



Запорізький національний технічний університет

Радіоелектроніка, інформатика, управління

Науковий журнал

Виходить чотири рази на рік

№ 3(34) 2015

Заснований у січні 1999 року.

Засновник і видавець – Запорізький національний технічний університет.

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

Запоріжжя

ЗНТУ

2015

Запорожский национальный технический университет

Радиоэлектроника, информатика, управление

Научный журнал

Выходит четыре раза в год

№ 3(34) 2015

Основан в январе 1999 года.

Основатель и издатель – Запорожский национальный технический университет.

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

Запорожье

ЗНТУ

2015

Zaporizhzhya National Technical University

Radio Electronics, Computer Science, Control

The scientific journal

Published four times per year

№ 3(34) 2015

Founded in January 1999.

Founder and publisher – Zaporizhzhya National Technical University.

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

Zaporizhzhya

ZNTU

2015

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

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

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

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

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

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

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

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

Опублікованими статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

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

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

Члени редколегії

Андролідакіс Й., д-р філософії, Греція

Безрук В. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

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

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

Камеяма М., д-р техн. наук, Японія

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

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

Кулік А. С., д-р техн. наук, Україна

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

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

Лиснянський А., канд. техн. наук, Ізраїль

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

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

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

Папшицький М., д-р філософії, Польща

Піза Д. М., д-р техн. наук, Україна

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

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

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

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

Рекомендовано до видання вченою радою ЗНТУ, протокол № 3 від 02.11.2015 р.

Журнал верстаний редакційно-видавничим відділом ЗНТУ.

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

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

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

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

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

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

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

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

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

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

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

Опубликованным статьям присваивается уникальный идентификатор цифрового объекта DOI.

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

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

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

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

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

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

Члены редколлегии:

Андрюлидакис И., д-р философии, Греция

Безрук В. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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 радиоэлектроники

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

Папшицкий М., д-р философии, Польша

Пиза Д. М., д-р техн. наук, Украина

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

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

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

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

Рекомендовано к изданию ученым советом ЗНТУ, протокол № 3 от 02.11.2015 г.

Журнал сверстан редакционно-издательским отделом ЗНТУ.

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

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

Тел.: +38-061-769-82-96 – редакционно-издательский отдел

Факс: (061) 764-46-62

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Запорожский национальный технический университет, 2015

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

EDITORIAL BOARD

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

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

Members of Editorial Board:

I. Androulidakis, Ph. D, Greece

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

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

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

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

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

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

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

M. Kameyama, Doctor of Science, Japan

L. M. Karpukov, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

G. V. Kornich, Doctor of Science in Physics and Mathematics, Ukraine, Radio Physics section editor

A. S. Kulik, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

D. V. Lebedev, Doctor of Science in Engineering, Ukraine, Control section editor

V. G. Levashenko, Ph.D, Slovakia

A. Lisnianski, Ph.D, Israel

U. Markowska-Kaczmar, Doctor of Science, Poland

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

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

M. Paprzycki, Ph.D, Poland

D. M. Piza, Doctor of Science in Engineering, Ukraine

O. V. Rubel, Ph.D, Canada

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

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

E. N. Zaitseva, Ph.D, Slovakia

Recommended for publication by the Academic Council of ZNTU, protocol № 3 dated 02.11.2015.

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

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

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

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

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

E-mail: rvv@zntu.edu.ua

© Zaporizhzhya National Technical University, 2015

ЗМІСТ

РАДІОФІЗИКА.....	7
<i>Онуфрийенко Л. М., [Чумаченко В. П.], Чумаченко Я. В.</i> К ОБОСНОВАНИЮ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ ВОЛНОВОДОВ. ЧАСТЬ I. E-ПЛОСКОСТНАЯ ЗАДАЧА.....	7
МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ.....	15
<i>Горбійчук М. І., Гуменюк Т. В.</i> НЕЧІТКА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН.....	15
<i>Левин В. И.</i> ИНТЕРВАЛЬНАЯ ПРОИЗВОДНАЯ И ИНТЕРВАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ.....	22
<i>Субботін С. О.</i> МОДЕЛЬ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ МЕТРИКИ ЯКОСТІ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ.....	30
НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ.....	40
<i>Romanuke V. V.</i> PARAMETRIZATION OF THE OPTICAL FLOW CAR TRACKER WITHIN MATLAB COMPUTER VISION SYSTEM TOOLBOX FOR VISUAL STATISTICAL SURVEILLANCE OF ONE-DIRECTION ROAD TRAFFIC.....	40
<i>Эль-Хатиб С. А., Скобцов Ю. А.</i> КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ.....	49
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ.....	58
<i>Val' O. D., Zhikharevich V. V., Ovchar R. I., Ostapov S. E.</i> DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE KEY STREAM GENERATORS ON THE BASE OF CELLULAR AUTOMATA.....	58
<i>Бомба А. Я., Назарук М. В., Кунанець Н. Е., Пасічник В. В.</i> УЗАГАЛЬНЕНА ДИФУЗІЙНОПОДІБНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ЗНАНСЬОВОГО ПОТЕНЦІАЛУ.....	64
УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ.....	71
<i>Алексеева К. А., Берко А. Ю., Висоцька В. А.</i> ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ КОМЕРЦІЙНИМ WEB-РЕСУРСОМ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ.....	71
<i>Василенко О. В.</i> АНАЛІЗ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ.....	80
<i>Зиновкин В. В., Мирный В. О.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СХОДИМОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ФУНКЦИОНАЛА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАГНЕЗИТОВЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....	88

CONTENTS

RADIO ELECTRONICS AND TELECOMMUNICATIONS.....	7
<i>Onufriyenko L. M., [Chumachenko V. P], Chumachenko Ya. V.</i> ON JUSTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR A PLANAR JUNCTION OF THREE WAVEGUIDES. PART I. E-PLANE PROBLEM.....	7
MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING.....	15
<i>Horbiychuk M. I., Gumenyuk T. V.</i> FUZZY OPTIMIZATION PROCESS OF DEEPENING DEEP WELLS.....	15
<i>Levin V. I.</i> THE INTERVAL DERIVATIVE AND INTERVAL-DIFFERENTIAL CALCULUS.....	22
<i>Subbotin S. A.</i> MODEL AND INDIVIDUAL QUALITY METRICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS.....	30
NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS.....	40
<i>Romanuke V. V.</i> PARAMETRIZATION OF THE OPTICAL FLOW CAR TRACKER WITHIN MATLAB COMPUTER VISION SYSTEM TOOLBOX FOR VISUAL STATISTICAL SURVEILLANCE OF ONE-DIRECTION ROAD TRAFFIC.....	40
<i>El-Khatib S. A., Skobtsov Y. A.</i> THE COMPUTER SYSTEM OF MEDICAL IMAGE SEGMENTATION BY ANT COLONY OPTIMIZATION.....	49
PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES.....	58
<i>Val' O. D., Zhikharevich V. V., Ovchar R. I., Ostapov S. E.</i> DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE KEY STREAM GENERATORS ON THE BASE OF CELLULAR AUTOMATA.....	58
<i>Bomba A. Y., Nazaruk M. V., Kunanec N. E., Pasichnyk V. V.</i> SUMMARIZED DIFFUSION-LIKE MODEL OF INFORMATIONAL PROCESS OF THE KNOWLEDGE POTENTIAL PROPAGATION.....	64
CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS.....	71
<i>Aliksieieva K. A., Berko A. Y., Vysotska V. A.</i> TECHNOLOGY OF COMMERCIAL WEB-RESOURCE MANAGEMENT BASED ON FUZZY LOGIC.....	71
<i>Vasylenko O. V.</i> ANALYSIS OF PROGRAMS FOR MECHATRONIC SYSTEMS MODELING.....	80
<i>Zinovkin V. V., Mirnyi V. J.</i> RESEARCH OF CONVERGENCE CONDITIONS OF THE MULTIPARAMETER OPTIMIZATION FUNCTIONAL OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MUNUFACTURING MAGNESITE REFRACTORY PRODUCTS.....	88

РАДИОФИЗИКА

РАДИОФИЗИКА

RADIOPHYSICS

УДК 517.9 : 537.86

Онуфриенко Л. М.¹, Чумаченко В. П.², Чумаченко Я. В.³

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математических методов в инженерии Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа, Ивано-Франковск, Украина

К ОБОСНОВАНИЮ ОДНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛОСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ТРЕХ ВОЛНОВОДОВ. ЧАСТЬ I. E -ПЛОСКОСТНАЯ ЗАДАЧА

В статье предложена и обоснована математическая модель сочленения трех волноводов в E -плоскости. Контур соединительной полости рассматриваемого волноводного трансформатора имеет форму произвольного треугольника. Задача рассеяния волноводных мод формулируется в виде краевой задачи для уравнения Гельмгольца с граничными условиями Неймана на стенках узла, условиями излучения в волноводах и условием на ребре. Модель основывается на специальном представлении искомой компоненты поля внутри треугольной области в виде суммы тригонометрических рядов, полученных с помощью метода произведения областей. Предлагается рассматривать блоки матрицы бесконечной системы линейных уравнений, которая возникает в ходе решения задачи, в качестве операторов в пространстве абсолютно сходящихся рядов l_1 . Продемонстрировано, что каждый такой оператор, описывающий взаимодействие сторон треугольника, может быть записан в виде суммы вполне непрерывного оператора и оператора сжатия. Показано, что в пространстве последовательностей $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ исследуемая система может интерпретироваться в качестве функционального уравнения с фредгольмовым оператором и что для почти всех значений частотного параметра такое уравнение единственным образом разрешимо в $l_1^{(3)}$ методом усечения, сходящимся по норме этого пространства.

Ключевые слова: волноводные неоднородности, метод произведения областей, матрично-операторные уравнения.

НОМЕНКЛАТУРА

МОМР – метод обобщенных матриц рассеяния;

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений;

l_1 – пространство последовательностей $\mathbf{s} = \{s_n\}$ таких,

что $\sum_{n=0}^{\infty} |s_n| < \infty$;

\tilde{l}_2 – пространство последовательностей $\mathbf{s} = \{s_n\}$ та-

ких, что $|s_0|^2 + \sum_{n=1}^{\infty} |s_n|^2 n < \infty$;

$X \oplus Y$ – прямая сумма линейных пространств X и Y ;

$O(x)$ – символ порядка: если $f(x) = O(g(x))$ при $x \rightarrow a$, то существует постоянная C такая, что $|f(x)| \leq C |g(x)|$ при $x \rightarrow a$;

i – мнимая единица;

$\operatorname{Re} c, \operatorname{Im} c$ – действительная и мнимая части комплексного числа c ;

δ_{mn} – символ Кронекера;

$e^{i\omega t}$ – временная зависимость монохроматического процесса;

ω – круговая частота колебаний;

ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные;

ε, μ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости, предполагается $\mu = 1$;

χ – волновое число, $\chi = \omega \sqrt{\varepsilon \varepsilon_0 \mu \mu_0}$;

x, y, z – декартовы координаты.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании волноводных структур широко используется их расчленение на отдельные элементы с последующим использованием метода сшивания, МОМР и других подходов [1, 2]. Прием успешно работает, если характеристики рассеяния элементарных блоков, возникающих после сегментации, могут быть рассчитаны с помощью высокоточных численно-аналитических методов. Примером может служить решение методом полуобращения обширного класса задач, геометрия которых допускает разбиение на регулярные участки волноводов и прямоугольные треугольники [3, 4].

В работах [5, 6] (см. также их библиографию) нами изучались возможности математического моделирования весьма гибких автономных блоков, образованных путем вычленения элементарных областей, ограниченных произвольными треугольниками. Отличительной особенностью рассмотренных моделей являлось представление искомой компоненты поля внутри треугольной области в виде тригонометрических рядов, полученных на основе метода произведения областей [7]. Как правило, достоверность получаемых результатов контролировалась с помощью различных тестов, однако все детали их формального обоснования не обсуждались. В [8], где дано строгое обоснование алгоритмов, предложенных для случая, когда треугольная область связи соединена с двумя волноводами, этот пробел был частично заполнен. В настоящей работе такое обоснование приводится для аналогичной конфигурации с тремя волновыми каналами. Узел является ключевым, так как путем последовательного присоединения к апертурам полости закороченных волноводов нулевой длины он позволяет получать в рамках МОМР матрицы рассеяния треугольной области как с двумя, так и с одним волноводными плечами. Подобно [8], СЛАУ, которая возникает при решении задачи рассеяния собственных волн волноводов на их соединении, рассматривается в качестве операторного уравнения в пространстве последовательностей $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$. В первой части работы обсуждается модель Е-плоскостной конфигурации.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Сечение структуры плоскостью $z=\text{const}$ показано на рис. 1. Будем считать, что она представляет собой разветвление бесконечных вдоль оси z плоскопараллельных волноводов и заполнена однородным диэлектриком с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ . (Переход к случаю прямоугольных волноводов хорошо известен [9]). Треугольник является невырожденным, т. е. $\delta < \min \alpha_j^*, \max \alpha_j^* < 1 - \delta$, где $\delta > 0$, $\alpha_j^* = \frac{\alpha_j}{\pi}$, а α_j – внутренний угол, отвечающий вершине M_j . В дополнение к основной системе координат (x, y) для каждой стороны треугольника $S_j (j = \overline{1,3})$ длиной $2a_j$ введена локальная система (x_j, y_j) так, что начало ее отсчета O_j

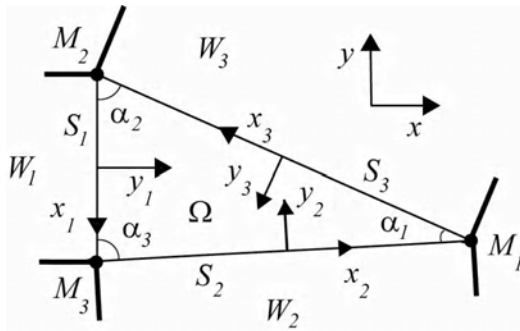


Рисунок 1 – Геометрия задачи

находится в центре S_j , а ось $O_j y_j$ направлена внутрь соединительной полости Ω . Перпендикулярно к сторонам S_j присоединены полубесконечные волноводы $W_j = \{(x_j, y_j) : -a_j < x_j < a_j, y_j < 0\}$.

