслонки набора цемента и ИКВ (диаметр 125 мм), более чем в пять раз ограничивают входной поток в дозатор сухих, вырабатываемый шнеком, так как поток сухих компонентов через полностью открытую заслонку, составил $6,13 \times 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

С целью нахождения оптимального (с точки зрения общего времени цикла приготовления смеси газобетона и времени работы электропривода смесителя, определяющих рациональное использование энергоресурсов) варианта диаметра заслонки было проведено моделирование с заслонками больших диаметров (150 и 200 мм) для трех рецептов, с различным пропорциональным составом сухих и жидкых компонентов. Кроме вышеуказанного рецепта №6, проведено моделирование для рецепта №1 (ИКВ – 100 кг, цемент – 110 кг; суспензия – 25 кг, шлам – 300 кг, вода – 50 кг) и №9 (ИКВ – 160 кг, цемент – 81 кг; суспензия – 14 кг, шлам – 290 кг, вода – 140 кг).

Эксперимент с заслонкой диаметром 200 мм, для всех трех рецептов ожидаемо привел к сокращению времени цикла приготовления газобетона (табл. 3).

Однако, переход на большие диаметры входных заслонок дозатора сухих линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич» влечет за собой организационные, конструктивные сложности и большие финансовые затраты, а также уменьшает точность дозирования из-за увеличения инерционности исполнительного механизма.

Как следует из данных табл. 3, максимальное время цикла ТП для рецепта №6 и заслонки 125 мм составляло 918 с (15 минут 18 с), что не превысило директивное время 17 минут при соблюдении точности дозирования. Поэтому, с учетом того, что результаты моделирования для заслонки диаметром 150 мм показали для всех рецептов существенное сокращение времени цикла с максимальным приближением момента окончания выгрузки жидкого компонента к моменту окончания выгрузки сухих, а также учитывая приемлемое для сохранения точности дозирования время срабатывания заслонки такого диаметра, считаем данный вариант оптимальным.

Ни один из приведенных в табл. 3 показателей, характеризующих деятельность оператора, для всех проведенных экспериментов не превысил рекомендуемого в [1, 9] оптимального или предельно допустимого (приведены в скобках) значения. Это свидетельствует об отсутствии информационных перегрузок оператора в ходе рассматриваемого в данной статье «идеализированного» процесса функционирования.

ВЫВОДЫ

В работе построен набор аналитических моделей процессов дозирования, смешивания, а также деятельности оператора, образующих комплексную модель процесса автоматизированного управления ТП приготовления газобетона. Совместно с построенной на ее основе ИМ, они образуют комбинированную аналитико-имитационную модель, эксперименты с которой позволяют проводить анализ и синтез АСУТП и алгоритмов деятельности оператора на основе количественных и временных показателей.

Научной новизной работы, является предложенная комбинированная модель, которая в отличие от известных моделей ТП дозирования и приготовления смеси газобетона, позволяет формализовать деятельность человека-оператора АСУТП, количественно оценить показатели его информационной загрузки, а также дополнительно учитывать в процессе дозирования влияние динамической составляющей веса набора компонентов в бункера дозаторов и скорость истечения компонентов из расходных емкостей.

Практическая ценность работы заключается в том, что комбинированная модель может быть использована для оптимизации структуры, способов управления ТП, в процессе разработки АСУТП, а также в качестве основы для разработки иммерсивных интерфейсов или интеллектуальных тренажеров для подготовки операторов газобетонного производства или производств со сходными физическими процессами. Полученные с помощью данной модели временные и количественные показатели ТП позволяют оценить влияние параметров технологического оборудования и исполнительных механизмов, как на длительность всего цикла приготовления газобетонной смеси, так и на длительность и соотношение его отдельных клю-

чевих етапов. На основе аналіза результатов експериментов предложен вариант диаметров заслонок набора сухих компонентов, позволяющий оптимизировать время цикла ТП, с сохранением требуемой точности дозирования (для шлама и воды 1%, для суспензии и сухих 0,5%).

Перспективы дальнейших исследований состоят в развитии предложенного математического обеспечения, с целью учета случайных воздействий на систему «оператор – АСУТП».

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководству НПО «ЭТНА» (г. Запорожье) за предоставленные результаты производственного эксперимента линии приготовления газобетонной смеси ЗАО «Мотор Сич».

ЛІТЕРАТУРА / ЛІТЕРАТУРА

1. Душков Б. А. Основы инженерной психологии : учебник для студентов вузов / Б. А. Душков, А. В. Королев, Б. А. Смирнов. – М. : Академический проект, 2002. – 576 с.
2. Сердюк С. М. Ергономічні питання проектування людино-машинних систем : навчальний посібник / С.М. Сердюк. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 319 с. ISBN 978-617-529-093-4
3. Зенков Р. Л. Бункерные устройства / Р. Л. Зенков, Г. П. Гриневич, В. С. Исаев. – М. : Машиностроение, 1977. – 223 с.
4. Каталымов А. В. Дозирование сыпучих и вязких материалов: учебник / А. В. Каталымов, В. А. Любартович. – Л. : Химия, 1990. – 240 с.
5. Видинеев Ю. Д. Автоматическое непрерывное дозирование жидкостей / Ю. Д. Видинеев. – М. : Энергия, 1967. – 109 с.
6. Осадчий В. В. Определение мгновенной производительности вибропитателя на основании сигнала с датчика веса в системе дискретного дозирования / В. В. Осадчий // Вісник КДПУ. – Кременчук : КДПУ, – 2008. – Вип.4 (51) Част. 2. – С. 91–93.
7. Осадчий В. В. Уточнение взаимосвязей и параметров электромеханической системы дозирования вибрационного типа / В. В. Осадчий // Материалы ІХ международной научно-технической конференции «Електромеханічні системи, методомоделювання і оптимізації» КГПУ, 15–17 мая 2007 г. – Вип. 4 (45), Част. 2. – С. 19–21.
8. Дудников Е. Г. Автоматическое управление в химической промышленности / Под ред. Е. Г. Дудникова. – М. : Химия. – 1987, 368 с.
9. Смирнов Б. А. Инженерная психология. Практические занятия / Б. А. Смирнов. – К. : Вища школа, 1979. – 192 с.
10. Ткачев В. С. Оптимизация процесса весового дозирования сыпучих материалов / В. С. Ткачев, В. А. Ужеловский, В. В. Грубов // Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Днепропетровск: ПГАСА, 2009. – № 8. – С. 7–13.
11. Гриф М. Г. Модели и методы оптимального проектирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории / М. Г. Гриф, Н. Д. Ганелина, Е. Б. Цой // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2014. – № 4 (25). – С. 70–78. – DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-70-78
12. Тудэвдагва Уранчимэг. Автоматизация проектирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.17 / Тудэвдагва Уранчимэг. – Новосибирск, 2003. – 177 с.
13. Адиль Омер Юсиф Мохамед. Математическое моделирование и алгоритмы оценки эффективности системы администрирования локальной компьютерной сети: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.18, 05.13.13 / Адиль Омер Юсиф Мохамед. – М., 2007. – 177 с.
14. Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытание. Справочник / А. Н. Адаменко, А. Т. Ашеров, И. Л. Бердников и др.; под общ.ред. А. И. Губинского. – М. : Машиностроение, 1993. – 528 с.
15. Филатов А. Н. О производстве и применении изделий из ячеистого бетона в Украине / А. Н. Филатов // Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве. Сборник научных трудов. Вып. 1. – Днепропетровск : ПГАСА, 2005. – С. 43–53.
16. Ашеров А. Т. Сабадаш В. В. Судебно-эргономическая экспертиза несчастных случаев / А. Т. Ашеров, В. В. Сабадаш. – Харьков : УИПА, 2008. – 145 с.
17. Кулинич Э. М. Повышение эффективности автоматизации процессов управления технологическими комплексами приготовления газобетона: дис. ... канд. техн. наук. 05.13.07 / Кулинич Эдуард Михайлович. – Запорожье, 2013. – 157 с.

Статья поступила в редакцию 25.05.2018.
После доработки 05.07.2018.

УДК 004.514:658.5

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОNUВАННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ВИРОБНИЦТВА ГАЗОБЕТООНУ

Камінська Ж. К. – асистент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Кулинич Е. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри електроприводу і автоматизації промислових установок, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

Сердюк С. М. – канд. техн. наук, доцент кафедри програмних засобів, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Розглянуто проблему підвищення ефективності та якості процесів функціонування автоматизованої системи управління технологічним процесом (АСУТП) виробництва газобетону. Актуальність даної проблеми обумовлюється необхідністю врахування людського фактора при розробці систем даного типу. Об'єкт дослідження – методи і засоби автоматизації процесів управління складними технологічними процесами (ТП). Предмет дослідження – моделі, методи і засоби

підвищення ефективності та якості автоматизації процесів управління технологічними комплексами газобетонного виробництва.