Со стороны плеча p соединение возбуждается r -й собственной волной единичной амплитуды, имеющей лишь магнитную составляющую вдоль оси z . Задача состоит в отыскании единственной ненулевой z -компоненты электромагнитного поля $H_z = ue^{i\omega t}$. Введем обозначения: $u_\Omega \equiv u \forall (x, y) \in \Omega$, $u^{(j)} \equiv u \forall (x, y) \in W_j$,

$$C \varphi_n^{(j)}(x_j) = \cos \frac{n\pi(x_j + a_j)}{2a_j}, \quad \gamma_n^{(j)} = \sqrt{\left(\frac{n\pi}{2a_j}\right)^2 - \chi^2}. \quad (1)$$

Функция u должна удовлетворять двумерному уравнению Гельмгольца

$$\Delta u + \chi^2 u = 0, \quad (2)$$

однородным граничным условиям Неймана на контуре узла, условиям сопряжения полей в апертурах соединительной полости

$$u_\Omega \Big|_{y_s=0+} = u^{(s)} \Big|_{y_s=0-}, \quad \frac{\partial u_\Omega}{\partial y_s} \Big|_{y_s=0+} = \frac{\partial u^{(s)}}{\partial y_s} \Big|_{y_s=0-},$$

$$x_s \in (-a_s, a_s), \quad s = \overline{1,3}, \quad (3)$$

условию конечности энергии поля, запасенной в любой ограниченной подобласти (условию на ребре) и условиям излучения в волноводах

$$u^{(s)} = \delta_{sp} C \varphi_r^{(s)}(x_s) e^{-\gamma_r^{(s)} y_s} + \sum_{n=0}^{\infty} A_n^{(s)} C \varphi_n^{(s)}(x_s) e^{\gamma_n^{(s)} y_s},$$

$$(x_s, y_s) \in W_s, \quad s = \overline{1,3}. \quad (4)$$

При $\text{Im} \epsilon \leq 0$ существует единственное решение этой задачи для всех значений частоты $\omega > 0$, исключая некоторое счетное множество точек [10]. В последующем мы рассматриваем только те значения ω , при которых граничная задача однозначно разрешима.

2 СЛАУ. ЕДИНСТВЕННОСТЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Следуя методу произведения областей [7], u_Ω запишем в виде

$$u_\Omega = \sum_{j=1}^3 u_\Omega^{(j)}, \quad u_\Omega^{(j)} = \sum_{n=0}^{\infty} D_n^{(j)} C \varphi_n^{(j)}(x_j) e^{-\gamma_n^{(j)} y_j}. \quad (5)$$

Бесконечные вектор-столбцы коэффициентов разложения $\mathbf{A}^{(s)} = \{A_n^{(s)}\}$ и $\mathbf{D}^{(j)} = \{D_n^{(j)}\}$ подлежат определению.

Система функций $\left\{ C \varphi_n^{(j)}(x_j) e^{-\gamma_n^{(j)} y_j} \right\}_{j=1,3, n=0}^{j=3, n=\infty}$, по которым в (5) производится разложение, линейно независима за

исключением некоторого счетного множества значений ω [11]. Это множество также исключается из рассмотрения.

Подставив выражения (4), (5) в (3) и воспользовавшись ортогональностью системы функций $\left\{ C \varphi_n^{(s)}(x_s) \right\}$ на интервале $(-a_s, a_s)$, мы получим бесконечную СЛАУ относительно коэффициентов разложений:

$$D_m^{(s)} + \sum_{l \neq s} \sum_{n=0}^{\infty} \hat{q}_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = \delta_{sp} \delta_{mr} + A_m^{(s)}, \quad (6)$$

$$-D_m^{(s)} + \sum_{l \neq s} \sum_{n=0}^{\infty} \hat{p}_{mn}^{(sl)} D_n^{(l)} = -\delta_{sp} \delta_{mr} + A_m^{(s)}, \quad (7)$$

где

$$\hat{q}_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{e_m a_s} \int_{-a_s}^{a_s} \left[C \varphi_n^{(l)}(x_l) e^{-\gamma_n^{(l)} y_l} \right] \Big|_{y_s=0} C \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad (8)$$

$$\hat{p}_{mn}^{(sl)} = \frac{1}{e_m a_s \gamma_m^{(s)}} \int_{-a_s}^{a_s} \left[\frac{\partial}{\partial y_s} \left[C \varphi_n^{(l)}(x_l) e^{-\gamma_n^{(l)} y_l} \right] \right] \Big|_{y_s=0} C \varphi_m^{(s)}(x_s) dx_s, \quad (9)$$

$$e_m = 1 + \delta_{0m}, \quad m = \overline{0, \infty} \quad \text{и} \quad s = \overline{1, 3}.$$

Вне соединительной полости условие конечности энергии в ограниченной области будет выполняться, если вектор-столбец $\mathbf{A}^{(s)} = \left\{ A_n^{(s)} \right\}$ удовлетворяет условию $\mathbf{A}^{(s)} \in \tilde{l}_2$ [3]. В соединительной полости мы усилим это требование, наложив его на каждую из функций $u_{\Omega}^{(s)}$ в отдельности, что приводит к $\mathbf{D}^{(s)} \in \tilde{l}_2$. Более того, мы предположим, что $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)} \in l_1 \subset \tilde{l}_2$. Существование соответствующих последовательностей $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)}$ следует из устанавливаемой ниже разрешимости СЛАУ, порождаемой граничными условиями.

Матричные уравнения (6) и (7) образованы путем приравнивания коэффициентов разложений величин, входящих в левые и правые части равенств (3), по функциям системы $\left\{ C \varphi_m^{(s)}(x_s) \right\}$. Если $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)} \in l_1$, то разложения

$$u_{S_s}^{(s)} \Big|_{S_s} = \sum_{m=0}^{\infty} A_m^{(s)} C \varphi_m^{(s)}(x_s) \quad \text{и} \quad u_{\Omega}^{(s)} \Big|_{S_s} = \sum_{m=0}^{\infty} D_m^{(s)} C \varphi_m^{(s)}(x_s)$$

равномерно сходятся к своим суммам, являясь их рядами Фурье. Аналогичный факт имеет место и для разложения по тем же функциям величины $\hat{u}_{\Omega}^{(s)} \equiv u_{\Omega} - u_{\Omega}^{(s)} = \sum_{l \neq s} u_{\Omega}^{(l)}$ в

силу ее абсолютной непрерывности на S_s . (При $\mathbf{D}^{(l)} \in l_1$ условие интегрируемости на S_s модуля производной

$$\frac{\partial u_{\Omega}^{(l)}}{\partial x_s} \quad (\text{а также} \quad \frac{\partial u_{\Omega}^{(l)}}{\partial y_s}) \quad \text{легко проверяется). Отсюда вытекает [12], что равенство Фурье-коэффициентов величин, входящих в первое граничное условие в (3), означает равенство самих этих величин всюду на} \quad S_s.$$

Отметим, что углы при ребрах конфигурации меньше 2π . Поэтому, исходя из известного [1] поведения компоненты поля H_z в их окрестностях, можно заключить, что нормальные производные, входящие в (3), на интервале $(-a_s, a_s)$ являются квадратично интегрируемыми. Из интегрируемости на S_s производных $\left| \frac{\partial u_{\Omega}}{\partial y_s} \right|$ и $\left| \frac{\partial u_{\Omega}^{(l)}}{\partial y_s} \right|$ ($l \neq s$) следует, что и величина $\left| \frac{\partial u_{\Omega}^{(s)}}{\partial y_s} \right|$ должна быть интегрируемой.

Таким образом, если бесконечная СЛАУ (6),(7) имеет решение $\mathbf{A}^{(s)}, \mathbf{D}^{(s)} \in l_1$ ($s = \overline{1, 3}$), то после его подстановки в (4), (5) первое из условий (3) будет выполняться в каждой точке апертур S_1, S_2 и S_3 . Из (7) и полноты системы $\left\{ C \varphi_m^{(s)}(x_s) \right\}$ в пространстве суммируемых функций $L(-a_s, a_s)$ вытекает, что почти всюду на S_s будет выполняться также и условие, накладываемое на нормальную производную функции u . Тем самым формулами (4),(5) задается величина, удовлетворяющая как уравнению Гельмгольца, так и всем требуемым условиям на границе. Это означает, что СЛАУ может иметь в l_1 не более одного решения, так как противоположное предположение противоречит теореме единственности решения рассматриваемой краевой задачи.

Далее вместо системы (6), (7) мы будем изучать эквивалентную систему, состоящую из матричного уравнения

$$D_m^{(s)} + \frac{1}{2} \sum_{l \neq s} \sum_{n=0}^{\infty} [\hat{q}_{mn}^{(sl)} - \hat{p}_{mn}^{(sl)}] D_n^{(l)} = \hat{h}_m^{(s)}, \quad (10)$$

$$\hat{h}_m^{(s)} = \delta_{sp} \delta_{mr}, \quad s = \overline{1, 3}, \quad m = \overline{0, \infty},$$

появляющегося после вычитания (7) из (6), и пересчетной формулы

$$A_m^{(s)} = \frac{1}{2} \sum_{l \neq s} \sum_{n=0}^{\infty} [\hat{q}_{mn}^{(sl)} + \hat{p}_{mn}^{(sl)}] D_n^{(l)}, \quad (11)$$

полученной после сложения этих уравнений и позволяющей определять последовательности коэффициентов $\mathbf{A}^{(s)}$ по известным $\mathbf{D}^{(l)}$.

3 АНАЛИЗ МАТРИЧНЫХ ОПЕРАТОРОВ. РАЗРЕШИМОСТЬ СЛАУ

Будем рассматривать бесконечные матрицы

$$\hat{Q}^{(sl)} = (\hat{q}_{mn}^{(sl)}), \quad \hat{P}^{(sl)} = (\hat{p}_{mn}^{(sl)}) \quad \text{и} \quad \hat{F}^{(sl)} = \frac{1}{2} (\hat{Q}^{(sl)} - \hat{P}^{(sl)})$$

($s \neq l$) в качестве операторов в пространстве последовательностей l_1 . Ниже $\|\cdot\| \equiv \|\cdot\|_{l_1}$, а норма некоторого матричного оператора $A = (a_{mn}) : l_1 \rightarrow l_1$ определяется формулой $\|A\| = \sup_{0 \leq n < \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |a_{mn}|$ (см. [13]). Известно [14], что

мулой $\|A\| = \sup_{0 \leq n < \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |a_{mn}|$ (см. [13]). Известно [14], что

для того, чтобы ограниченный матричный оператор был ω -непрерывным (частный случай полной непрерывности), необходимо и достаточно, чтобы

$$\lim_{k \rightarrow \infty} \sup_{k \leq n < \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |a_{mn}| = 0. \quad \text{Введем проекторы}$$

$$P_n = \text{diag}(\underbrace{1, \dots, 1}_{n+1}, 0, 0, \dots) \quad \text{и} \quad R_n = I - P_n, \quad \text{где } I - \text{бесконечная}$$

единичная матрица, и изучим более детально $\hat{Q}^{(12)}$, $\hat{P}^{(12)}$ и $\hat{F}^{(12)}$. Пусть

$$\Gamma_n = \gamma_n^{(2)} \sin \alpha_3, \quad {}^0\Gamma_n = \frac{n\pi}{2a_2} \sin \alpha_3, \quad \Pi_n = \frac{n\pi}{2a_2} \cos \alpha_3, \quad (12)$$

$$\Lambda_n = 2\Pi_n a_1, \quad \Phi_{mn}^{\pm} = \Gamma_n^2 + \left(\frac{m\pi}{2a_1} \pm \Pi_n \right)^2,$$

$$\Psi_{mn}^{\pm} = \frac{1}{\Phi_{mn}^+} \pm \frac{1}{\Phi_{mn}^-}, \quad (13)$$

$${}^0\Phi_{mn}^{\pm} = \begin{cases} \left(\frac{m\pi}{2a_1} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2} \right)^2 \pm \frac{mn\pi^2}{2a_1 a_2} \cos \alpha_3, & \forall mn > 0, \\ \infty & \forall mn = 0, \end{cases}$$

$${}^0\Psi_{mn}^{\pm} = \frac{1}{{}^0\Phi_{mn}^+} \pm \frac{1}{{}^0\Phi_{mn}^-}. \quad (14)$$

Учитывая, что

$$x_2 = (a_1 - x_1) \cos \alpha_3 + y_1 \sin \alpha_3 - a_2,$$

$$y_2 = (a_1 - x_1) \sin \alpha_3 - y_1 \cos \alpha_3, \quad (15)$$

а также известные [15] формулы интегрирования, мы получим

$$\hat{q}_{mn}^{(12)} = \frac{1}{2e_m a_1} \left\{ \left[(-1)^m \Gamma_n - (\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) e^{-2\Gamma_n a_1} \right] \times \right.$$

$$\left. \times \Psi_{mn}^+ + \frac{m\pi}{2a_1} \sin \Lambda_n e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^- \right\}, \quad (16)$$

$$\hat{p}_{mn}^{(12)} = \frac{1}{2e_m \gamma_m^{(1)} a_1} \left\{ (-1)^{m+1} \left[\chi^2 \sin \alpha_3 \cos \alpha_3 \Psi_{mn}^+ + {}^0\Gamma_n \frac{m\pi}{2a_1} \Psi_{mn}^- \right] + \right.$$

$$\left. + \left[{}^0\Gamma_n (\Gamma_n \sin \Lambda_n + \Pi_n \cos \Lambda_n) - \gamma_n^{(2)} \cos \alpha_3 (\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) \right] \times \right.$$

$$\left. \times e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^+ + \frac{m\pi}{2a_1} \left[\gamma_n^{(2)} \cos \alpha_3 \sin \Lambda_n + {}^0\Gamma_n \cos \Lambda_n \right] e^{-2\Gamma_n a_1} \Psi_{mn}^- \right\}. \quad (17)$$

Введем обозначения ${}^0\hat{Q}^{(12)} = ({}^0\hat{q}_{mn}^{(12)})$,

$${}^0\hat{P}^{(12)} = ({}^0\hat{p}_{mn}^{(12)}) \quad \text{и} \quad {}^0\hat{F}^{(12)} = \frac{1}{2} ({}^0\hat{Q}^{(12)} - {}^0\hat{P}^{(12)}), \quad \text{где}$$

$${}^0\hat{q}_{mn}^{(12)} = \frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^+, \quad {}^0\hat{p}_{mn}^{(12)} = -\frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^-,$$

$${}^0\hat{f}_{mn}^{(12)} = \frac{(-1)^m}{2a_1} {}^0\Gamma_n, \quad (18)$$

и представим операторы $\hat{Q}^{(12)}$, $\hat{P}^{(12)}$, $\hat{F}^{(12)}$ суммами $\hat{Q}^{(12)} = {}^C\hat{Q}^{(12)} + {}^0\hat{Q}^{(12)}$, $\hat{P}^{(12)} = {}^C\hat{P}^{(12)} + {}^0\hat{P}^{(12)}$ и $\hat{F}^{(12)} = {}^C\hat{F}^{(12)} + {}^0\hat{F}^{(12)}$, где ${}^C\hat{F}^{(12)} = \frac{1}{2} ({}^C\hat{Q}^{(12)} - {}^C\hat{P}^{(12)})$.

Запишем элементы матрицы ${}^C\hat{Q}^{(12)} = \hat{Q}^{(12)} - {}^0\hat{Q}^{(12)}$ в виде

$${}^C\hat{q}_{mn}^{(12)} = \frac{1}{2e_m a_1} \left\{ (-1)^m (\Gamma_n \Psi_{mn}^+ - {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^+) - (\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) e^{-2\Gamma_n a_1} \times \right.$$

$$\left. \times \left[{}^0\Psi_{mn}^+ + (\Psi_{mn}^+ - {}^0\Psi_{mn}^+) \right] + \frac{m\pi}{2a_1} \sin \Lambda_n e^{-2\Gamma_n a_1} \left[{}^0\Psi_{mn}^- + (\Psi_{mn}^- - {}^0\Psi_{mn}^-) \right] \right\}. \quad (19)$$

Будем рассматривать матрицу ${}^C\hat{Q}^{(12)}$ как сумму матриц, элементы которых определяются отдельными слагаемыми в правой части (19). С учетом формулы (A1), полученной в приложении, ясно, что верхняя грань

$$\sup_{k \leq n < \infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left| \frac{(\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n) e^{-2\Gamma_n a_1} {}^0\Psi_{mn}^+}{2e_m a_1} \right| =$$

$$= \sup_{k \leq n < \infty} \left[\frac{|\Gamma_n \cos \Lambda_n - \Pi_n \sin \Lambda_n| e^{-2\Gamma_n a_1}}{2a_1} \sum_{m=1}^{\infty} {}^0\Psi_{mn}^+ \right]$$

достигается при конечных значениях n и стремится к нулю, когда $k \rightarrow \infty$. Это значит, что соответствующее слагаемое в (19) задает ω -непрерывный матричный оператор. С помощью формулы (A5) устанавливаем также ω -непрерывность оператора, определяемого слагаемым

$$\frac{m\pi \sin \Lambda_n e^{-2\Gamma_n a_1} {}^0\Psi_{mn}^-}{4a_1^2 e_m}. \quad \text{Несложно показать, что таковы-$$

ми будут и операторы, чьи матричные элементы включают разности $\Gamma_n \Psi_{mn}^+ - {}^0\Gamma_n {}^0\Psi_{mn}^+$, $\Psi_{mn}^+ - {}^0\Psi_{mn}^+$ и $\Psi_{mn}^- - {}^0\Psi_{mn}^-$. Таким образом оператор ${}^C\hat{Q}^{(12)}$ является ω -непрерывным. Из формул (18) и (A1) также следует ограниченность оператора ${}^0\hat{Q}^{(12)}$. В такой же способ устанавливаем ω -непрерывность оператора ${}^C\hat{P}^{(12)}$, а стало быть и ${}^C\hat{F}^{(12)}$, и ограниченность оператора ${}^0\hat{P}^{(12)}$, а значит и ${}^0\hat{F}^{(12)}$.

Найдем далее предел

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |\hat{f}_{mn}^{(12)}| = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{0\Gamma_n}{2a_1} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{0\Phi_{mn}^+} = \frac{a_1 \sin \alpha_3}{a_2 \pi} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{m}{n}\right)^2 + 2\frac{ma_1}{na_2} \cos \alpha_3 + \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2}. \quad (20)$$

Последнее выражение может быть заменено некоторым интегралом, значение которого известно [16], а именно,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |\hat{f}_{mn}^{(12)}| = \frac{a_1 \sin \alpha_3}{a_2 \pi} \int_0^{\infty} \frac{dv}{v^2 + 2v\frac{a_1}{a_2} \cos \alpha_3 + \left(\frac{a_1}{a_2}\right)^2} = \alpha_3^*. \quad (21)$$

Заметим, что монотонность подынтегральной функции, являющаяся одним из условий перехода от предела к интегралу, существенна лишь для больших значений переменной интегрирования (см. [17], решение задачи 30 из второго отдела). Значит, для любого $\tilde{\varepsilon} > 0$ существует конечное число N_{12} такое, что $\sum_{m=0}^{\infty} |\hat{f}_{mn}^{(12)}| < \alpha_3^* + \tilde{\varepsilon} \forall n \geq N_{12}$ и $\|0\hat{F}^{(12)} R_{N_{12}}\| < \alpha_3^* + \tilde{\varepsilon}$.

Вычисление значений $\hat{q}_{mn}^{(21)}$ и $\hat{p}_{mn}^{(21)}$ показывает, что они могут быть найдены из (16) и (17) путем перестановок $a_1 \leftrightarrow a_2$, $\gamma_k^{(1)} \leftrightarrow \gamma_k^{(2)}$ и умножения полученных выражений на $(-1)^{m+n}$. Предел $\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^{\infty} |\hat{f}_{mn}^{(21)}|$ совпадает с (21). Отсюда следует, что для всякого $\tilde{\varepsilon} > 0$ найдется число N_{21} такое, что $\sum_{m=0}^{\infty} |\hat{f}_{mn}^{(21)}| < \alpha_3^* + \tilde{\varepsilon} \forall n \geq N_{21}$ и $\|0\hat{F}^{(21)} R_{N_{21}}\| < \alpha_3^* + \tilde{\varepsilon}$. Если l номер стороны треугольника, следующей за s -й стороной против часовой стрелки, то значения $\hat{q}_{mn}^{(sl)}$ и $\hat{p}_{mn}^{(sl)}$ могут быть получены из формул (12)–(17), заменяя в правых их частях индексы 1 на s , 2 на l , а угол α_3 на угол между сторонами s и l . Если l -я сторона предшествует s -й стороне, то значения $\hat{q}_{mn}^{(sl)}$ и $\hat{p}_{mn}^{(sl)}$ получаются за таким же принципом из формул для $\hat{q}_{mn}^{(21)}$ и $\hat{p}_{mn}^{(21)}$.

Обобщая полученные результаты, можно утверждать, что $\forall \tilde{\varepsilon} > 0$ существуют числа $N_l = \max_{s \neq l} (N_{sl})$ такие, что имеют место представления

$$\hat{F}^{(sl)} = F\hat{F}^{(sl)} + B\hat{F}^{(sl)}, \quad \|B\hat{F}^{(sl)}\| < \alpha_k^* + \tilde{\varepsilon}, \quad k \neq s, l. \quad (22)$$

Здесь $B\hat{F}^{(sl)} = 0\hat{F}^{(sl)} R_{N_l}$, а оператор $F\hat{F}^{(sl)} = C\hat{F}^{(sl)} + 0\hat{F}^{(sl)} P_{N_l}$ является ω -непрерывным в силу ω -непрерывности первого слагаемого и конечности N_l .

Введем прямую сумму $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$, а также тождественный оператор $\mathbf{I}^{(3)} = \text{diag}(I, I, I) : l_1^{(3)} \rightarrow l_1^{(3)}$.

Пусть $\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)} \in l_1$ и $\mathbf{x} = (\mathbf{x}^{(1)}, \mathbf{x}^{(2)}, \mathbf{x}^{(3)})^T \in l_1^{(3)}$, где T – транспонирование. Снабдим $l_1^{(3)}$ нормой $\|\mathbf{x}\|_3 = \sum_{k=1}^3 \|\mathbf{x}^{(k)}\|$. Тогда для нормы некоторой операторной матрицы $\mathbf{A} = (A^{(sl)}) : l_1^{(3)} \rightarrow l_1^{(3)}$ справедлива оценка

$$\|\mathbf{A}\|_{33} \leq \max_{1 \leq l \leq 3} \sum_{s=1}^3 \|A^{(sl)}\|.$$

Будем рассматривать систему (10) как одно функциональное уравнение в $l_1^{(3)}$:

$$\mathbf{K}\mathbf{D} \equiv (\mathbf{I}^{(3)} + \mathbf{B} + \mathbf{F})\mathbf{D} = \mathbf{H}, \quad (23)$$

где $\mathbf{D} = (\mathbf{D}^{(1)}, \mathbf{D}^{(2)}, \mathbf{D}^{(3)})^T$, $\mathbf{H} = (\mathbf{h}^{(1)}, \mathbf{h}^{(2)}, \mathbf{h}^{(3)})^T$, $\mathbf{h}^{(s)} = (\hat{h}_m^{(s)}) (s = \overline{1,3})$ – векторы-столбцы правых частей, а операторные матрицы \mathbf{B}, \mathbf{F} имеют вид

$$\mathbf{B} = [B^{(sl)}] = \begin{bmatrix} 0 & B\hat{F}^{(12)} & B\hat{F}^{(13)} \\ B\hat{F}^{(21)} & 0 & B\hat{F}^{(23)} \\ B\hat{F}^{(31)} & B\hat{F}^{(32)} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = [F^{(sl)}] = \begin{bmatrix} 0 & F\hat{F}^{(12)} & F\hat{F}^{(13)} \\ F\hat{F}^{(21)} & 0 & F\hat{F}^{(23)} \\ F\hat{F}^{(31)} & F\hat{F}^{(32)} & 0 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

Заметим, что из предположений, сформулированных ранее, вытекает, что если уравнение (23) имеет решение, то оно единственно или, что одно и то же, однородное уравнение имеет только тривиальное решение.

Матрица \mathbf{F} представляет собой вполне непрерывный оператор $l_1^{(3)} \rightarrow l_1^{(3)}$, что следует из вполне непрерывности $F^{(sl)}$ в $l_1 \forall s, l$. Оценим норму оператора \mathbf{B} :

$$\|\mathbf{B}\|_{33} = \max_l \sum_{s \neq l} \|B\hat{F}^{(sl)}\| \leq \max_l \sum_{s \neq l} \alpha_s^* + 2\tilde{\varepsilon} = \max_l (1 - \alpha_l^*) + 2\tilde{\varepsilon} = 1 - \min_l \alpha_l^* + 2\tilde{\varepsilon} < 1 - \delta + 2\tilde{\varepsilon} < 1 \forall \tilde{\varepsilon} < \delta/2. \quad (25)$$

Таким образом, взяв числа N_l достаточно большими, убеждаемся, что оператор $\mathbf{I}^{(3)} + \mathbf{B} \equiv \mathbf{G}$ непрерывно обратим, а значит оператор $\mathbf{K} = \mathbf{G} + \mathbf{F}$ фредгольмов и, так как $\mathbf{H} \in l_1^{(3)}$, уравнение (23) в силу альтернативы Фредгольма [18] имеет единственное решение.

4 ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА РЕДУКЦИИ

Введем проекторы $\mathbf{P}_n^{(3)} = \text{diag}(P_{n_1}, P_{n_2}, P_{n_3})$, $\mathbf{R}_n^{(3)} = \mathbf{I}^{(3)} - \mathbf{P}_n^{(3)}$, где $n_1, n_2, n_3 \rightarrow \infty$, когда $n \rightarrow \infty$. Имеют

место свойства $\mathbf{P}_n^{(3)^2} = \mathbf{P}_n^{(3)}$, $\|\mathbf{P}_n^{(3)}\|_{33} = 1$ и $\|\mathbf{R}_n^{(3)}\mathbf{x}\|_3 \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0 \forall \mathbf{x} \in l_1^{(3)}$. Пусть, $X_n = \mathbf{P}_n^{(3)}l_1^{(3)}$ – подпространства в $l_1^{(3)}$, $\mathbf{D}_n \in X_n$ и $\mathbf{B}_n = \mathbf{P}_n^{(3)}\mathbf{B}$. Ясно, что $\mathbf{G}X_n \neq X_n$ и $\mathbf{P}_n\mathbf{G}\mathbf{D}_n = (\mathbf{I}^{(3)} + \mathbf{B}_n)\mathbf{D}_n \equiv \mathbf{G}_n\mathbf{D}_n$. Положим $n_j \geq N_j$ ($j = \overline{1,3}$) и рассмотрим наряду с точным уравнением (23) полученные из него усеченные уравнения

$$\mathbf{K}_n\mathbf{D}_n \equiv (\mathbf{G}_n + \mathbf{P}_n\mathbf{F})\mathbf{D}_n = \mathbf{P}_n\mathbf{H}. \quad (26)$$

Поскольку $\|\mathbf{B}_n\|_{33} \leq \|\mathbf{B}\|_{33} < 1$, то операторы $\mathbf{G}_n : X_n \rightarrow X_n$ непрерывно обратимы, а обратные операторы ограничены по норме в совокупности:

$$\|(\mathbf{G}_n)^{-1}\|_{33} \leq \frac{1}{1 - \|\mathbf{B}_n\|_{33}} \leq \frac{1}{1 - \|\mathbf{B}\|_{33}}. \quad (27)$$

Полагая $X = Y = l_1^{(3)}$ в условиях известной теоремы ([19], теорема 6.2) и принимая во внимание свойства операторов $\mathbf{K}, \mathbf{G}, \mathbf{F}, \mathbf{P}_n$ и \mathbf{G}_n , мы приходим к заключению, что для достаточно больших значений n системы (26) однозначно разрешимы и имеет место сходимость последовательности приближенных решений $\mathbf{D}_n^* = \mathbf{K}_n^{-1}\mathbf{P}_n\mathbf{H}$ к точному решению $\mathbf{D}^* = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{H}$:

$$\|\mathbf{D}^* - \mathbf{D}_n^*\|_3 = O\left(\inf_{\mathbf{D}_n \in X_n} \|\mathbf{D}^* - \mathbf{D}_n\|_3\right) = O(\|\mathbf{R}_n\mathbf{D}^*\|_3) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0. \quad (28)$$

По известным \mathbf{D}_n^* приближенные значения амплитуд рассеянных волноводных мод могут быть найдены с помощью пересчетных формул

$$A_m^{*(s)} = \frac{1}{2} \sum_{l \neq s} \sum_{k=0}^{n_l} [\hat{q}_{mk}^{(sl)} + \hat{p}_{mk}^{(sl)}] D_k^{*(l)}, \quad s = \overline{1,3}, \quad m = \overline{0, n_s}, \quad (29)$$

следующих из (11).