Мета роботи – підвищення ефективності і якості процесів управління ТП приготування газобетону на основі створення комплексної математичної моделі, що формалізує діяльність людини-оператора і фізичні процеси, що відбуваються в ході ТП, з урахуванням характеристик виконавчих механізмів і режимів їх управління, а також її практична реалізація у вигляді імітаційної моделі (IM) процесу управління дозуванням матеріалів газобетонної суміші на ЗАТ «Мотор Січ» (м. Запоріжжя, Україна).

Метод. Запропоновано рішення розглянутої проблеми у вигляді IM процесу функціонування АСУТП приготування газобетону, заснованої на комплексній математичній моделі процесів дозування, змішування компонентів газобетонної суміші та інтерактивної взаємодії оператора з людино-машинним інтерфейсом (ЛМІ) АСУТП при вирішенні ним завдань управління ТП. В IM людино-машинна система (ЛМС) «оператор-АСУТП» представлена у вигляді системи масового обслуговування. Для формалізації алгоритму діяльності оператора використаний узагальнений структурний метод А. І. Губинського. Особливість даної IM полягає в тому, що вона може бути використана для оцінки та налагодження роботи АСУТП, алгоритмів роботи з ЛМІ.

Результати. Розроблено програмне забезпечення та імітаційна модель ТП виготовлення газобетону на ЗАТ «Мотор Січ», що реалізують запропоновану комплексну модель на основі транзактного способу організації квазіпараллелізма в IM.

Висновки. В роботі запропонована комбінована (аналітико-імітаційна) модель процесу автоматизованого управління технологічним процесом приготування газобетону, яка на відміну від відомих моделей управління, що включають процеси дозування та змішування, дозволяє формалізувати діяльність людини-оператора АСУТП, кількісно оцінити показники його інформаційного завантаження, а також додатково враховувати в процесі дозування вплив динамічної складової ваги набору компонентів в бункери дозаторів і швидкість витікання компонентів з витратних ємностей. Проведені експерименти підтвердили працевздатність запропонованого математичного забезпечення, що дозволяє рекомендувати його для використання на практиці при вирішенні завдань обґрунтування оптимального вибору структури, способів управління, варіантів ЛМІ, уточнення параметрів системи управління зазначенням ТП, а також при створенні інтелектуальних тренажерів для підготовки операторів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: математична модель, імітаційна модель, оператор, газобетон, людино-машинний інтерфейс, дозування, змішування, транзакт.

UDC 004.514:658.5

THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM OPERATING ANALYSIS AND MODELING FOR AERATED CONCRETE PRODUCTION

Kaminska Zh. K. – Assistant of the Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Kulynych E. M. – PhD, Associate Professor, Electric Drive and Commercial Plant Automation Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

Serdjuk S. N. – PhD, Associate Professor, Software Tools Department, Zaporizhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, Ukraine.

ABSTRACT

Context. The problem of increasing the efficiency and quality of functioning of the Automated Control System (ACS) for aerated concrete production is considered. The relevance of the problem is determined by the need to take into account the human factor in the development of systems of this type. Methods and means of control processes automation with the help of complex technological processes (TP) are the research object. The subject of the research is models, methods and means of increasing the efficiency and quality of control process automation of technological complexes in aerated concrete production.

Objective. The complex mathematical model is to be developed to bring automated control of technological processes for aerated concrete production to the advanced level of its efficiency and quality. The complex mathematical model formalizes human-operator activity and technological process on the physical level including characteristics of actuators and their control modes. Practically the complex mathematical model is implemented as a certain imitation model (IM), which represents control process for dosing the components for aerated concrete mixtures at JSC "Motor Sich" (Zaporizhzhia, Ukraine).

Method. The solution of the considered problem in the form of the IM operating process of the ACS for aerated concrete preparation is proposed. It is based on a complex mathematical model of dosing and mixing aerated concrete components and the interactive work of the operator with the human-machine interface (HMI) of the ACS when solving the TP control tasks. In the IM, the human-machine system "operator-ACS" is presented in the form of a queuing system. To formalize the operator's activity algorithm, the generalized structural method offered by A.I. Gubinsky is used. The peculiarity of this IM is that it can be used to evaluate and debug the ACS and HMI algorithms.

Results. The software and IM of the technological process for aerated concrete production at JSC "Motor Sich" was developed. That implements the proposed complex model based on a transact technique of organizing quasi-parallelism in IM.

Conclusions. The research proposes a combined (analytical-imitation) model of the automated control process for the aerated concrete preparation technology. Unlike other well-known control models which include dosing and mixing processes, this one suggests the approach that allows formalizing the activity of the ACS operator, quantifying the indicators of his information load and taking into account the influence of the dynamical changing of the components set weight in the dispenser hoppers and the components flow velocity from the consumable containers in the dosing process. The conducted experiments proved the operability of the software proposed; such software may be recommended for practical use in solving the problems of justifying the structure optimal choice, control methods, HMI variants, clarifying the ACS parameters for the specified technological processes, and also for development of intelligent simulators to be used for operator training.

KEYWORDS: mathematical model, imitation model, operator, aerated concrete, human-machine interface, dosing, mixing, transact.

REFERENCES

1. Dushkov B. A., Korolev A. V., Smirnov B. A. Osnovy inzhenernoy psihologii. Moscow Akademicheskiy proekt, Delovaya kniga, 2002, 576 p.
2. Serdiuk S. M. Erhonomichni pytannya proektuvannya lyudyno-mashynnykh system, Navchalnyy posibnyk. Zaporizhzhya, ZNTU, 2013, 319 p. ISBN 978-617-529-093-4 (In Ukrainian)
3. Zenkov R. L. Grinevich G. P., Isaev V. S. Bunkernye ustroystva. Moscow, Mashinostroenie, 1977, 223 p.
4. Katalyimov A. V., Lyubartovich V. A. Dozirovaniye syipuchih i vyazkikh materialov: uchebnik. Leningrad, Himiya, 1990, 240 p.
5. Vidineev Yu. D. Avtomaticheskoe nepreryivnoe dozirovaniye zhidkostey. Moscow, Energiya, 1967, 109 p.
6. Osadchiy V. V. Opredelenie mgnovennoy proizvoditelnosti vibropitatelya na osnovanii signala s datchika vesa v sisteme diskretnogo dozirovaniya, Visnik KDPU. Kremenchuk, KDPU, 2008, Vip.4 (51), Chast. 2, pp. 91–93.
7. Osadchiy V. V. Utochnenie vzaimosvyazey i parametrov elektromehanicheskoy sistemy dozirovaniya vibratsionnogo tipa, Materialy IX mezdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Elektromehanichni sistemi, metodi modelyuvannya i optimizatsiyi» KGPU, 15–17 maya 2007 g., Vip. 4 (45), Chast. 2, pp. 19–21.
8. Dudnikov E. G. Pod red. E. G. Dudnikova Avtomaticheskoe upravlenie v himicheskoy promyshlennosti. Moscow, Himiya, 1987, 368 p.
9. Smirnov B. A. Inzhenernaya psihologiya. Prakticheskie zanyatiya. Kiev, Vischa shkola, 1979, 192 p.
10. Tkachev V. S., Uzhelovskiy V. A., Grubov V. V. Optimizatsiya protsessa vesovogo dozirovaniya syipuchih materialov, Vestnik Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arhitekturyi. Dnepropetrovsk, PGASA, 2009, No. 8, pp. 7–13.
11. Grif M. G., Ganelina N. D., Tsoy E. B. Modeli i metody optimalnogo proektirovaniya cheloveko-mashinnyih sistem na osnove funktsionalno-strukturnoy teorii, Dokladyi Akademii nauk vyisshyey shkoly Rossiyskoy Federatsii, 2014, No. 4 (25). pp. 70–78. DOI: 10.17212/1727-2769-2014-4-70-78.
12. Tudevdagva Uranchimeg. Avtomatizatsiya proektirovaniya cheloveko-mashinnyih sistem na osnove metoda posledovatelnoy optimizatsii: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.17 / Tudevdagva Uranchimeg. Novosibirsk, 2003, 177 p.
13. Adil Omer Yusif Mohamed. Matematicheskoe modelirovanie i algoritmyi otsenki effektivnosti sistemyi administrirovaniya lokalnoy kompyuternoy seti: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.18, 05.13.13. Moscow, 2007, 177 p.
14. Adamenko A. N., Asherov A. T., Berdnikov I. L. i dr.; pod obsch. red. A. I. Gubinskogo Informatsionno-upravlyayuschie cheloveko-mashinnyie sistemyi: issledovanie, proektirovanie, ispytanie. Spravochnik. Moscow, Mashinostroenie, 1993, 528 p.
15. Filatov A. N. O proizvodstve i primenenii izdeliy iz yacheistogo betona v Ukraine, Teoriya i praktika proizvodstva i primecheniya yacheistogo betona v stroitelstve. Sbornik nauchnyih trudov. Vyip.1, Dnepropetrovsk, PGASA, 2005, pp. 43–53.
16. Asherov A. T. Sabadash V. V. Sudebno-ergonomiceskaya ekspertiza neschastnyih sluchaev. Harkov, UIPA, 2008, 145 p.
17. Kulinich E. M. Povyishenie effektivnosti avtomatizatsii protsessov upravleniya tehnologicheskimi kompleksami prigotovleniya gazobetona: dis. ... kand. tehn. nauk. 05.13.07. Zaporozhe, 2013, 157 p.

МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ МЯГКОГО ДЕКОДИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ МЕЖДУ ЭЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Фрейман В. И. – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика», Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия.

АННОТАЦИЯ

Актуальность. Решены задачи повышения достоверности передачи информации в каналах и трактах систем управления на фоне воздействия совокупности помех различной природы и вида. Объектом исследования является приемное устройство (декодер канальных символов), предмет исследования – модели, методы и алгоритмы обработки и принятия решения на уровне элементарных сигналов (канальных символов). Цель работы – создание и исследование методов и алгоритмов «мягкого» декодирования элементарных сигналов для обеспечения достоверности передачи информации по встроенным и выделенным каналам и трактам систем управления.

Метод. Использован математический аппарат нечетких множеств для описания ошибок, возникающих в каналах и трактах передачи информации между элементами систем управления. Реализованы методы и алгоритмы «мягкого» декодирования (дающих большую информацию для принятия решения, чем «жесткая» схема принятия решения) в первой решающей схеме приемных устройств в составе аппаратно-программных элементов систем управления. Выполнено программное моделирование предложенного способа принятия решения, основанного на методах нечеткой логики.

Результаты. Разработаны структурная схема и алгоритм работы квазиоптимального приемника элементарных сигналов, оригинальность которого заключается в применении методов нечеткой логики для принятия решения. Создан и исследован алгоритм принятия решения в среде MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Выводы. Проведенные в работе исследования позволяют сделать следующие выводы о том, что предложенная мягкая схема декодирования: обеспечивает большую «гибкость» при принятии решения, что положительным образом сказывается на достоверности передачи информации; не требует введения и использования многозначной логики (например, символ « \times » для модели канала 2×3 , символы «1b» и «0b» для модели канала 2×4 , символы «0»...«7» для модели канала 2×8), что облегчает реализацию алгоритма декодирования; позволяет проводить арифметические, а не логические, вычисления, что снижает вычислительную сложность алгоритма принятия решения.

Ключевые слова: канальный символ, декодирование, принятие решения, нечеткая логика, моделирование, квазиоптимальный прием.

АББРЕВИАТУРЫ

БДФЗ – блок дефазификации;
БПП – блок задания базы знаний (продукционных правил);
БФЗ – блок фазификации;
БФП – блок задания функций принадлежности для входных и выходных ЛП;
Г – генератор тактовых импульсов;
к.и. – конец импульса;
КС – канал связи;
ЛП – лингвистическая переменная;
МНЛВ – машина нечеткого логического вывода;
н.и. – начало импульса;
ПРС – первая решающая схема;
ПЭ – пороговые элементы;
РИУС – распределенная информационно-управляющая система;
СХ – устройство синхронизации;
УОП – узел определения параметров импульса дробления;
УПО – узел предварительной обработки;
УПР – узел принятия решения;
Ф – формирователь;
ФП – функция принадлежности.

НОМЕНКЛАТУРА

f – флаг;

H – средняя высота импульсов дробления;
 L – средняя длительность импульсов дробления;
 N – среднее количество импульсов дробления;
 n – длина сообщения;
 P – вероятность;
 $\{r\}$ – база продукционных правил;
 u – элементарный сигнал на выходе канала связи (в форме импульса);
 \tilde{u} – входной сигнал, ограниченный (формированный) по длительности и амплитуде;
 U – амплитуда элементарного сигнала;
 x – символ стирания;
 \bar{X} – входной четкий вектор ($\{N; L; H\}$ – значения входных лингвистических переменных);
 $\tilde{\bar{X}}$ – вектор нечетких множеств, соответствующий входному вектору \bar{X} ;
 \tilde{Y} – результат логического вывода в виде вектора нечетких множеств;
 \bar{Y} – выходной четкий вектор (значение двоичного символа);
 $\{\mu\}$ – функции принадлежности (input – входных ЛП, output – выходных ЛП);
 ρ – отношение «сигнал/помеха»;
 τ – длительность элементарного сигнала.

ВВЕДЕНИЕ

Для решения задач управления и контроля качества передачи информации между элементами и устройствами распределенных информационно-управляющих систем (РИУС) активно применяются методы и средства сетевой диагностики [1]. Они реализуют такие этапы диагностирования, как подготовка тестов, их дистанционная загрузка в объект диагностирования, активизация режима тестирования и реализация тестов, дистанционная выгрузка результатов диагностирования и их анализ [2]. Следовательно, на достоверность принятия решения о техническом состоянии элементов и устройств РИУС по результатам диагностирования существенно влияет достоверность передачи диагностической информации по каналам и трактам РИУС. Поэтому проблема обеспечения достоверности передачи тестовых сигналов по встроенным и выделенным каналам и трактам РИУС при дистанционном формате процедуры технического диагностирования является актуальной. Это также подтверждается недостаточно подробным освещением указанной проблемы в известных научных и прикладных публикациях, что подчеркивает важность проведения исследований в направлении помехоустойчивой передачи информации по встроенным и выделенным каналам и трактам РИУС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Прием информации в системах передачи осуществляется, как правило, в два этапа: прием элементарных сигналов и прием сообщения в целом [3]. Прием элементарных сигналов (символов алфавита канала связи – КС) реализуется в первой решающей схеме (ПРС). Она выполняет функции приемника (демодулятора, линейного узла, декодера линейного кода, канального фильтра и т.п.). Прием на уровне сообщения в целом реализуется во второй решающей схеме (декодере канала), в которой выполняется алгоритм коррекции ошибок (при использовании избыточного кодирования сообщений [10]). Первый этап приема обеспечивает заданное значение вероятности ошибки при принятии решения о переданном канальном символе, второй – о сообщении в целом.

Достоверность передачи информации в распределенных системах управления во многом определяется уровнем искажений, вносимых помехами в элементарные сигналы (канальные символы) при передаче по каналу связи. При большом уровне помех (малом значении отношения «сигнал/шум») для обнаружения и/или исправления ошибок (неправильная интерпретация принятых символов) наиболее часто используют аппарат и методы канального уровня модели взаимодействия открытых систем. Они реализуются во второй решающей схеме (ВРС) – канальном декодере, в частности, методы помехоустойчивого кодирования, многократного повторения (символов или сообщений), обратная связь и т.д. Это вносит существенную избыточность, приводит к задержкам, что в результате снижает информационную скорость и пропускную способность канала передачи данных [4].

Считается, что в большинстве каналов и трактов передачи действует аддитивная внешняя помеха, описываемая моделью «белый шум». Такая помеха приводит к небольшим искажениям формы передаваемого сигнала, что позволяет применять в ПРС хорошо проработанные способы оптимального приема (например, по критерию В.А. Котельникова). Однако, как правило, в реальных каналах связи действует некоторая совокупность помех, которая точно не описывается известными моделями. В этих случаях целесообразно анализировать не помехи, а вызываемые ими искажения сигналов [4]/

В статье решаются следующие частные задачи:

1. Разработка и исследование математической модели ошибок и искажений, возникающих в канале передачи информации при воздействии комплексной помехи.
2. Создание методов и алгоритмов «мягкого» декодирования на уровне элементарного сигнала, для повышения достоверности которых используется нечеткая логика.
3. Разработка структурной схемы квазиоптимального приема и описание алгоритма ее функционирования, а также создание и исследование ее модели в среде моделирования.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Для обеспечения заданных высоких требований по достоверности важно построить адекватную модель ошибок в канале связи. Часто применяемые математические модели помех [5, 6] не всегда адекватно описывают комплексный характер их воздействия на сигнал, что приводит к необходимости анализировать вносимые ими искажения [3]. Также необходимо оценить последствия от воздействия помех на передаваемые канальные символы (элементарные сигналы). Важно выяснить, как способы учета неопределенности в принятии решения на уровне элементарного сигнала или всего сообщения в целом отразятся на показателях достоверности передачи информации.