ВЫВОДЫ

Рассмотрена задача рассеяния волн в однородно заполненном E -плоскостном соединении трех волноводов с областью связи, ограниченной произвольным треугольником. Исследованы свойства матрицы бесконечной системы линейных уравнений, появляющейся при применении для анализа такой структуры метода произведения областей. Показано, что каждый блок матрицы, описывающий взаимодействие сторон треугольника, является собой ограниченный матричный оператор $l_1 \rightarrow l_1$. Этот оператор может быть представлен в виде суммы вполне непрерывного оператора и оператора сжатия, причем норма последнего не превышает некоторой величины, которая известным образом зависит от угла между сторонами. Бесконечную СЛАУ задачи предложено рассматривать в качестве операторного уравнения в пространстве последовательностей $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$. Показано, что для почти всех значений частотного параметра $\omega > 0$ это уравнение может иметь не более одного решения. Обоснована фредгольмовость рассматриваемого матричного уравнения и его разрешимость. Доказано, что решение системы может быть найдено методом редукции, сходящимся по норме пространства $l_1^{(3)}$.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы Запорожского национального технического университета «Математические модели в прикладных проблемах механики и электродинамики» (номер гос. регистрации 0112U005342).

ПРИЛОЖЕНИЕ

Воспользовавшись формулой 5.1.25(3) из [16], оценим суммы рассмотренных ниже рядов. Предполагается, что $0 < \alpha_3 < \pi$ и $n \geq 1$.

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} {}^0\Psi_{mn}^+ &= \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{1}{{}^0\Phi_{mn}^+} + \frac{1}{{}^0\Phi_{mn}^-} \right) = \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{m\pi}{2a_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2}\right)^2 + \frac{mn\pi^2}{2a_1a_2} \cos \alpha_3} + \\ &+ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\left(\frac{m\pi}{2a_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2}\right)^2 - \frac{mn\pi^2}{2a_1a_2} \cos \alpha_3} = \left(\frac{2a_1}{\pi}\right)^2 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \frac{1}{m^2 + \left(n\frac{a_1}{a_2}\right)^2 + 2mn\frac{a_1}{a_2} \cos \alpha_3} - \\ &- \left(\frac{2a_2}{n\pi}\right)^2 = \left(\frac{2a_1}{\pi}\right)^2 \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \frac{1}{\left(m + n\frac{a_1}{a_2} \cos \alpha_3\right)^2 + \left(n\frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3\right)^2} - \left(\frac{2a_2}{n\pi}\right)^2 = \\ &= \frac{4a_1a_2}{\pi n \sin \alpha_3} \cdot \frac{\text{sh}(2\pi n \frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3)}{\text{ch}(2\pi n \frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3) - \cos(2\pi n \frac{a_1}{a_2} \cos \alpha_3)} - \left(\frac{2a_2}{n\pi}\right)^2 \equiv \kappa_n = O\left(\frac{1}{n}\right). \quad (\text{A1}) \end{aligned}$$

Так как $|\Psi_{mn}^-| < {}^0\Psi_{mn}^+ \forall m \geq 1$, то нижеследующий ряд сходится и его сумма κ_n удовлетворяет неравенству

$$\sum_{m=1}^{\infty} |{}^0\Psi_{mn}^-| = \kappa_n < \eta_n = O\left(\frac{1}{n}\right). \quad (\text{A2})$$

Из определения ${}^0\Phi_{mn}^+$ и ${}^0\Phi_{mn}^-$ следует, что при $mn \geq 1$

$${}^0\Phi_{mn}^+ - {}^0\Phi_{mn}^- = \frac{mn\pi^2}{a_1a_2} \cos \alpha_3, \quad (\text{A3})$$

$$\begin{aligned} {}^0\Phi_{mn}^+ {}^0\Phi_{mn}^- &= \left[\left(\frac{m\pi}{2a_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2}\right)^2 + \frac{mn\pi^2}{2a_1a_2} |\cos \alpha_3| \right] \times \\ &\times \left[\left(\frac{m\pi}{2a_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2}\right)^2 - \frac{mn\pi^2}{2a_1a_2} |\cos \alpha_3| \right]. \quad (\text{A4}) \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^{\infty} m |{}^0\Psi_{mn}^-| &= \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2 n \pi^2 |\cos \alpha_3|}{{}^0\Phi_{mn}^+ {}^0\Phi_{mn}^-} \leq \\ &\leq \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m^2 n \pi^2 |\cos \alpha_3|}{a_1 a_2 \left[\left(\frac{m\pi}{2a_1}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{2a_2}\right)^2 - \frac{mn\pi^2}{2a_1a_2} |\cos \alpha_3| \right]} < \\ &< \frac{16na_1^3 |\cos \alpha_3|}{\pi^2 a_2} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \frac{1}{m^2 + \left(n\frac{a_1}{a_2}\right)^2 - 2mn\frac{a_1}{a_2} |\cos \alpha_3|} = \end{aligned}$$

$$= \frac{16na_1^3 |\cos \alpha_3|}{\pi^2 a_2} \sum_{m=-\infty}^{m=\infty} \frac{1}{\left(m - n \frac{a_1}{a_2} |\cos \alpha_3|\right)^2 + \left(n \frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3\right)^2} =$$
$$= \frac{16a_1^2 |\cos \alpha_3|}{\pi \sin \alpha_3} \frac{\operatorname{sh}(2\pi n \frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3)}{\operatorname{ch}(2\pi n \frac{a_1}{a_2} \sin \alpha_3) - \cos(2\pi n \frac{a_1}{a_2} |\cos \alpha_3|)} = O(1). \quad (A5)$$

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Миттра Р. Аналитические методы теории волноводов / Р. Миттра, С. Ли. – М. : Мир, 1974. – 328 с.
2. Arndt F. Automated design of waveguide components using hybrid mode-matching/numerical EM building-blocks in optimization-oriented CAD frameworks – State-of-the-art and recent advances / F. Arndt, R. Beyer, J. M. Reiter, T. Sieverding and T. Wolf // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. – 1997. – Vol. 45, No. 5. – P. 747–760.
3. Шестопапов В. П. Матричные уравнения типа свертки в теории дифракции / В. П. Шестопапов, А. А. Кириленко, С. А. Масалов. – Киев : Наукова думка, 1984. – 296 с.
4. Шестопапов В. П. Резонансное рассеяние волн. Т. 2. Волноводные неоднородности / В. П. Шестопапов, А. А. Кириленко, Л. А. Рудь. – Киев : Наукова думка, 1986. – 216 с.
5. Ващенко В. В. О выборе представления поля для базовой треугольной области в задачах моделирования H -плоскостных волноводных узлов / В. В. Ващенко, В. П. Чумаченко // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2010. – № 1. – С. 5–9.
6. Chumachenko V. P. A GSM analysis of E-plane waveguide junctions filled with piecewise homogeneous dielectric / V. P. Chumachenko, V. V. Vashchenko // International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. – 2012. – Vol. 25, No. 2. – P. 163–174.
7. Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region / V. P. Chumachenko // Electronics Letters. – 2001. – Vol. 37, No. 19. – P. 1164–1165.

Онуфрієнко Л. М.¹, Чумаченко В. П.², Чумаченко Я. В.³

¹Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

³Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри математичних методів в інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

ДО ОБГРУНТУВАННЯ ОДНІЄЇ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЛОСКОГО З'ЄДНАННЯ ТРЬОХ ХВИЛЕВОДІВ. ЧАСТИНА I. E -ПЛОЩИННА ЗАДАЧА

У статті запропонована і обгрунтована математична модель зчленування трьох хвилеводів в E -площині. Контур з'єднувальної порожнини хвилеводного трансформатора, що розглядається, має форму довільного трикутника. Задача розсіювання хвилеводних мод формулюється у вигляді крайової задачі для рівняння Гельмгольца з межовими умовами Неймана на стінках вузла, умовами випромінювання в хвилеводах та умовою на ребрі. Модель ґрунтується на спеціальному зображенні шуканої компоненти поля всередині трикутної області в вигляді суми тригонометричних рядів, отриманих за допомогою методу добутку областей. Пропонується розглядати блоки матриці нескінченної системи лінійних рівнянь, яка виникає в ході розв'язування задачі, в якості операторів в просторі абсолютно збіжних рядів l_1 . Продемонстровано, що кожний такий оператор, який описує взаємодію сторін трикутника, може бути записано в вигляді суми цілком неперервного оператора та оператора стиснення. Показано, що в просторі послідовностей $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ досліджувана система може бути інтерпретована в якості одного функціонального рівняння з фредгольмовим оператором і що майже для всіх значень частотного параметра отримане рівняння єдиним чином розв'язне в $l_1^{(3)}$ методом зрізання збіжним за нормою цього простору.

Ключові слова: хвилеводні неоднорідності, метод добутку областей, матрично-операторні рівняння.

8. Chumachenko V.P. Properties of some matrix operators appearing in the theory of planar waveguide junctions / V. P. Chumachenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2013. – Vol. 72, No. 6. – P. 469–484.
9. Левин Л. Теория волноводов / Л. Левин. – М. : Радио и связь, 1981. – 312 с.
10. Шестопапов В. П. Спектральная теория и возбуждение открытых структур / В. П. Шестопапов. – Киев : Наукова думка, 1987. – 288 с.
11. Chumachenko V. P. On linear independence of some function systems appearing in the theory of plane wave fields / V. P. Chumachenko // Telecommunications and Radio Engineering. – 2015. – Vol. 74, No. 4. – P. 281–296.
12. Бари Н. К. Тригонометрические ряды / Н. К. Бари. – М. : Физматгиз, 1961. – 936 с.
13. Хатсон В. Приложения функционального анализа и теории операторов / В. Хатсон, Дж. Пим. – М. : Мир, 1983. – 432 с.
14. Грибанов Ю. И. Координатные пространства и бесконечные системы линейных уравнений. III / Ю. И. Грибанов // Изв. вузов. Математика. – 1963. – № 3(34). – С. 27–39.
15. Градштейн И. С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И. С. Градштейн, И. М. Рыжик. – М. : Наука, 1971. – 1108 с.
16. Прудников А. П. Интегралы и ряды. Т. 1. Элементарные функции / А. П. Прудников, Ю. А. Брычков, О. И. Маричев. – М. : Физматлит, 2002. – 632 с.
17. Поля Г. Задачи и теоремы из анализа. Ч. 1 / Г. Поля, Г. Сеге. – М. : Наука, 1978. – 392 с.
18. Треногин В. А. Функциональный анализ / В. А. Треногин. – М. : Наука, 1980. – 496 с.
19. Габдулхаев Б. Г. Теория приближенных методов решения операторных уравнений / Б. Г. Габдулхаев. – Казань : Казанский государственный университет, 2006. – 112 с.

Статья поступила в редакцию 20.05.2015.

После доработки 18.06.2015.

Onufriyenko L. M.¹, Chumachenko V. P.², Chumachenko Ya. V.³

¹Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Department of Higher Mathematics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of Department of Higher Mathematics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

³Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of Department of Mathematical Methods in Engineering, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

ON JUSTIFICATION OF A MATHEMATICAL MODEL FOR A PLANAR JUNCTION OF THREE WAVEGUIDES.

PART I. E-PLANE PROBLEM

In the paper, a mathematical model of an *E*-plane junction of three waveguides has been presented and justified. The coupling cavity of the waveguide transformer in question has an arbitrary triangular shape. The problem of scattering of waveguide modes is formulated in the form of a boundary-value problem for the Helmholtz equation with Neumann boundary conditions on the periphery of the unit, radiation conditions in the waveguides and with the edge condition. The model is based on the specific trigonometric-series expansions of the field in the triangular connecting region, which are constructed using the domain-product technique. It is suggested to consider the blocks of the matrix of the infinite system of linear equations, which arises in the course of solving the problem, in the capacity of operators in the sequence space of absolutely convergent series l_1 . It has been demonstrated that each such operator, describing the interaction of sides of the triangle, can be represented as a sum of a completely continuous operator and the contraction operator. It has been shown that in the space of sequences $l_1^{(3)} = l_1 \oplus l_1 \oplus l_1$ the investigated system presents a functional equation with the Fredholm operator and that for almost all values of the frequency parameter the resulting equation is uniquely solvable in $l_1^{(3)}$ by means of the truncation method convergent in the norm of this space.

Keywords: waveguide discontinuities, domain-product technique, matrix-operator equations.

REFERENCES

1. Mittra R., Lee S. W. Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves. New York, Macmillan, 1971, 302 p.
2. Arndt F., Beyer R., Reiter J. M., Sieverding T. and Wolf T. Automated design of waveguide components using hybrid mode-matching/numerical EM building-blocks in optimization-oriented CAD frameworks – State-of-the-art and recent advances, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 1997, Vol. 45, No. 5, pp. 747–760.
3. Shestopalov V. P. Matrichny'e uravneniya tipa svertki v teorii difrakcii / V. P. Shestopalov, A. A. Kirilenko, S. A. Masalov. Kyiv, Naukova dumka, 1984, 296 p.
4. Shestopalov V. P., Kirilenko A. A., Rud' L. A. Rezonansnoe rasseyaniye voln. Vol. 2. Volnovodny'e neodnorodnosti. Kyiv, Naukova Dumka, 1986, 216 p.
5. Vashchenko V. V., Chumachenko V. P. O vy'bore predstavleniya polya dlya bazovoy treugol'noj oblasti v zadachax modelirovaniya *H*-ploskostny'x volnovodny'x uzlov, *Radio Electronics, Computer Science, Control*, 2010, No. 1, pp. 5 – 9.
6. Chumachenko V. P., Vashchenko V. V. A GSM analysis of E-plane waveguide junctions filled with piecewise homogeneous dielectric, *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields*, 2012, Vol. 25, No. 2, pp. 163–174.
7. Chumachenko V. P. Efficient field representation for polygonal region, *Electronics Letters*, 2001, Vol. 37, No. 19, pp. 1164–1165.
8. Chumachenko V. P. Properties of some matrix operators appearing in the theory of planar waveguide junctions, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2013, Vol. 72, No. 6, pp. 469–484.
9. Levin L. Teoriya volnovodov. Moscow, Radio i svyaz', 1981, 312 p.
10. Shestopalov V. P. Spektral'naya teoriya i vozbuzhdeniye otkry'ty'x struktur. Kyiv, Naukova dumka, 1987, 288 p.
11. Chumachenko V. P. On linear independence of some function systems appearing in the theory of plane wave fields, *Telecommunications and Radio Engineering*, 2015, Vol. 74, No. 4, pp. 281–296.
12. Bari N. K. Trigonometricheskie ryady'. Moscow, Fizmatgiz, 1961, 936 p.
13. Xatson V., Pim Dzh. Prilozheniya funkcional'nogo analiza i teorii operatorov. Moscow, Mir, 1983, 432 p.
14. Gribanov Yu. I. Koordinatny'e prostranstva i beskonechny'e sistemy' linejny'x uravnenij. III, *Izv. vuzov. Matematika*, 1963, No.3(34), P. 27–39.
15. Gradshteyn I. S., Ry'zhik I. M. Tablicy' integralov, sum, ryadov i proizvedenij. Moscow, Nauka, 1971, 1108 p.
16. Prudnikov A. P., Bry'chkov Yu. A., Marichev O. I. Integraly' i ryady'. Vol.1. Elementarny'e funkicii. Moscow, Fizmatlit, 2002, 632 p.
17. Polia G., Sege G. Zadachi i teoremy' iz analiza. Vol.1. Moscow, Nauka, 1978, 392 p.
18. Trenogin V. A. Funkcional'ny'j analiz. Moscow, Nauka, 1980, 496 p.
19. Gabdulxaev B. G. Teoriya priblizhenny'x metodov resheniya operatorny'x uravnenij. Kazan', *Kazanskiy gosudarstvenny'j universitet*, 2006, 112 p.

МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELLING

УДК 62-503.57:622.24

Горбійчук М. І.¹, Гуменюк Т. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

²Асистент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

НЕЧІТКА ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПОГЛИБЛЕННЯ ГЛИБОКИХ СВЕРДЛОВИН

При бурінні глибоких свердловин на нафту і газ важливе значення має правильний вибір впливів керування – осьового навантаження на долото і частоти його обертання з метою отримання мінімального значення вартості проходки. Вирішення поставленої задачі передбачає створення адекватної математичної моделі процесу поглиблення свердловин та розроблення методів ідентифікації її параметрів. Складність задачі у тому, що процес механічного буріння є стохастичним, нестационарним і таким, що розвивається у часі. Це значно ускладнює визначення традиційними методами ідентифікації цілого ряду параметрів, що впливають на процес руйнування породи. До таких параметрів можна віднести і тривалість спуско-піднімальних операцій, на значення яких впливають не тільки технологічні, технічні, але й суб'єктивні фактори. Для адекватного відтворення невизначеності значення тривалості спуско-піднімальних операцій їх запропоновано розглядати як нечіткі величини з певною функцією належності. Виходячи із цієї передумови, була сформульована задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини і розробили метод її розв'язання. Ефективність розробленого методу підтверджена на конкретних промислових даних.

Ключові слова: буріння, критерій оптимальності, вартість, проходка, керування, функція належності, генетичний алгоритм.

НОМЕНКЛАТУРА

F – осьове навантаження на долото;
 N_d – частоти обертання долота;
 Q – витрати промивної рідини;
 C_{δ} – вартість роботи бурової установки на протяязі одної години;
 t_{δ} – затрати часу на механічне буріння;
 t_{cn} – тривалість спуско-піднімальних операцій (СПО);
 d – вартість долота;
 h – проходка на долото за час t_{δ} ;
 A_U – допустима область керування;
 W_p – потужність приводу ротора;
 F_{\min} – мінімальне значення осьового навантаження на долото;
 $N_{d\min}$ – мінімальне значення швидкості обертання долота;
 F_{\max} – максимальне значення осьового навантаження на долото;
 $N_{d\max}$ – максимальне значення швидкості обертання долота;

m – число, яке характеризує «розмитість» нечіткої величини t_{cn} ;
 σ – число, яке характеризує «розмитість» нечіткої величини t_{cn} ;
 $v_0(\bar{U}(t))$ – початкова механічна швидкість;
 $\varepsilon(t)$ – оцінка станів озброєння і опор шарошкового долота;
 $g(t)$ – оцінка станів озброєння і опор шарошкового долота;
 $K_{\varepsilon}(\bar{U}(t))$ – швидкість зміни у часі оцінок $\varepsilon(t)$;
 $K_g(\bar{U}(t))$ – швидкість зміни у часі оцінок $g(t)$;
 ε_k – значення оцінки ε в кінцевий момент часу $t = t_{\delta}$;
 g_k – значення оцінки g в кінцевий момент часу $t = t_{\delta}$;
 H – глибини свердловини;
 N – число експериментальних даних.

ВСТУП

Збільшення глибини свердловини, розбурювання родовищ у важкодоступних районах, на континенталь-

ному шельфі призводить до подальшого росту витрат, ефективне використання яких визначається рівнем розвитку техніки та технології процесу буріння. Головним завданням вдосконалення технології процесу буріння є забезпечення будівництва свердловини у найкоротший строк з найменшими витратами. Вирішення цієї проблеми в даний час пов'язується з подальшим підвищенням темпів і якості будівництва свердловин, оснащенням сучасними технічними засобами, впровадження прогресивних технологій. Будівництво свердловин у нашій країні ведеться із застосуванням трьох способів обертового буріння: турбінного, роторного і з застосуванням електробурів.

На сучасному етапі розвитку технології і техніки буріння нафтових і газових свердловин обертання долота на вибої свердловини здійснюється двома принципово різними способами – ротором і вибійними двигунами. Згідно з першим способом ротор приводиться в обертання двигуном, обертає бурову колону, котра складається з ведучої труби і з'єднаних з нею за допомогою спеціального перевідника бурильних труб і долота.

Серед комплексу технологічних процесів будівництва свердловини основним вважається поглиблення стовбура у заданому напрямку на задану глибину шляхом руйнування гірської породи на вибої свердловини долотом.

Метою роботи є розроблення методу нечіткої оптимізації процесу поглиблення глибоких свердловин, що дасть змогу визначити альтернативи із заданої множини факторів керування у відповідності з вибраним критерієм.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Сучасні бурові установки дозволяють в широкому діапазоні змінювати осьове навантаження F на долото, і тому воно вважається основним керуючим впливом. Для зміни частоти обертання долота N_δ на даний час існують більш обмежені можливості. При роторному бурінні вона змінюється дискретно.

Що стосується витрати Q промивної рідини, то, як правило, цей параметр встановлюється дискретно і його в таких випадках відносять до частково керованих. Створення регульованих приводів ротора і насосів буде сприяти повному виконанню вимоги керованості для роторного буріння.

При роторному способі бурінні параметри режиму F , N_δ , Q не залежать один від одного, але, обмежені технічними можливостями бурової установки: міцністю і діаметром бурильних труб, кількістю обважених бурильних труб, забезпеченням нормальної роботи наземного обладнання.

Оскільки у процесі буріння свердловини основну роль відіграє долото, воно повинно бути раціонально використане і своєчасно підняте з вибою для заміни. Причому і зношення долота, і руйнування породи залежить не тільки від параметрів режиму буріння, але й від глибини свердловини, фізико-механічних властивостей породи і долота, температури у свердловині, пластового тиску та інших факторів. Спільний аналіз показників роботи доліт і параметрів режиму буріння показує, наприклад, що зі збільшенням осьового навантаження на долото і частоти обертання процес руйнування породи протікає більш ефективно. Одно-

часно відбувається і більш інтенсивне зношення долота, і, отже, швидше з'являється необхідність його заміни, що призводить до збільшення часу, витраченого на спуско-підйомні операції і, в кінцевому рахунку, до збільшення вартості буріння. Намагання добитись високих швидкостей проводки свердловин і найменших витрат часу на заміну долота призводить до необхідності вирішення задачі оптимального оптимізації керування бурінням.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження як вітчизняних, так і зарубіжних вчених проаналізовані в роботі [1] стали передумовою розробки методів оптимального керування процесом буріння глибоких свердловин. У роботах цих авторів виявлені механізми руйнування гірських порід, вплив режимних параметрів і умов буріння на показники процесу буріння; сформульовані техніко-економічні показники такого процесу.

Вперше проблема оптимального керування процесом поглиблення свердловин була поставлена у кінці 40-х років 20 століття [1], яка відома як задача про вибір раціонального часу перебування долота на вибої свердловини.

У подальших дослідженнях [1–6] були розроблені методи керування буровим процесом на основі детерміновано-стохастичних моделей, які дають змогу прогнозу у кожному рейсі таких режимних параметрів і такого часу буріння, що вибраний критерій оптимальності набуває екстремального значення.

Проте процес буріння є нестационарним, стохастичним і таким, що розвивається у часі. Для врахування цієї особливості процесу буріння свердловин розроблені методи керування процесом буріння як стохастичним об'єктом [1], які допускають, що відома апріорна інформація про статистичні характеристики як вхідних, так і вихідних сигналів. У дійсності така інформація є недоступною, більш того, окремі параметри процесу буріння можна вказати лише наближено у термінах нечіткої математики.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

При керуванні процесом буріння осьове навантаження на долото F і швидкість його обертання N_δ , як правило, підтримується постійними на протязі всього рейсу буріння.

Тому поставимо задачу – знайти таке F і N_δ із допустимої області A_U , які є незмінним на протязі рейсу буріння і щоб критерій оптимальності вартість метра проходки q набув найменшого значення

$$\min : q = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + t_{cn}) + d}{h(\bar{U})}, \quad (1)$$

$$\bar{U} \in A_U, \quad (2)$$

де $\bar{U} = (F, N_\delta)^T$.

При постійній потужності приводу роторного механізму зі збільшенням глибини H свердловини зростають втрати потужності на тертя бурильних труб об стінки свердловини, зменшуються граничні значення параметрів ре-

жиму буріння. Одночасно зменшується потужність, затрачена на обертання долота. Тобто співвідношення між F і N_∂ повинно задовольняти умові [1]

$$A_1 N_\partial + A_2 N_\partial^2 + A_3 H N_\partial^{1.7} + A_4 N_\partial F \leq W_p, \quad (3)$$

де A_1, A_2, A_3 і A_4 – відомі величини, які не залежать від F, N_∂ і Q .

На керувальні дії F і N_∂ накладаються обмеження [1]

$$F_{\min} \leq F \leq F_{\max}, \quad (4)$$

$$N_{\partial \min} \leq N_\partial \leq N_{\partial \max}. \quad (5)$$

Таким чином, допустима область керування A_U в обмеженні (2) визначається системою нерівностей (3)–(5).

Значення величини t_{cn} з певною вірогідністю може бути оцінено, зокрема, шляхом передбачення за результатами його значення у попередніх рейсах [7]. Складність такого передбачення зумовлена тим, що конкретне значення визначається не лише типом та продуктивністю приводу бурової лебідки, глибиною та кривизною свердловини, але й цілим рядом суб'єктивних факторів, які пов'язані зі складом бурової бригади, кваліфікацією її членів, сезонністю робіт, погодними умовами та ін.

Таким чином, наявність багатьох факторів, які невизначеним чином впливають на тривалість спуско-піднімальних операцій дає всі підстави вважати, що t_{cn} є нечіткою величиною з певною функцією належності $\mu(t_{cn})$.

Слід відмітити, що не існує формальних правил вибору функцій належності [8, 9]. Вибір тої чи іншої структури функції належності диктується типом задачі, що розв'язується.

Оскільки величина t_{cn} входить у критерій оптимальності (1) лінійно, то у нашому випадку функцію належності доцільно вибрати у вигляді гаусової апроксимації:

$$\mu(t_{cn}) = \exp \left\{ -\frac{(t_{cn} - m)^2}{2\sigma^2} \right\}. \quad (6)$$

Якщо між елементами X і Y існує однозначна залежність, яка визначається співвідношенням

$$y = \varphi(x), \quad x \in X, \quad y \in Y, \quad (7)$$

і $\mu(t_{cn})$ функція належності нечіткої величини x , то у тих випадках, коли із (7) можна визначити $\varphi^{-1}(y) = \{x : x \in X, \varphi(x) = y\}$ будемо мати

$$\mu(y) = \mu(\varphi^{-1}(y)). \quad (8)$$

Критерій оптимальності (1) подамо у такому вигляді:

$$q = \frac{C_\delta t_\delta(\bar{U}) + d}{h(\bar{U})} + \frac{C_\delta}{h(\bar{U})} t_{cn}. \quad (9)$$

Співвідношення (8) для випадку, що розглядається буде таким:

$$\mu(q) = \mu(\varphi^{-1}(q)).$$

Із рівняння (9) знаходимо $\varphi^{-1}(q) = t_{cn} = \frac{q - a(\bar{U})}{b(\bar{U})}$, де

$$a(\bar{U}) = \frac{C_\delta t_\delta(\bar{U}) + d}{h(\bar{U})}, \quad b(\bar{U}) = \frac{C_\delta}{h(\bar{U})}.$$

З врахуванням останнього співвідношення функція належності (8) набуде такого вигляду:

$$\mu(q) = \exp \left\{ -\frac{\left(\frac{q - a(\bar{U})}{b(\bar{U})} - m \right)^2}{2\sigma^2} \right\} = \exp \left\{ -\frac{(q - a(\bar{U}) - mb(\bar{U}))^2}{2\sigma^2 b^2(\bar{U})} \right\}.$$

Введемо такі позначення: $m_q = a(\bar{U}) + mb(\bar{U})$, $\sigma_q = \sigma b(\bar{U})$. Тоді

$$\mu(q) = \exp \left\{ -\frac{(q - m_q)^2}{2\sigma_q^2} \right\}.$$

Задасмо певним значенням рівня функції належності $\mu(q) = \alpha$, якому відповідає деяке значення $q = q^*$ і, яке

$$\text{слід визначити із рівняння } \exp \left\{ -\frac{(q^* - m_q)^2}{2\sigma_q^2} \right\} = \alpha, \quad \alpha < 1.$$

$$\text{Звідси } q^* = m_q + \sigma_q \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha}}.$$

Якщо врахувати значення $m_q = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})}$ і

$\sigma_q = \frac{\sigma C_\delta}{h(\bar{U})}$, то отримаємо таку задачу чіткого нелінійного програмування

$$\min : q(\bar{U}) = \frac{C_\delta (t_\delta(\bar{U}) + m) + d}{h(\bar{U})} + \frac{\sigma C_\delta}{h(\bar{U})} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha}} \quad (10)$$

за умови, що виконуються обмеження (3)–(5) на альтернативи \bar{U} .