Для учета искажений разработаны способы приема, называемые квазиоптимальными [3]. При этом возникает состояние неопределенности, когда искаженный сигнал трудно отнести к какому-либо из возможных переданных сигналов, и вероятность ошибки при этом значительно повышается [7]. Наличие таких состояний учитывается «мягкой» схемой принятия решения, которая увеличивает объем информации для обработки и анализа за счет введения дополнительных состояний канала (в дополнение к состояниям, связанным с передачей канальных символов, в частности, «0» или «1»). Поэтому для учета и последующего снятия неопределенности при принятии решения как в ПРС, так и в ВРС, эффективным представляется применение математического аппарата нечетких множеств и методов нечеткой логики [8, 9]. Это позволит увеличить эффективность и достоверность применяемых алгоритмов мягкого декодирования при определенном сочетании помех и искажений. Поэтому далее будут представлены результаты разработки,

исследования и реализации метода мягкого декодирования и принятия решения на уровне элементарных сигналов (канальных символов) в приемных устройствах элементов РИУС на основе аппарата и методов нечеткой логики.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Описание и анализ искажений сигналов. Различают следующие искажения, вносимые помехами в элементарный сигнал (рис. 1): краевые искажения (дребезг фронтов) и дробления [3].

Краевые искажения могут возникать вследствие затухания сигнала за счет уменьшения амплитуд высокочастотных гармоник, формирующих крутизну фронтов импульса. Также подобные виды искажения возникают вследствие изменения таких параметров импульса, как длительность и начальная фаза, а также из-за разрегулировки параметров аппаратуры. Дробления в элементарном сигнале появляются под воздействием внешних или внутренних импульсных помех.

На рис. 1 показаны примеры искажений, вносимых в элементарный сигнал (прямоугольный импульс заданной амплитуды U^1 и длительности τ), а также комментарии к каждому примеру [8]:

1 – идеальный импульс (формируется передатчиком на входе канала связи), имеет значение двоичного символа (бита) «1»;

2 – дребезг фронтов, возникает за счет подавления помехами высокочастотных составляющих импульса, интерпретируется как «1»;

3 – сужение импульса, возникает при наложении аддитивной импульсной помехи отрицательной полярности, интерпретируется как «1»;

4 – расширение импульса, возникает при наложении аддитивной импульсной помехи положительной полярности, интерпретируется как «1»;

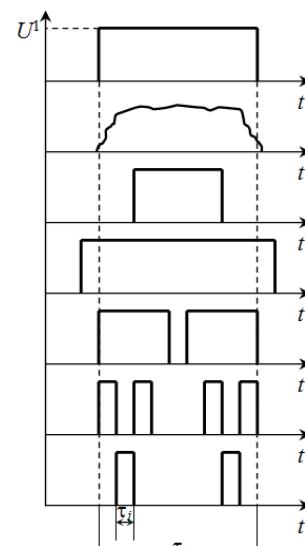
5 – дробление, характеризуется «малым» количеством импульсов (2–4) «большой» длины (в 3–5 раз меньше τ), интерпретируется как «1»;

6 – дробление, характеризуется «большим» количеством импульсов (>4) «малой» длины (на порядок меньше τ), интерпретируется как «1»;

7 – дробление, характеризуется «малым» количеством импульсов (2–4) «малой» длины (на порядок меньше τ), интерпретируется как «0».

Для полноты описания искажений необходимо добавить еще одну составляющую – величину амплитуды импульса. Ее предлагается использовать для формирования условия, по которому принимается решение о наличии или отсутствии импульса, например, по превышению среднего значения амплитуды заданного порога, например, $U^1/2$. При выполнении данного условия продолжается анализ искажений по предложенному выше подходу.

Для выделения элементарных сообщений из сигналов с указанными выше искажениями применяют квазиоптимальные способы приема, максимально учитывающие характер искажений [3].



а

Элементарный сигнал		
	Характеристика	Значение
1	Идеальный импульс	«1»
2	Дребезг фронтов	«1»
3	Сужение импульса	«1»
4	Расширение импульса	«1»
5	Дробление (N – малое, L – большое)	«1»
6	Дробление (N – большое, L – малое)	«1»
7	Дробление (N – малое, L – малое)	«0»

б

Рисунок 1 – Искажения импульса: иллюстрация (а) и комментарии (б)

Для борьбы с краевыми искажениями разработан метод приема по огибающей (или стробирования с определенным фазовым сдвигом). Он заключается в том, что прием импульса осуществляется с определенным фазовым сдвигом относительно временной метки начала импульса.

Для борьбы с искажениями типа дробления импульсов применяется интегральный прием. В указанном способе подсчитывается количество импульсов небольшой (значительно меньшей τ) длительности. Если количество таких импульсов больше определенного порогового значения, то принимается решение о формировании импульса, в противном случае – об отсутствии импульса (паузе). При другой реализации данного способа приема проводится накопление (ана-

логовое суммирование), а затем – анализ на превышение порогового значения [10]

В работе предлагается метод принятия решения, учитывающий наличие искажений обоих типов. Он построен на основе теории нечетких множеств и методов нечеткой логики. Данный метод предполагает снижение вычислительной сложности за счет использования арифметических операций, а также возможность адаптации параметров модели принятия решения к изменению внешних условий (изменение параметров модели ошибок в канале связи, повышение требований к достоверности и т. п.).

Классификация и анализ модели ошибок и способов принятия решения на уровне элементарного сигнала (символа). Важным этапом построения системы передачи информации с заданными показателями надежности (достоверности) является выбор модели ошибок и определение основных показателей качества (например, вероятность битовой ошибки) [6]. Для этого проводится продолжительное и разнообразное тестирование исследуемых каналов, после чего выполняется подробный анализ, построение моделей каналов связи и расчет показателей качества для данной системы передачи информации [11]. Полученные параметры в дальнейшем используются на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации (update или upgrade).

Для обеспечения заданного уровня качества на каждом этапе важно выбрать адекватный способ принятия решения, который в современных системах передачи реализуется либо по «жесткой», либо по «мягкой» схеме [4]. Рассмотрим их особенности для каждого из указанных этапов приема.

Жесткое принятие решения работает в случае, когда входной и выходной алфавиты канала связи совпадают (например, двоичный канал 2×2 – на входе и на выходе канала символы из алфавита {«0»; «1»}). Этот способ более прост в реализации, но менее точен при наличии ошибок, близких по значению к порогу принятия решения (рис. 2а). При мягком способе декодирования на уровне сигнала размерность алфавита на выходе канала больше, чем на входе (например, 2×3 – на входе канала символы из алфавита {«0»; «1»}, а на выходе – из алфавита {«0»; «1»; «x»}, канал со стиранием). Выходной алфавит КС расширяется за счет введения символа неопределенности, фиксирующего место ошибки (рис. 2б). На уровне приема сообщений мягкое принятие решения заключается в итеративной процедуре декодирования с анализом на каждом этапе [7]. Такой способ более сложен в реализации, приводит к задержкам, но имеет лучшие характеристики достоверности. Возникающие при анализе неопределенности в принятии решения могут быть эффективно учтены за счет использования теории нечетких множеств и методов нечеткой логики, что при определенных условиях позволит реализовать эффективные варианты ПРС, адаптирующиеся к характеристикам помех и условий приема [3].