Функції $t_\delta(\bar{U})$ і $h(\bar{U})$ визначимо, скориставшись математичною процесу поглиблення глибоких свердловин [1]

$$\frac{dh(t)}{dt} = v_0(\bar{U}(t)) f(\varepsilon(t)), \quad (11)$$

$$\frac{d\varepsilon(t)}{dt} = K_\varepsilon(\bar{U}(t)), \quad (12)$$

$$\frac{dg(t)}{dt} = K_g(\bar{U}(t)), \quad (13)$$

з початковими умовами та граничними умовами

$$h(0) = g(0) = 0; \varepsilon(0) = 1; \varepsilon(t_\delta) = \varepsilon_k; i g(t_\delta) = g_k, \quad (14)$$

де $\bar{U}(t) = (F, N_\delta)^T$.

Оскільки $\bar{U}(t) = \text{const}$, а $f(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon}$, то рівняння (11) і

1(2) можна інтегрувати з початковими та граничними умовами (14). У результаті отримаємо

$$h(\bar{U}) = \frac{v_0(\bar{U})}{K_\varepsilon(\bar{U})} \ln(K_\varepsilon(\bar{U})t_\delta + 1). \quad (15)$$

Керування процесом буріння за критерієм (1) допускає, що закінчення чергового рейсу може бути зумовлено двома факторами – зносом озброєння долота чи зносом його опор.

Допустимо, що випереджаючим фактором є знос озброєння долота. Тоді час закінчення чергового рейсу (час буріння) визначимо із рівняння (12)

$$t_\delta(\bar{U}) = A_\varepsilon K_\varepsilon^{-1}(\bar{U}), \quad (16)$$

де $A_\varepsilon = \varepsilon_k - 1$.

В тому випадку, коли випереджаючим фактором є знос опори долота, то розв'язавши диференціальне рівняння (13) з граничними умовами (14), знаходимо

$$t_\delta(\bar{U}) = A_g K_g^{-1}(\bar{U}), \quad (17)$$

де A_g – постійна величина, що визначається граничними умовами [1].

Отже, критерій оптимальності (10) буде визначатись такими формулами:

– випереджаючий знос озброєння долота

$$\min_{\bar{U} \in A_U} q(\bar{U}) = \frac{C_\delta A_\varepsilon + K_\varepsilon(\bar{U})(C_\delta m + d)}{v_0(\bar{U}) \ln(A_\varepsilon + 1)} + \frac{\sigma K_\varepsilon(\bar{U}) C_\delta}{v_0(\bar{U}) \ln(A_\varepsilon + 1)} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}; \quad (18)$$

– випереджаючий знос опор долота

$$\min_{\bar{U} \in A_U} q(\bar{U}) = \frac{C_\delta A_g K_g(\bar{U}) + K_\varepsilon(\bar{U})(C_\delta m + d)}{v_0(\bar{U}) \ln(A_g K_g(\bar{U}) / K_g(\bar{U}) + 1)} + \frac{\sigma K_\varepsilon(\bar{U}) C_\delta}{v_0(\bar{U}) \ln(A_g K_g(\bar{U}) / K_g(\bar{U}) + 1)} \sqrt{\ln \frac{1}{\alpha^2}}. \quad (19)$$

Параметри, які входять у критерій оптимальності (18) або (19), визначаються за допомогою методів ідентифікації, що розроблені в [1].

У тому випадку, коли рівень функції належності α дорівнює одиниці, приходимо до чіткої задачі оптимізації процесу механічного буріння, яка розглянута в [10], за умови, що $t_\delta = m$.

Задачі (18), (19) є задачами нелінійного програмування з обмеженнями (3)–(5). Відомо [11], що такі задачі, як правило, розв'язуються числовими методами, які для своєї реалізації вимагають, щоб критерій оптимальності і обмеження мали похідні до другого порядку включно; критерій оптимальності повинен бути унімодалльною функцією, а обмеження – випуклими. Тільки у випадку виконання цих умов існують необхідні і достатні умови існування мінімуму скалярної функції на множині значень її аргументів, які задовольняють певним обмеженням. На рис. 1 показана типова область обмежень, яка задається умовами (3)–(5).

Аналіз рис. 1 показує, що область A_U не є випуклою і тому неможливо гарантувати збіжність розв'язку задачі до оптимальної точки. Крім того критерій оптимальності (18) або (19) може мати складну топологію, наприклад, у вигляді яру, що також затрудняє розв'язок задачі оптимізації за допомогою класичних методів.

Як альтернативу таким методам можна використати генетичні алгоритми, які відрізняються від класичних методів оптимізації такими базовими елементами [12]:

- змінні у задачі оптимізації (керувальні дії), які носять назву хромосом, задаються у кодованій формі, як правило, у двійковому коді (кожна одиниця або кожний нуль у такому двійковому коді носить назву – ген);
- пошук розв'язку здійснюється не з єдиної точки, а з деякої множини точок, яку називають популяцією;
- використовують тільки цільову функцію (критерій оптимальності), а не її похідні;
- застосовують імовірнісні, а не детерміновані правила переходу до наступної ітерації.

У генетичних алгоритмів виділяють етап селекції, на якому із поточної популяції вибирають і включають у батьківську популяцію особи, які мають найбільше (у задачах максимізації) або найменше (у задачах мінімізації) значення функції пристосованості (критерію оптимальності). На наступному етапі (етапі еволюції) застосовують операції схрещування і мутації.

Суть операції схрещування – обмін фрагментами ланцюжків між двома батьківськими хромосомами, які вибираються із батьківського пула випадковим чином з імо-

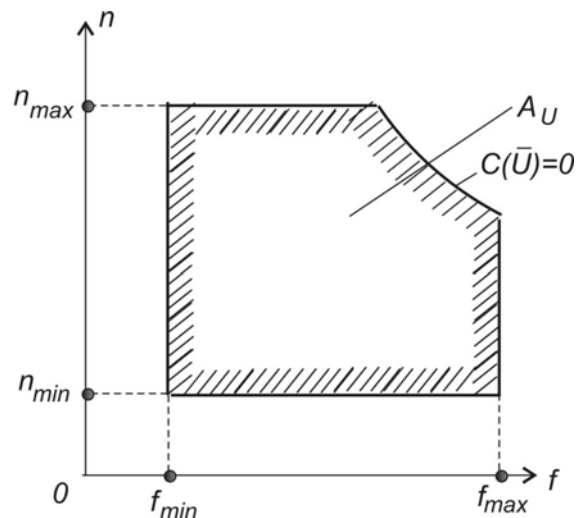


Рисунок 1 – Область обмежень

вірністю p_c . Після операції схрещування родичі у батьківській популяції замінюються на їх потомків.

Операція мутації змінює значення генів із заданою імовірністю p_m певним способом, який визначається конкретним алгоритмом, з одиниці на нуль або навпаки з нуля на одиницю. Значення не перевершує, як правило, 0,1, тому до мутації схильна лише невелика кількість генів.

Завершальним етапом у генетичному алгоритмі є його зупинка. В оптимізаційних задачах зупинка алгоритму може відбутися після досягнення функцією цілі найменшого (найбільшого) значення із заданою точністю. Зупинка алгоритму може також відбутися після того як після чергової ітерації не відбулося покращення цільової функції. Алгоритм може бути зупинений після виконання заданої кількості ітерацій або після закінчення певного часу. Якщо умова зупинки виконана, то вибираються найкращі хромосоми, яким відповідає мінімальне (максимальне) значення критерію оптимальності. У протилежному разі переходять до наступної ітерації – селекції.

Генетичний алгоритм був застосований до розв'язку оптимізаційної задачі (18) з врахуванням обмежень (3)–(5). Для ефективнішої роботи алгоритму змінні F і N_d були приведені до безрозмірного вигляду.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для умов буріння однієї із свердловин Прикарпаття були отримані такі емпіричні залежності [10] для величин v_0 , K_ε і K_g :

$$v_0 = k_1 f^{\alpha_1} n^{\beta_1}, \quad (20)$$

$$K_\varepsilon = k_2 f^{\alpha_2} n^{\beta_2}, \quad (21)$$

$$K_g = k_3 f^{\alpha_3} n^{\beta_3}, \quad (22)$$

де $k_1 = 3,25$ м/год; $k_2 = 0,35$ год⁻¹; $k_3 = 0,13$ год⁻¹; $\alpha_1 = 0,96$; $\alpha_2 = 1,27$; $\alpha_3 = 1,0$; $\beta_1 = 3,04$; $\beta_2 = 10,93$; $\beta_3 = 1,0$;

$$f = \frac{F}{F_{\max}}, \quad n = \frac{N_d}{N_{d,\max}}.$$

У безрозмірних координатах обмеження (3)–(5) будуть такими:

$$a_1 n + a_2 n^2 + a_3 n^{1,7} + a_4 H n f \leq 1, \quad (23)$$

$$f_{\min} \leq f \leq f_{\max}, \quad (24)$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}, \quad (25)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{A_1 N_{d,\max}}{W_p}, \quad a_2 = \frac{A_2 N_{d,\max}^2}{W_p}, \quad a_3 = \frac{A_3 N_{d,\max}^{1,7}}{W_p},$$

$$a_4 = \frac{A_4 F_{\max} N_{d,\max}}{W_p}; \quad F_{\max} = 129,5 \text{ кН}, \quad N_{d,\max} = 1,205 \text{ с}^{-1}.$$

Для глибини свердловини $H = 4118$ м отримали – $a_1 = 1,1175$, $a_2 = -0,6259$, $a_3 = 0,0191$, $a_4' = 0,8179$, де $a_4' = a_4 H$. Значення інших величин, які входять у критерій оптимальності (18)– $C_{\bar{c}} = 1520$ грн/год, $d = 2610$ грн.

Для визначення параметрів функції належності $\mu(t_{cn})$ скористаємося даними, які при бурінні однієї із свердловин на Прикарпатті [7]. Рис. 2 відтворює графік залежності тривалості СПО від глибини свердловини H . Візуальний аналіз рис. 2 показує, що існує лінійний тренд тривалості СПО у функції від H , який можна описати лінійною залежністю $\hat{t}_{cn} = \alpha_0 + \alpha_1 H$.

З використанням методу найменших квадратів було визначено, що $\alpha_0 = -2,159$ і $\alpha_1 = 0,004$. За допомогою екстраполяції лінійного тренду на один крок було знайдено, що значення параметру функції належності $\mu(t_{cn})$ є таким: $m = 18,73$. Другий параметр σ функції належності $\mu(t_{cn})$ знайдений за такою формулою:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(t_{cn}^{(k)} - \hat{t}_{cn}^{(k)} \right)^2, \quad (26)$$

Обчислення за останньою формулою дали такий результат: $\sigma = 2,44$. Рис. 3 дає наочне уявлення про вигляд функції належності $\mu(t_{cn})$.

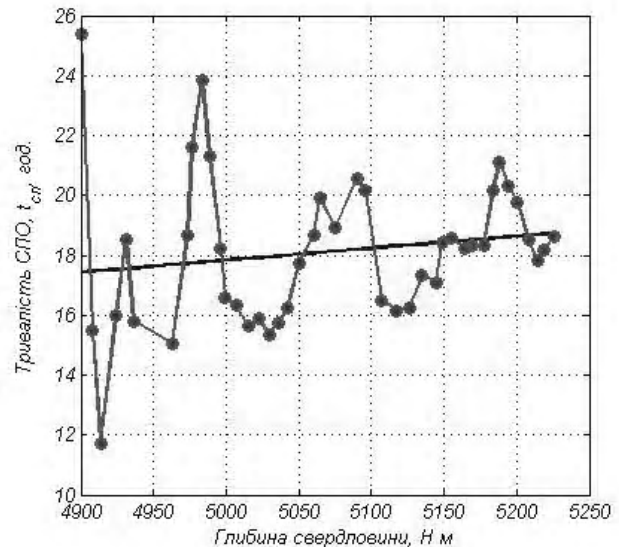


Рисунок 2 – Зміна тривалості спуско-піднімальних операцій у функції глибини свердловини

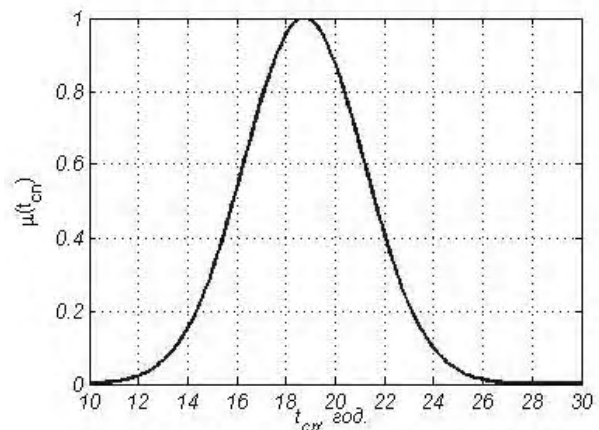


Рисунок 3 – Функція належності $\mu(t_{cn})$

На рис. 4 наведений графік залежності $q(f, n)$, який отриманий для наведених вище коефіцієнтів моделей (20)–(22) і значень C_0, m, σ, α і d .

Із графіка видно, що цільова функція має мінімум у вигляді дна яру, що є ще одним аргументом на користь генетичного алгоритму.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Застосування генетичного алгоритму до задачі оптимізації (18) з обмеженнями (3)–(5) дало такі результати: $q^* = 2421,8$ грн/м, $f^* = 0,877$, $n^* = 0,712$. Результат роботи алгоритму ілюструє рис. 5, на якому показана область A_U і лінії рівня функції $q(f, n)$.