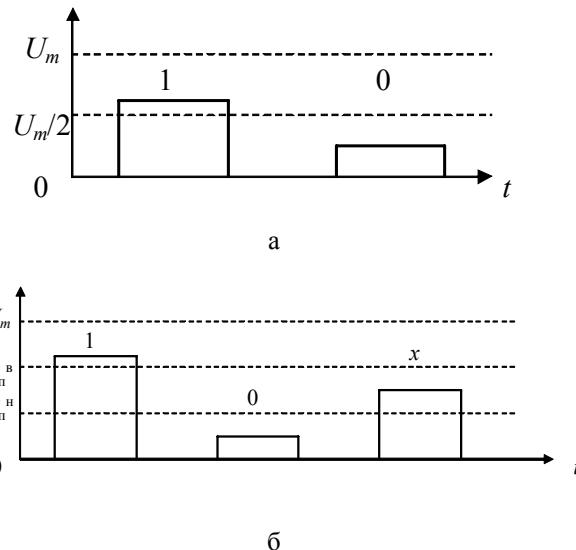


Рисунок 2 – Модели принятия решения: а – «жесткая» (2×2); б – «мягкая» (2×3)

Недостатком модели является достаточно низкая точность оценки вероятностных характеристик канала связи на уровне передачи сообщений при таком значении помехи и ее влияния на элементарный сигнал, что искаженный сигнал отличается от эталонных (базисных) значений элементарных сигналов на примерно одинаковую величину [11]. При этом выделяется зона неопределенности, попадание в которую свидетельствует о существенном значении помехи, но затрудняет ее идентификацию. Тогда говорят о «мягкой» схеме принятия решения.

Наиболее простая модель ошибок для использования мягкой схемы принятия решения – канал со стиранием (2×3). В нем выходной алфавит расширяется за счет введения символа стирания – «x», который формируется при попадании значения принятого символа в зону неопределенности (рис. 2б). Для исправления ошибок стирания требуется вводить дополнительную избыточность в сообщение и использовать специальные алгоритмы коррекции.

Из литературы [4] известно, что модели ошибок КС размерности более чем 2×8 не дают существенного увеличения, но существенно усложняется алгоритм обработки и аппаратно-программная реализация декодирующего устройства. Преимущество мягкой схемы принятия решения (уменьшение сложности алгоритма дешифрации, простота аппаратно-программной реализации, улучшение вероятностных оценок достоверности и т.п.) может дать применение теории нечетких множеств и методов нечеткой логики.

Разработка математической модели и алгоритма принятия решения в ПРС с использованием аппарата и методов нечеткой логики. Введем основные термины теории нечетких множеств применительно к рассматриваемой предметной области [11]:

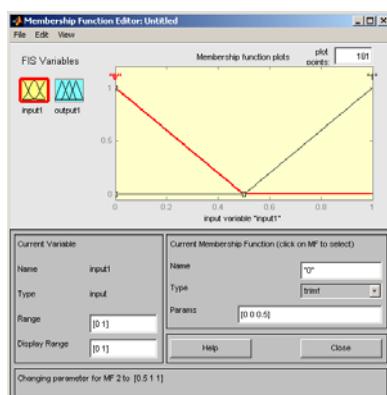
– ЛП: элементарный сигнал (канальный символ на выходе канала связи);

– терм-множество: множество значений (термов) ЛП, определяемое размерностью алфавита на выходе канала связи;

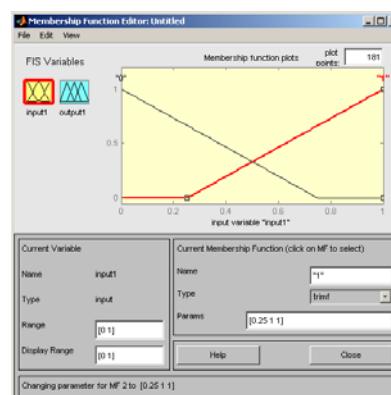
– ФП: характеризует степень принадлежности значения терма заданному нечеткому множеству, определяется выбранной моделью ошибок КС.

Рассмотрим примеры ФП для разных моделей каналов связи (2×2) (треугольные: рис. 3а – без перекрытия ФП (без неопределенности), пороговое значение 0,5; рис. 3б – с частичным перекрытием ФП, пороговые значения 0,25 и 0,75 для термов «1» и «0» соответственно; рис. 3в – с полным перекрытием ФП, пороговые значения 0 и 1 для термов «1» и «0» соответственно) и (2×3) (трапециевидные: рис. 3г; гауссовые: рис. 3д; синглетон: рис. 3е – для термов «0», «1» и «х»). По оси абсцисс откладываются множества входных значений сигнала, в рассматриваемом случае – нормализованных для удобства представления в диапазоне [0; 1].

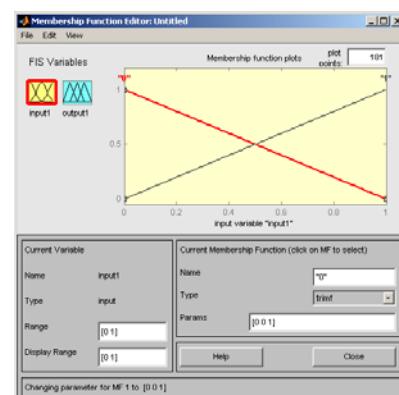
Примечание. Примеры ФП на рис. 3 реализованы в среде MathWorks MatLab, расширение Fuzzy Logic Toolbox [12, 13]. Задавая разные функции принадлежности и варьируя их параметры, можно получать различные значения для принятия решения, сравнивать их друг с другом, выбирая наиболее подходящие с учетом заданных ограничений.



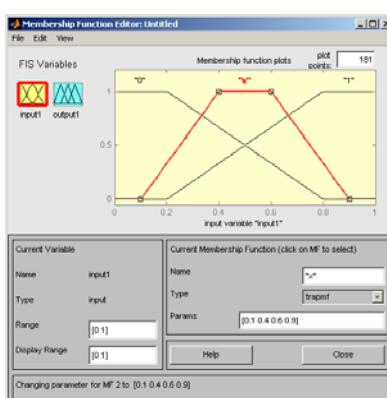
а



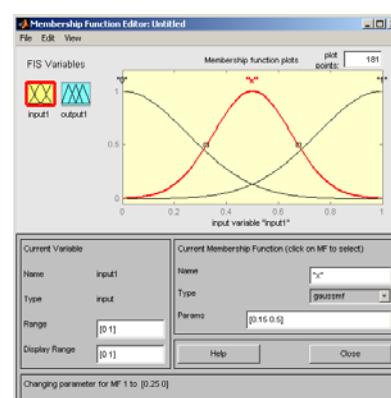
б



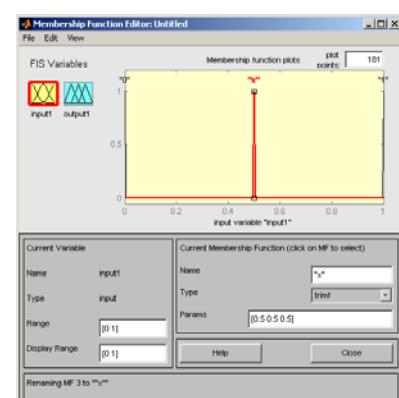
в



г



д



е

Рисунок 3 – Примеры ФП для описания ЛП «канальный символ»

Описание квазиоптимального приема с использованием теории нечетких множеств и методов нечеткой логики. Введем описание параметров предлагаемой модели принятия решения в терминах нечетких множеств [14].

Входные ЛП:

N – терм-множество {«малое», «большое»};

L – терм-множество {«малая», «большая»};

H – терм-множество {«малая», «большая»}.

ФП входных ЛП: треугольные.

Выходная ЛП: Двоичный символ, терм-множество {«0»; «1»}.

ФП выходной ЛП: синглетон.

Матрица принятия решения: приведена в табл. 1, построена на основании анализа всех вариантов значений ЛП.

Производственные правила (по количеству непустых строк в матрице принятия решения):

IF $N = \text{«м»}$ AND $L = \text{«м»}$ AND $H = \text{«м»}$ THEN «0».

IF $N = \text{«м»}$ AND $L = \text{«б»}$ AND $H = \text{«б»}$ THEN «0»... (количество правил определяется количеством строк в матрице принятия решения, ячейка «Иллюстрация» не равна «–», т.е. такое сочетание параметров на практике не встречается либо не учитывается).

Таблиця 1 – Матриця приняття рішення

№	Ілюстрація	<i>N</i>	<i>L</i>	<i>H</i>	Вивод
1		м	м	м	«0»
2		м	м	б	«0»
3		м	б	м	«0»
4		м	б	б	«1»
5		б	м	м	«0»
6		б	м	б	«1»
7	—	б	б	м	—
8	—	б	б	б	—

Далі предлається наступний алгоритм приняття рішення (оснований на методі дефазифікації Л. Заде).

1. По заданим значенням результатів входних змінних визначаються значення степеней принадлежності для всіх термів (значення функції принадлежності терма для заданого значення универсума).

2. Вибираються правила, що вимагають виконання змінних степенів принадлежності (терми, яким відповідають ненульові значення ФП для заданих конкретних результатів).

3. На першому кроці логічного виведення визначається степінь принадлежності всього антецедента кожного правила (за функцію мінімуму).

4. На другому кроці формування нечіткого виведення визначається степінь принадлежності термів вихідної змінної (за функцію максимуму).

5. Для дефазифікації використовується метод центроїда, який дозволяє визначити поточне значення вихідної змінної для поточних значень входних лингвістических змінних. В результаті отримується чіткий результат, що надає інформацію про значення вихідної ЛП (канального символа).

Розробленна модель приняття рішення положена в основу відповідного пристроя в складі приймача елементарних сигналів, структурна схема якого представлена далі.

На рис. 4 наведена обобщена структурна схема приймача фізичного рівня (ПРС), яка може бути використана в складі елементів розподільчих систем управління [14].

Считається, что квазиоптимальним приемом при дроблениях является интегральный прием [3], и описываемый ниже метод является его модификацией. Способ интегрального приема основан на аналоговом суммировании (интегрировании) площадей импульсов дробления и сравнении получившейся площади с заданным пороговым значением. Предлагаемый способ приема, построенный на предложенном методе принятия решения на основе нечеткой логики, использует более простые структурные элементы, арифметический метод расчета параметров и несложный алгоритм принятия решения. Поэтому он более эффективно реализуется в приемниках в составе элементов РИУС в условиях ограничения аппаратурно-программных ресурсов и рассматриваемой совокупности помех и искажений во встроенных и выделенных каналах и трактах РИУС.

Алгоритм роботи пристроя наступний. В схему постувається входний елементарний сигнал u , іскажений помехами різного типу (дребезг фронтів, дроблення, їх злиття). Устройство синхронізації, стробуюче сигналами з генератора тактових импульсів, управляет роботою формувача (задає задану эталонну тривалість елементарного сигналу τ , а також амплітуду импульсу). Форматований сигнал \hat{u} постувається на порогові елементи, визначаючи початок та кінець кожного импульса дроблення, які виникають в результаті іскаження передаваного елементарного сигналу. Узел визначення параметрів импульса дроблення формує импульс тривалістю τ_i . Узел предварительної обробки фіксує параметри кожного импульса дроблення (тривалість, амплітуду), а також підраховує їх кількість.

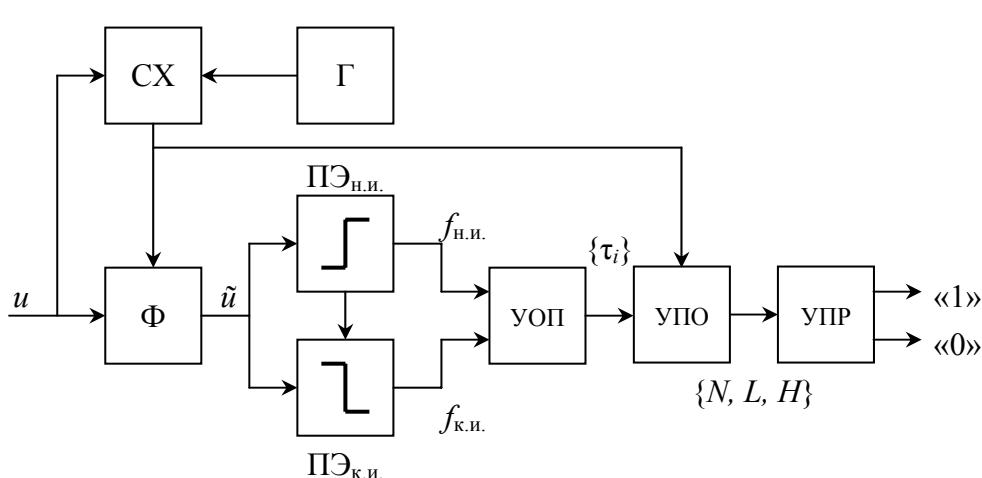


Рисунок 4 – Обобщена структурна схема приймача

После окончания интервала анализа, определяемого заданной длительностью элементарного сигнала τ , производится расчет обобщенных параметров сигнала: $N; L; H$. Они являются входными параметрами для узла принятия решения, реализующего формирование четкого вывода о принятом элементарном сигнале. Обобщенная структурная схема приведена на рис. 5.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Для исследования предложенного метода принятия решения в ПРС построена модель в среде Fuzzy Logic Toolbox (MathWorks MatLab), далее приведены элементы модели и исследования: рис. 6а – общий вид модели; рис. 6б – задание ФП для входных и выходных ЛП (задан диапазон входных значений от 0 (м) до 5 (б), см. табл. 1); рис. 6в – задание продукционных правил.

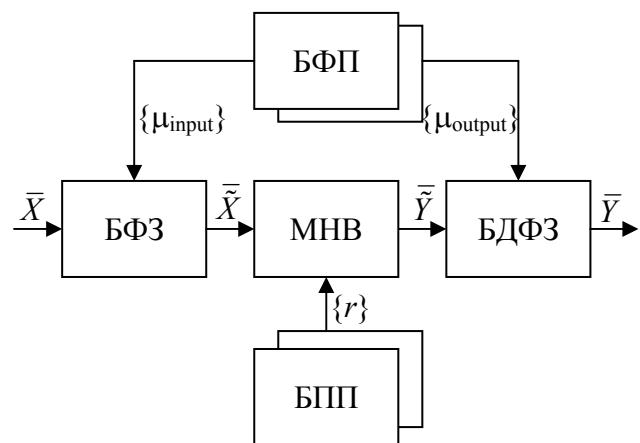


Рисунок 5 – Обобщенная структурная схема УПР

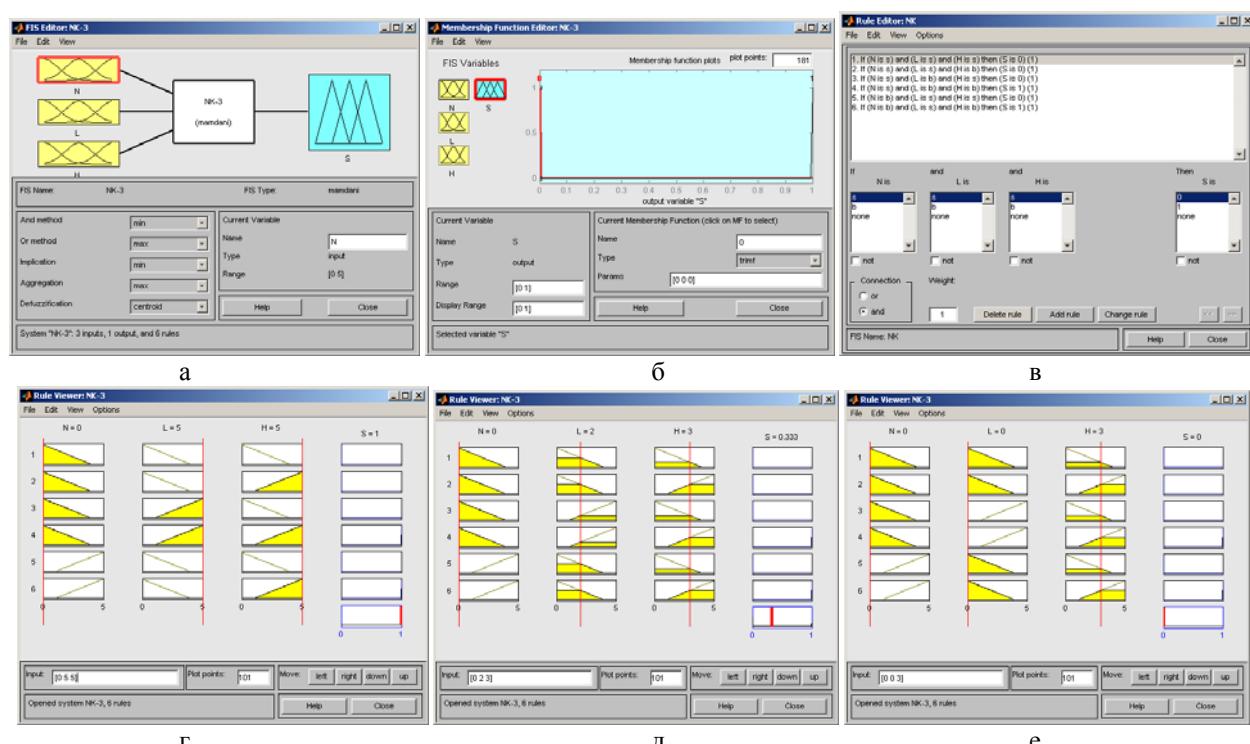


Рисунок 6 – Модель принятия решения в Fuzzy Logic Toolbox

На рис. 6г, д, е представлены разные варианты принятия решения для выходной ЛП по заданному набору значений входных ЛП:

- принят один импульс дробления ($N = 0$) «большой» длительности ($L = 1$) и «большой» высоты ($H = 1$), что интерпретируется как «1» ($S = 1$);
- принят один импульс дробления ($N = 0$) «средней» длительности ($L = 2$) и «средней» высоты ($H = 3$), что интерпретируется как «0» ($S = 0$);
- принят один импульс дробления ($N = 0$) «малой» длительности ($L = 1$) и «средней» высоты ($H = 3$), что интерпретируется как «1» ($S = 0$).