У тому випадку, коли $\alpha = 1$, отримаємо чітку задачу оптимізації, розв'язування якої детально розглянуто у [1]. Для даних, які наведені вище, отримали такий розв'язок чіткої задачі: $q^* = 2378,1$ грн/м, $f^* = 0,864$, $n^* = 0,720$. Отже, зменшення «нечіткості» задачі зменшує значення критерію оптимальності, у нашому випадку на $\Delta q^* = 43,7$ грн/м.

«Нечіткість» значення t_{cn} визначає параметр функції належності σ , який визначений як середньоквадратичне відхилення за формулою (26). Можна запропонувати більш

«песимістичний» сценарій визначення параметру σ – як максимальне відхилення значення t_{cn} від лінії регресії

$$\sigma = \max_k : |t_{cn}^{(k)} - \hat{t}_{cn}^{(k)}| \tag{27}$$

Якщо значення параметру функції належності σ визначити за формулою (27), то отримаємо – $\sigma = 7,93$ год.

6 ОГОВОРЕННЯ

Розв'язування задачі нечіткої оптимізації при значенні параметру σ , яке визначено за формулою (22), і незмінних інших значеннях параметрів критерію оптимальності (18), дало такий результат: $q^* = 2508,9$ грн/м, $f^* = 0,903$, $n^* = 0,697$. Збільшення «нечіткості» задачі оптимізації привело до збільшення вартості метра проходки свердловини на $\Delta q^* = 130,8$ грн/м. у порівнянні з чіткою задачею оптимізації, яка розглядалась в [1].

Результати роботи можуть знайти застосування при бурінні глибоких свердловин з роторним приводом шарошкових доліт. Для турбінного буріння отримані результати можна поширити за умови уточнення математичної моделі (20)–(22) і врахування того факту, що осьове навантаження на долото і частота його обертання функціонально залежні.

ВИСНОВКИ

Установлено, що процес поглиблення свердловин є нестационарним, стохастичним і таким, що розвивається у часі. Показано, що привалить СПО, у силу технічних, технологічних і суб'єктивних факторів, може розглядатись як нечітка величина з певною функцією належності. Виходячи із цього, задача оптимізації процесу механічного буріння сформульована у термінах нечіткої математики.

За допомогою генетичного алгоритму успішно розв'язана задача нечіткої оптимізації процесу поглиблення свердловини для випадку, коли цільова функція має несприятливу топологію, а область обмежень не є випуклою.

На значення вартості метра проходки (критерію оптимальності) суттєвий вплив має «розмитість» величини тривалості t_{cn} спуско-піднімальних операцій. Збільшення невизначеності параметру t_{cn} тягне за собою збільшення вартості метра проходки, що є свосередню платою за нечіткість величини спуско-піднімальних операцій.

ПОДЯКИ

Робота виконана в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи «Синтез комп'ютерних систем та розробка програмного забезпечення для об'єктів нафтогазового комплексу» (номер державної реєстрації 0111U005890).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Горбійчук М. І. Оптимізація процесу буріння глибоких свердловин : монографія / М. І. Горбійчук, Г. Н. Семенцов. – Івано-Франківськ : Факел, 2006. – 493 с.
2. Dwigth Y. Computers in the drilling process / Y. Dwigth, Williams James // Petrol Megan. – 1987. – 9, № 6. – Р. 29–32.
3. Бражников В. А. Информационное обеспечение оптимального управления бурением скважин / В. А. Бражников, А. А. Фурнэ. – М. : Недра, 1989. – 208 с.
4. Halda E. E. Field verification of drilling models and computerized selection of drill, bit, WOB and drillstring rotation / E. E. Halda, S. Ohara // SPE Drilling Engineering. – 1991. – 6, № 3. – Р. 189–185. DOI: 10.2118/19130-PA

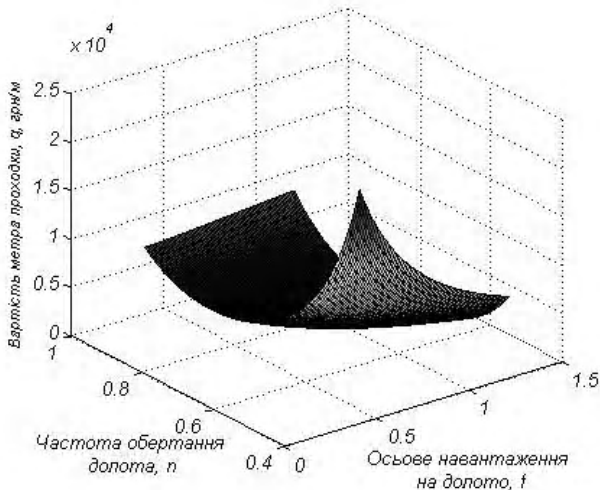


Рисунок 4 – Залежність вартості метра проходки від осьового навантаження на долото і частоти його обертання

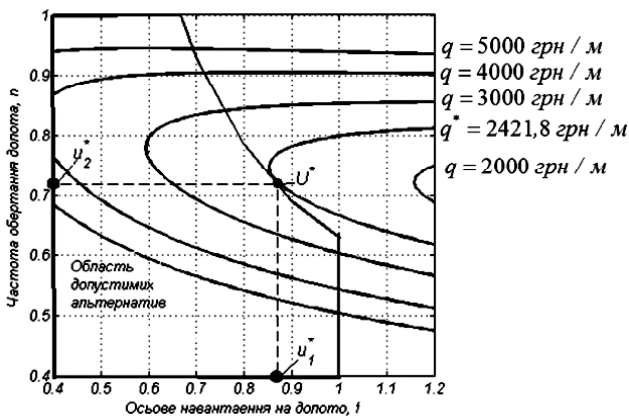


Рисунок 5 – Результат роботи генетичного алгоритму

5. «High Tech» upgrades provide new tools for the drilling // *Petroleum Engineer, International*. – 1996. – 69, № 9. – P. 7–10.
6. Galle E. M. Optimization des Parametres de Forage / E. M. Galle, H. B. Woods // *Revue de l'Institut Francias de Petrole*. – 1962. – № 2. – P. 195–212.
7. Горбійчук М. І. Прогнозування тривалості спуско-піднімальних операцій / М. І. Горбійчук, В. Б. Кропивницька // *Восточно-Европейский журнала передовых технологий*. – 2006. – № 2/2(20). – С. 37 – 40.
8. Орловский С. А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации : монография / С. А. Орловский. – М. : Наука, 1981. – 208 с.
9. Раскин Л. Г. Нечеткая математика. Основы теории. Приложения : монография / Л. Г. Раскин, О. В. Серая. – Харьков : Парус, 2008. – 352 с.
10. Горбійчук М. І. Оптимізація процесу поглиблення свердловин на засадах генетичних алгоритмів / М. І. Горбійчук, Гуменюк Т. В. // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2008. – № 5/3 (35). – С. 44–47.
11. Гилл Ф. Практическая оптимизация / Ф. Гилл, У. Мюррей, М. Райт ; пер. с англ. – М. : Мир, 1985. – 509 с.
12. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский ; пер. с польск. – М. : Горячая линия-Телеком, 2004. – 452 с.

Стаття надійшла до редакції 12.03.2015.

Після доробки 06.04.2015.

Горбійчук М. І.¹, Гуменюк Т. В.²

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

²Асистент кафедри комп'ютерних систем і мереж Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

НЕЧЕТКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УГЛУБЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ СКВАЖИН

При бурении глубоких скважин на нефть и газ важное значение имеет правильный выбор управляющих воздействий – осевой нагрузки на долото и частоты его вращения с целью получения минимального значения стоимости проходки. Решение поставленной задачи предполагает создание адекватной математической модели процесса углубления скважин и разработки методов идентификации ее параметров. Сложность задачи в том, что процесс механического бурения является стохастическим, нестационарным и развивающимся во времени. Это значительно затрудняет определение традиционными методами идентификации целого ряда параметров, влияющих на процесс разрушения породы. К таким параметрам можно отнести и продолжительность спуско-подъемных операций, на значения которых влияют не только технологические, технические, но и субъективные факторы. Для адекватного воспроизведения неопределенности значения продолжительности спуско-подъемных операций, их предложено рассматривать как нечеткие величины с определенной функцией принадлежности. Исходя из этой предпосылки, была сформулирована задача нечеткой оптимизации процесса углубления скважины и разработали метод ее решения. Эффективность разработанного метода подтверждена на конкретных промышленных данных.

Ключевые слова: бурение, критерий оптимальности, стоимость, проходка, управление, функция принадлежности, генетический алгоритм.

Horbiiuchuk M. I.¹, Gumenyuk T. V.²

¹Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computer Systems and Networks Department of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

²Assistant of Computer Systems and Networks Department of Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

FUZZY OPTIMIZATION PROCESS OF DEEPENING DEEP WELLS

In the process of drilling deep wells for oil and gas it is important to make the correct choice of management influences – axial load on the bore bit and rotation frequency to obtain minimum cost of boring. Solving this problem involves the creation of an adequate mathematical model of the process of deepening wells and development of the methods for the identification of its parameters. The complexity of the problem is that the mechanical drilling process is stochastic, transient and is developing over time. This greatly complicates the determination of traditional methods of identification of a number of parameters that affect the process of the rock breaking. These parameters include the duration of descent-lifting operations, the values of which are affected not only by technological, technical, but also by subjective factors. For adequate reproduction of descent-lifting operations duration values uncertainty, they we proposed to consider them as fuzzy variables with certain membership functions. According to this premise, there was formulated the problem of fuzzy optimization of the deepening wells process and developed a method to solve it. The effectiveness of this method was confirmed on specific industrial data.

Keywords: drilling, optimality criterion, cost, boring, control, membership function, genetic algorithm.

REFERENCES

1. Horbiichuk M. I., Sementsov H. N. Optymizatsiia protsesu burinnia hlybokykh sverdlodyn: monohrafiia. Ivano-Frankivsk, Fakel, 2006, 493 p.
2. Dwigth Yoder, James Williams Computers in the drilling process, *Petrol Megan*, 1987, 9, No. 6, pp. 29–32.
3. Brazhnikov V. A., Furne' A. A. Informacionnoe obespechenie optimal'nogo upravleniya bureniem skvazhin. Moscow, Nedra, 1989, 208 p.
4. Halda E. E., Ohara S. Field verification of drilling models and computerized selection of drill, bit, WOB and drillstring rotation, *SPE Drilling Engineering*, 1991, 6, No. 3, pp. 189–185. DOI: 10.2118/19130-PA
5. «High Tech» upgrades provide new tools for the drilling, *Petroleum Engineer, International*, 1996, 69, No. 9, pp. 7–10.
6. Galle E. M., Woods H. B. Optimization des Parametres de Forage, *Revue de l'Institut Francias de Petrole*, 1962, No. 2, pp. 195–212.
7. Horbiichuk M. I., Kropyvnytska V. B. Prohnozuvannia tryvalosti spusko-pidnimalnykh operatsii, *Vostochno-Evropeiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, 2006, No. 2/2(20), pp. 37–40.
8. Orlovskij S. A. Problemy prinyatiya reshenij pri nechetkoj ishodnoj informacii : monografiya. Moscow, Nauka, 1981, 208 p.
9. Raskin L. G., Seraya O. V. Nechetkaya matematika. Osnovy teorii. Prilozheniya: monografiya. Xar'kov, Parus, 2008, 352 p.
10. Horbiichuk M. I., Humeniuk T. V. Optymizatsiia protsesu pohlyblennia sverdlodyn na zasadakh henetychnykh alhorytmiv, *Vostochno-evroneiskiy zhurnal peredovykh tekhnolohyi*, 2008, No. 5/3 (35), pp. 44–47.
11. Gill F., Myurrej U., Rajt M.; per. s angl. Prakticheskaya optimizaciya. Moscow, Mir, 1985, 509 p.
12. Rutkovskaya D., Pilin'skij M., Rutkovskij L.; per. s pol'sk. Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy. Moscow, Goryachaya liniya-Telekom, 2004, 452 p.

ИНТЕРВАЛЬНАЯ ПРОИЗВОДНАЯ И ИНТЕРВАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ ИСЧИСЛЕНИЕ

Рассмотрена проблема возможного обобщения классического дифференциального исчисления на функции с интервальной неопределенностью параметров. В связи с этим рассмотрены различные виды неопределенности параметров функций и возможные математические подходы изучению таких функций. Подробно изложен аппарат интервальной математики, применяемый для изучения функций с интервальной неопределенностью параметров. Понятие интервальной производной вводится по аналогии с понятием классической производной для полностью определенной функции путем предельного перехода. Доказана теорема существования интервальной производной. Также доказана теорема о представлении интервальной производной через исходную функцию. Введены интервальные производные высших порядков, доказана теорема существования таких производных и теорема, позволяющая представлять производные любого порядка через исходную функцию. Выведено явное выражение интервальной производной любого n -го порядка в виде интервала, нижняя и верхняя граница которого выражаются через аналогичные границы исходной интервальной функции. Приведен пример применения интервальной производной в экономике.

Ключевые слова: интервал, интервальная функция, интервальная производная, интервально-дифференциальное исчисление.

НОМЕНКЛАТУРА

a, a_i, b, b_i – вещественные числа;

x_i, x_{ij} – вещественные независимые переменные;

y_i, y_{ij} – вещественные зависимые переменные;

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

$\tilde{x} = [x_1, x_2]$ – интервальная независимая переменная;

$\tilde{y} = [y_1, y_2]$ – интервальная независимая переменная;

$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ – интервальная функция;

$\tilde{y}' = \tilde{f}'(\tilde{x})$ – первая производная от интервальной

функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$;

$\tilde{y}'' = \tilde{f}''(\tilde{x}), \tilde{y}''' = \tilde{f}'''(\tilde{x}), \dots$ – 2-я, 3-я и последующие

производные от функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$;

$\tilde{y}'_{x_0} = \tilde{f}'_{x_0}(\tilde{x}), \tilde{y}''_{x_0} = \tilde{f}''_{x_0}(\tilde{x}), \dots$ – значения производных соответствующего порядка в точке \tilde{x}_0 ;

y'_x – производная от функции $y = f(x)$ по переменной x .