В результате формулируется четкий вывод с использованием выбранного алгоритма дефазификации.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Проанализируем возможности предложенного способа квазиоптимального приема по улучшению количественных показателей достоверности передачи информации и увеличению ее эффективности.

1. Сохранение заданного показателя достоверности принятия решения на уровне символа при уменьшении качества передачи по каналу (снижение отношения «сигнал/шум»), что повышает эффективность системы передачи информации.

Пример 1. Для количественной оценки достоверности можно воспользоваться определением соответствия вероятности ошибочного принятия решения об уровне элементарного сигнала (вероятность битовой ошибки)

при конкретном отношении «сигнал/помеха» ρ . Например, выполним расчет для следующих условий:

- сигнал: импульс амплитудой $U_c = 5$ В и длительностью $\tau_c = 1$ мкс (символ «1»);
- помеха: два импульса амплитудой $U_n = -5$ В и длительностью $\tau_n = 0,2$ мкс каждый:

$$\begin{aligned}\rho &= 10 \lg \frac{P_c}{P_n} = 10 \lg \frac{U_c^2 \cdot \tau_c}{2 \cdot U_n^2 \cdot \tau_n} = \\ &= 10 \lg \frac{5^2 \cdot 10^{-6}}{2 \cdot 5^2 \cdot 2 \cdot 10^{-6}} = 10 \cdot \lg 2,5 = 10 \cdot 0,4 = 4 \text{ дБ.}\end{aligned}$$

При этом при помощи предложенного алгоритма принятия решения и схемы декодирования будет сделан правильный вывод о приеме сигнала «1», несмотря на малое для систем связи отношение «сигнал/шум» (например, для вероятности ошибки 10^{-3} и простого способа цифрового линейного кодирования (NRZ, AMI, HDB3 и т.п.) необходимо значение $\rho > 20$ дБ). Для данного примера параметр ρ значительно меньше при сохранении порядка величины достоверности принятия решения (для рассматриваемой модели искажений типа дробления). Но для обеспечения достоверности технического диагностирования параметр эффективности не является ключевым, поэтому рассмотрим следующий пример.

2. Увеличение достоверности принятия решения на уровне символа при сохранении уровня качества передачи в канале (отношение «сигнал/шум»), что позволяет увеличить вероятность правильной передачи диагностической информации.

Пример 2. Рассмотрим передачу диагностической информации по встроенному каналу в оборудовании ОГМ-30Е (ПАО «Морион», г. Пермь), реализуемой устройствами управления и мониторинга УМ-120М. Для кадра служебной информации длиной 4 байта ($n = 32$ бит) до внедрения предложенной в работе схемы декодирования вероятность ошибки в символе P была порядка 10^{-3} . Следовательно, можно оценить вероятность правильной передачи сообщения (без применения дополнительного помехоустойчивого кодирования) следующим образом [3]:

$$P_n = (1 - P)^n = (1 - 10^{-3})^{32} \approx 0,97.$$

Предложенный способ декодирования, реализованный в информационном и аппаратно-программном обеспечении устройства управления, позволил уменьшить вероятность ошибки в символе P до величины порядка 10^{-5} , что определено в результате тестирования при имитации воздействия помех разного уровня и вида. Таким образом, вероятность правильной передачи сообщения в данном случае равна:

$$P_n = (1 - P)^n = (1 - 10^{-5})^{32} \approx 0,9997.$$

Для избыточного кода [3] расчет выполняется по предложенной методике.

Приведем для подтверждения график зависимости вероятности правильной передачи от вероятности ошибки в символе, что подтверждает значимость улучшения достоверности принятия решения на уровне элементарного сигнала (рис. 7). Следовательно, увеличение вероятности правильной передачи информации, в первую очередь – диагностической, позволяет соответственно увеличить достоверность технического диагностирования.

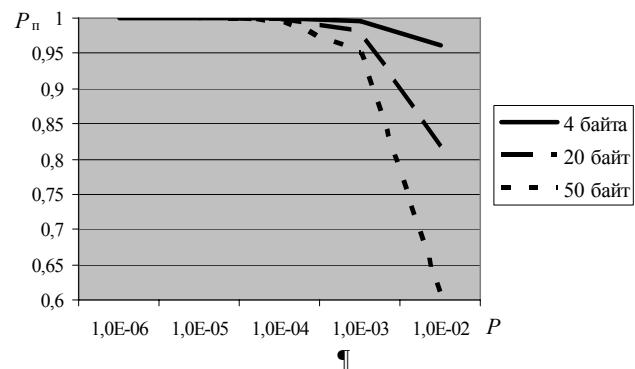


Рисунок 7 – Количественная оценка достоверности передачи информации

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Применение разработанного метода принятия решения на основе аппарата и методов нечеткой логики предлагается использовать в устройстве принятия решения на уровне элементарных сигналов в обобщенной структурной схеме приемного устройства в составе элементов РИУС. Это позволит реализовать заданные показатели достоверности, при этом будет обеспечено снижение вычислительной сложности за счет использования арифметических операций, а также возможность адаптации параметров модели принятия решения к изменению внешних условий.

Предложенные алгоритмы и структуры реализованы и исследованы при помощи разработанных программных моделей. Показано, что применение методов нечеткой логики для мягкого декодирования сигналов и сообщений позволяет повысить показателей достоверности, а также снизить вычислительную сложность алгоритмов декодирования и принятия решения, что положительным образом сказывается на увеличении быстродействия при аппаратно-программной (программируемые логические интегральные схемы) и программной (микроконтроллер) реализации соответствующих функций.

ВЫВОДЫ

В статье предложены и проанализированы результаты применения математического аппарата нечетких множеств и методов нечеткой логики для описания моделей ошибок в каналах и трактах передачи информации систем управления, разработки и реализации алгоритмов мягкого декодирования элементарных сигналов.

1. Выполнен анализ помех, возникающих в реальном канале связи, проанализированы способы их описания. Показано, что реальные помехи часто не вписываются в наиболее распространенную модель «белого шума», что требует разработки и применения специальных методов квазиоптимального приема. Выполнен анализ моделей ошибок с учетом «жесткого» и «мягкого» способов принятия решения на уровне элементарного сигнала. Указано, что «мягкий» способ адекватнее учитывает возникающую неопределенность, что приводит к улучшению достоверности приема (уменьшение вероятности ошибки в символе).

2. Разработаны математическая модель и алгоритм «мягкого» принятия решения в первой решающей схеме (приемнике элементарных сигналов) с использованием аппарата и методов нечеткой логики. Выполнена реализация предложенной модели в среде MathWorks MatLab, пакет Fuzzy Logic Toolbox. Проведенное моделирование показало, что предложенный алгоритм мягкого декодирования обладает повышенными показателями достоверности.

3. Построена обобщенная структурная схема квазиоптимального приемника элементарных сигналов и описан алгоритм его функционирования. Разработан и описан алгоритм устройства, его основных компонентов, а также сигналы и переменные, необходимые для задания параметров модели в терминах нечеткой логики, выполнено моделирование и исследование предложенной схемы. Приведены количественные оценки повышения достоверности при использовании предложенных методов мягкого «декодирования».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакланов И. Г. Тестирование и диагностика систем связи / И. Г. Бакланов. – М. : ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 265 с.
- Кон Е. Л. Подходы к тестовому диагностированию цифровых устройств / Е. Л. Кон, В. И. Фрейман // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2012. – № 6. – С. 231–241.
- Кон Е. Л. Теория электрической связи. Помехоустойчивая передача данных в информационно-управляющих и телекоммуникационных системах: модели, алгоритмы, структуры / Е. Л. Кон, В. И. Фрейман. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 317 с.
- Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. Second Edition / B. Sklar. – New Jersey, Prentice Hall Ptr.
- Пахомов Г. И. Теория электрической связи. Основные понятия / Г. И. Пахомов, В. И. Фрейман. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 115 с.
- Финк Л. М. Сигналы, помехи, ошибки / Л. М. Финк. – М. : Радио и связь, 1984. – 256 с.
- Гладких А. А. Основы теории мягкого декодирования избыточных кодов в стирающем канале связи / А. А. Гладких. – Ульяновск : УлГТУ, 2010. – 379 с.
- Freymann V. Application of Fuzzy Logic for Decoding and Evaluation of Results within the Process of Information System Components Diagnosis / V. Freymann, M. Kavalero // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElCon-Rus), February 1–3, 2017. – P. 134–139.
- Piegat A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. – Physica Verlag, A Springer Verlag Company.
- Freymann V. Research and Application of Noise Stability Providing Methods at Information and Control Systems / V. Freymann, I. Bezukladnikov // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 ElConRus), February 1–3, 2017. – P. 831–837.
- Фрейман В. И. Применение нечеткой логики для мягкого декодирования канальных символов в первой решающей схеме приемных устройств / В. И. Фрейман // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2017. – № 6. – С. 49–54.
- Штобва С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Д. Штобва. – М. : Горячая линия-Телеком, 2007. – 288 с.: ил.
- MATLAB Documentation [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (дата обращения: 14.04.2018).
- Kon E. L. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems / E. L. Kon, V. I. Freymann, A. A. Yuzhakov // Proceedings of the 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO). – P. 1–6. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997531.

Статья поступила в редакцию 24.04.2018.

После доработки 14.05.2018.

УДК 621.391:004.052

МЕТОДИ І АЛГОРИТИ М'ЯКОГО ДЕКОДУВАННЯ СИГНАЛІВ В КАНАЛАХ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ МІЖ ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Фрейман В. І. – канд. техн. наук, доцент, професор кафедри «Автоматика і телемеханіка», Пермський національний науково-дослідний політехнічний університет, м. Пермь, Росія.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Вирішено завдання підвищення достовірності передачі інформації в каналах і трактах систем управління на тлі дії взаємозв'язків між різними видами та видами. Об'єкт дослідження – приймальний пристрій (декодер канальних символів), предмет дослідження – моделі, методи та алгоритми обробки та прийняття рішень на рівні елементарних сигналів (канальних символів). Мета роботи – створення та дослідження методів та алгоритмів «м'якого» декодування елементарних сигналів для забезпечення достовірності передачі інформації по вбудованим і виділеним каналам і трактатам систем управління.

Метод. Використано математичний апарат нечітких множин для опису помилок, що виникають в каналах і трактах передачі інформації між елементами систем управління. Реалізовані методи та алгоритми «м'якого» декодування (дають більшу інформацію для прийняття рішення, ніж «жорстка» схема прийняття рішення) в першій вирішувальній схемі прий-

© Фрейман В. І., 2018

DOI 10.15588/1607-3274-2018-4-22

мальних пристрій у складі системно-програмних елементів систем управління. Виконано програмне моделювання запропонованого способу прийняття рішення, основаного на методах нечіткої логіки.

Результати. Розроблено структурну схему та алгоритм роботи квазіоптимального приймача елементарних сигналів, оригінальність якого полягає у застосуванні методів нечіткої логіки для прийняття рішень. Створено та досліджено алгоритм прийняття рішення в середовищі MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Висновки. Проведені в роботі дослідження дозволяють зробити наступні висновки про те, що запропонована м'яка схема декодування: забезпечує більшу «гнучкість» при прийнятті рішення, що позитивно впливає на достовірність передачі інформації; не вимагає введення та використання багатозначної логіки (наприклад, символ « x » для каналу 2×3 , символи « $1b$ » та « $0b$ » для каналу 2×4 , символи « 0 » ... « 7 » для каналу 2×8), що полегшує реалізацію алгоритму декодування; дозволяє проводити арифметичні, а не логічні, розрахунки, що знижує обчислювальну складність алгоритму прийняття рішення.

Ключові слова: канальний символ, декодування, прийняття рішення, нечетка логіка, моделювання, вади, квазіоптимальний прийом.

UDC 621.391:004.052

METHODS AND ALGORITHMS OF SOFT DECODING FOR SIGNALS WITHIN INFORMATION TRANSMISSION CHANNELS BETWEEN CONTROL SYSTEMS ELEMENTS

Freyman V. I. – PhD, professor of department «Automatics and telemechanics», Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia.

ABSTRACT

Context. The problems of increasing the reliability of information transmission in the channels of control systems against the background of the impact of a set of different nature and type interference are solved. The object of research is receiving device (channel symbols decoder), the subjects of research are models, methods and algorithms of proceeding and decision making for elementary signals (channels symbols). The goal is creation and research of methods and algorithms of elementary signals «soft» decoding for providing of information transmission reliability in the build-in and dedicated channels of control systems.

Method. The math methods of fuzzy sets for description of errors within information transmission channels between control systems elements is used. The methods and algorithms of «soft» decoding within first decision device of control systems elements are realized (this methods allows get more information for decision making then «hard» method of decision making). The program simulation of proposed method of decision making based on fuzzy logic is executed.

Results. The structure scheme and functioning algorithm of quasi-optimal receiver of elementary signal with original using methods of fuzzy logic for decision making are created. The algorithm of decision making is researched with using the simulation tool MathWorks Fuzzy Logic Toolbox.

Conclusions. The research results allows to make the next conclusions that proposed «soft» decoding method provides greater «flexibility» for decision making that positively affects the reliability of information transmission; don't require the introduction and use of multi-valued logic (for example, the symbol « x » for the model of the channel 2×3 , the symbols « $1b$ » and « $0b$ » for the model of the channel 2×4 , the symbols « 0 » ... « 7 » for the model of the channel 2×8) that facilitates the implementation of the decoding algorithm; allows to execute arithmetic (not logical) calculation for decreasing a computational difficult of decision making algorithm.

KEYWORDS: channel symbol, decoding, decision making, fuzzy logic, simulation, quasi-optimal receiving.

REFERENCES

1. Baklanov I. G. Testing and diagnostics of telecommunication systems. EKO-TRENDS Publ., 2001, 265 p.
2. Kon E. L., Freyman V. I. Approaches to test diagnostics of digital devices, The News of Perm national research polytechnic university. Electronics, information technologies, control systems, 2012, No. 6, pp. 231–241.
3. Kon E. L., Freyman V. I. The theory of telecommunications. The noise stability data transmission within information and control and telecommunication systems: models, algorithms, structures. PSTU Publ., 2007, 317 p.
4. Sklar B. Digital Communications. Fundamentals and Applications. Second Edition. New Jersey, Prentice Hall Ptr.
5. Pahomov G. I., Freyman V. I. The theory of telecommunications. The general terms. PSTU Publ., 2007, 115 p.
6. Fink L. M. Signals, noise, errors. Radio and communication Publ., 1984, 256 p.
7. Gladkikh A. A. Fundamentals of the theory of soft decoding of redundant codes in the erasure channel of communication. USTU Publ., 2010, 379 p.
8. Freyman V., Kavalero M. Application of Fuzzy Logic for Decoding and Evaluation of Results within the Process of Information System Components Diagnosis, Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 EIConRus), February 1–3, 2017, pp. 134–139.
9. Piegat A. Fuzzy Modeling and Control / A. Piegat. Physica Verlag, A Springer Verlag Company.
10. Freyman V., Bezukladnikov I. Research and Application of Noise Stability Providing Methods at Information and Control Systems / V. Freyman, // Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (2017 EIConRus), February 1–3, 2017, pp. 831–837.
11. Freyman V. I. The application of fuzzy logic for channel symbols soft decoding at the first decision node of receiving devices, Neurocomputers: designing, application, 2017, No. 6, pp. 49–54.
12. Shtovba S. D. Designing of fuzzy systems with using MATLAB tools. Hotline-Telecom, 2007, 288 p.
13. MATLAB Documentation [electron resource]. URL: <http://www.mathworks.com/help/matlab/> (date of access: 14.04.2018).
14. Kon E. L., Freyman V. I., Yuzhakov A. A. Soft decoding based fuzzy logic for processing of elementary signals within data transmission channels of distributed control systems, Proceedings of the 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), pp. 1–6. DOI: 10.1109/SINKHROINFO.2017.7997531.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 4/2018

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 10.12.2018. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 27,44.
Тираж 300 прим. Зам. № 1362.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб’єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.