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и исследование свойств разнообразных систем обычно опирается на тот или иной подходящий математический аппарат. К настоящему времени создано большое число различных видов математического аппарата. Однако при всем их различии почти все они обладают одним общим свойством – применимостью только к полностью определенным (детерминированным) системам.

В то же время встречающиеся на практике системы обычно характеризуются той или иной степенью неопределенности (иначе говоря, они недетерминированы). С целью построения и исследования таких систем чаще всего применяют математический аппарат теории вероятностей [1], теории нечетких множеств [2], интервальной математики [3].

В настоящей работе впервые предлагается новый математический аппарат для исследования недетерминированных систем – недетерминистское дифференци-

альное исчисление. Этот аппарат, в отличие от трех названных выше, нацеленных, в основном, на исследование статических систем, применим также и к изучению динамических систем. Применительно к динамическим системам с неопределенностью он играет ту же роль, которую по отношению к детерминированным динамическим системам играет классическое дифференциальное исчисление.

1 ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Пусть $y = f(x)$ – некоторая полностью определенная функция, устанавливающая зависимость одной переменной y от другой x .

Тогда, как известно из классического дифференциального исчисления, для этой функции с помощью предельного перехода можно ввести производную функцию $y' = f'(x)$, которая имеет смысл скорости, с которой зависимая переменная y функции f изменяется относительно ее независимой переменной x .

Пусть теперь $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ – некоторая неположительно определенная интервальная функция, устанавливающая зависимость интервальной переменной $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ от интервальной переменной $\tilde{x} = [x_1, x_2]$.

Проблема заключается в том, чтобы определить некоторую новую неположительно определенную интервальную функцию $\tilde{y}' = \tilde{f}'(\tilde{x})$, которая по смыслу аналогична классической производной, т.е. показывает скорость, с которой зависимая переменная \tilde{y} изменяется относительно ее независимой переменной \tilde{x} . Необходимо также изучить свойства и методы вычисления этой новой, неклассической производной.

2 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Мы будем использовать в качестве вспомогательных сведений прежде всего основные математические сведения из алгебры интервальных чисел [3, 4]. В этой алгебре в качестве операндов берутся замкнутые вещественные интервалы, определяемые как множества всех

вещественных чисел между нижней и верхней границами интервала, включая сами эти границы

$$\tilde{a} \equiv [a_1, a_2] \equiv \{a \mid a_1 \leq a \leq a_2\}. \quad (1)$$

Эти операнды естественно называть интервальными числами. Операции \circ над интервальными числами $\tilde{a} = [a_1, a_2]$, $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ вводятся как прямые теоретико-множественные обобщения соответствующих операций над вещественными числами a, b , т.е.

$$\tilde{a} \circ \tilde{b} = \{a \circ b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \quad (2)$$

Таким образом, основные алгебраические операции над интервальными числами определяются следующими формулами

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &= \{a + b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, & \tilde{a} - \tilde{b} &= \{a - b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \\ k \cdot \tilde{a} &= \{k \cdot a \mid a \in \tilde{a}\}, \\ \tilde{a} \cdot \tilde{b} &= \{a \cdot b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, & \tilde{a} / \tilde{b} &= \{a / b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \end{aligned} \quad (3)$$

На основе определений (3) операций над интервальными числами можно вывести следующие формулы для вычисления результатов этих операций [3]

$$\begin{aligned} \tilde{a} + \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] + [b_1, b_2] = [a_1 + b_1, a_2 + b_2], \\ \tilde{a} - \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] - [b_1, b_2] = [a_1 - b_2, a_2 - b_1], \\ k \cdot \tilde{a} &\equiv k \cdot [a_1, a_2] = \begin{cases} [ka_1, ka_2], & k > 0, \\ [ka_2, ka_1], & k < 0, \end{cases} \\ \tilde{a} \cdot \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] \cdot [b_1, b_2] = [\min_{i,j} (a_i \cdot b_j), \max_{i,j} (a_i \cdot b_j)], \\ \tilde{a} / \tilde{b} &\equiv [a_1, a_2] / [b_1, b_2] = [a_1, a_2] \cdot [1/b_2, 1/b_1]. \end{aligned} \quad (4)$$

Также в качестве вспомогательного нам потребуется понятие интервальной функции [5], которая вводится как однозначное отображение множества замкнутых вещественных интервалов $\{\tilde{x}\}$, $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ вида (1) на множество замкнутых вещественных интервалов $\{\tilde{y}\}$, $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ этого же типа. Символически интервальная функция записывается в виде

$$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}), \quad (5)$$

где, аналогично числовым функциям, \tilde{x} называется интервальной независимой переменной (интервальным аргументом), \tilde{y} – интервальной зависимой переменной, \tilde{f} – интервальной функцией.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Введем понятие предела интервальной функции (5). Рассмотрим независимую переменную $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ этой функции. Будем говорить, что переменная \tilde{x} в процессе своего изменения неограниченно приближается к некоторому предельному интервалу $\tilde{x}_0 = [x_{01}, x_{02}]$, если в указанном процессе x_1 неограниченно приближается к x_{01} , а x_2 неограниченно приближается к x_{02} . Символически неограниченное приближение \tilde{x} к \tilde{x}_0 показывается как $(\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0) \equiv (x_1 \rightarrow x_{01}, x_2 \rightarrow x_{02}) \equiv (\lim x_1 = x_{01}, \lim x_2 = x_{02})$. (6)

Совершенно аналогично независимой переменной \tilde{x} зависимая переменная \tilde{y} интервальной функции (5) в процессе своего изменения может неограниченно приближаться к некоторому предельному интервалу $\tilde{y}_0 = [y_{01}, y_{02}]$, т.е.

$$(\tilde{y} \rightarrow \tilde{y}_0) \equiv (y_1 \rightarrow y_{01}, y_2 \rightarrow y_{02}). \quad (7)$$

При этом, если неограниченное приближение зависимой переменной \tilde{y} интервальной функции (5) к \tilde{y}_0 вызвано неограниченным приближением независимой переменной \tilde{x} этой функции к \tilde{x}_0 , будем говорить, что предел интервальной функции (5) при \tilde{x} , стремящемся к \tilde{x}_0 , равен интервалу \tilde{y}_0 . Символически это записывается в виде

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{y} = \tilde{y}_0 \quad \text{или, по-другому,} \quad \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{f}(\tilde{x}) = \tilde{y}_0. \quad (8)$$

Если интервальная функция (5) непрерывная, т.е. как нижняя, так и верхняя границы интервала \tilde{y} (зависимой переменной) являются непрерывными функциями нижней и верхней границ интервала \tilde{x} (независимой переменной), то предел функции (5) равен значению функции от предельного значения аргумента, или, в символической записи,

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \tilde{f}(\tilde{x}) = \tilde{f}(\tilde{x}_0). \quad (9)$$

Теперь мы можем ввести понятие интервальной производной функции. Рассмотрим произвольную интервальную функцию (5). Будем считать ее непрерывной. Зафиксируем некоторое значение $\tilde{x}_0 = [x_{01}, x_{02}]$ независимой переменной. Этому значению, в силу непрерывности нашей функции, будет соответствовать некоторое фиксированное значение функции $\tilde{y}_0 = \tilde{f}(\tilde{x}_0)$.

Определим теперь приращения независимой и зависимой переменных нашей функции относительно их указанных фиксированных значений

$$\Delta \tilde{x} = \tilde{x} - \tilde{x}_0, \quad \Delta \tilde{y} = \tilde{y} - \tilde{y}_0 = \tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0) \quad (10)$$

и составим отношение второго приращения к первому

$$\frac{\Delta \tilde{y}}{\Delta \tilde{x}} = \frac{\tilde{y} - \tilde{y}_0}{\tilde{x} - \tilde{x}_0} = \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)}{\tilde{x} - \tilde{x}_0}. \quad (11)$$

Возьмем предел отношения (11) при неограниченном приближении независимой переменной \tilde{x} к ее фиксированному значению \tilde{x}_0 :

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \frac{\Delta \tilde{y}}{\Delta \tilde{x}}. \quad (12)$$

Предел (12), если он существует, будем называть производной интервальной функцией от исходной интервальной функции (5) в точке \tilde{x}_0 или, коротко, интервальной производной от функции (5) и обозначать $\tilde{y}'_{\tilde{x}_0}$ или $\tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x})$. Таким образом,

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}_0} = \tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x}) = \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \frac{\Delta \tilde{y}}{\Delta \tilde{x}}. \quad (13)$$

Условие существования интервальной производной интервальной функции определяется следующей теоремой.

Теорема 1. Для того чтобы в точке \tilde{x}_0 существовала интервальная производная от интервальной функции (5), определяемая формулами (10)–(13), необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности этой точки, включая ее саму, все значения независимой переменной \tilde{x} функции были невырожденными интервалами (т. е. интервалами с несовпадающими верхней и нижней границами).

Доказательство. Из выражения (11) интервальной функции, предел которой есть интервальная производная в точке \tilde{x}_0 , видно, что эта производная существует только тогда, когда в некоторой окрестности указанной точки, включая ее саму, все возможные значения знаменателя выражения (11) не равны нулю. Но знаменатель выражения (11), согласно формуле (4) разности интервалов, равен интервалу $\tilde{x} - \tilde{x}_0 = [x_1, x_2] - [x_{01}, x_{02}] = [x_1 - x_{02}, x_2 - x_{01}]$.

Правый интервал равен нулю (нулевому интервалу $[0, 0]$) только при условии $x_1 = x_{02}$, $x_2 = x_{01}$, равносильном следующему $x_1 = x_{01} = x_2 = x_{02}$ или $\tilde{x} = \tilde{x}_0 = [x, x]$, что означает вырожденность интервалов \tilde{x}, \tilde{x}_0 .

Ввиду произвольности выбранной точки \tilde{x}_0 , последнее означает, что для существования интервальной производной в точке \tilde{x}_0 необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности этой точки, включая ее саму, все возможные значения независимой переменной функции \tilde{x} были невырождены. Что и требовалось доказать.

Интервальная производная от интервальной функции (5), определяемая для произвольной точки \tilde{x}_0 формулами (10)–(12) в виде предела, может быть выражена также в конечном виде через значения независимой \tilde{x} и зависимой $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ переменных этой функции в указанной точке. Именно, справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Интервальная производная от непрерывной интервальной функции (5), определяемая для произвольной точки \tilde{x}_0 формулами (10)–(13) в виде предела, может быть выражена в конечном виде через значения независимой \tilde{x} и зависимой $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ переменных этой функции в указанной точке следующим образом

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}_0} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{f}(\tilde{x}_0) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)}{\tilde{x}_0 - \tilde{x}_0}. \quad (14)$$

Примечание 1. При первом взгляде выражение (14) может показаться неопределенностью вида $0/0$. Но это впечатление неверно, поскольку, согласно теореме 1, у любой существующей в точке \tilde{x}_0 интервальной производной интервал \tilde{x}_0 невырожден и потому, в соответствии с формулой (4) для разности интервалов, разность $\tilde{x}_0 - \tilde{x}_0$ не равна нулю (нулевому интервалу $[0, 0]$). Точно также не равна нулю разность $\tilde{f}(\tilde{x}_0) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)$.

Доказательство. Согласно определению интервальной производной в точке \tilde{x}_0 (10)–(13) она может быть записана в виде предела

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}_0} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}_0}(\tilde{x}) = \lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)}{\tilde{x} - \tilde{x}_0}. \quad (15)$$

В процессе предельного перехода в правой части равенства (15) \tilde{x} неограниченно приближается к \tilde{x}_0 , а $\tilde{f}(\tilde{x})$, в силу непрерывности интервальной функции \tilde{f} к $\tilde{f}(\tilde{x}_0)$. Таким образом, предел в правой части (15) равен

$$\lim_{\tilde{x} \rightarrow \tilde{x}_0} \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)}{\tilde{x} - \tilde{x}_0} = \frac{\tilde{f}(\tilde{x}_0) - \tilde{f}(\tilde{x}_0)}{\tilde{x}_0 - \tilde{x}_0}. \quad (16)$$

Подставив полученное значение предела из равенства (16) в выражение (15), будем иметь формулу (14). Что и требовалось доказать.

Итак, выражение интервальной производной функции (14) представляет ее через исходную (первообразную) интервальную функцию (5). При этом, поскольку в (14) точка \tilde{x}_0 , в которой определяется производная, произвольна, выражение (14) можно записать в общем виде так:

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}}, \quad (17)$$

где \tilde{x} – произвольное значение независимой переменной непрерывной интервальной функции (5) из ее области определения, при котором интервальная производная этой функции существует.

Как видно из формулы (17), интервальная производная выражается непосредственно через исходную (первообразную) интервальную функцию простой алгебраической формой, что, конечно, упрощает процесс вычисления производной. Этот эффект отсутствует при нахождении обычных производных, фигурирующих в традиционном дифференциальном исчислении детерминированных функций [6].

Производная $\tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x})$ от интервальной функции $\tilde{f}(\tilde{x})$, введенная нами выше, также является интервальной функцией, притом зависящей от того же самого интервального аргумента \tilde{x} . Это позволяет продолжить процесс взятия интервальных производных функций, получив сначала вторую производную $\tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x})$ (производную от первой производной $\tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x})$)

$$\tilde{y}''_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = [\tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x})]_{\tilde{x}}, \quad (18)$$

затем третью производную $\tilde{f}'''_{\tilde{x}}(\tilde{x})$ (производную от второй производной $\tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x})$)

$$\tilde{y}'''_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'''_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = [\tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x})]_{\tilde{x}} \quad (19)$$

и т.д., вплоть до интервальной производной любого n -го порядка, определяемой как производная от производной $n-1$ порядка

$$\tilde{y}^{(n)}_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}^{(n)}_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = [\tilde{f}^{(n-1)}_{\tilde{x}}(\tilde{x})]_{\tilde{x}}. \quad (20)$$

Условие существования интервальной производной любого n -го порядка ($n=1,2,3,\dots$) определяется следующей теоремой.

Теорема 3. Для того чтобы в точке \tilde{x}_0 существовала интервальная производная n -го порядка ($n=1,2,3,\dots$) от интервальной функции (5), определяемая формулами

(13), (18)–(20), необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности этой точки, включая ее саму, все значения независимой переменной \tilde{x} функции были невырожденными интервалами.

Доказательство. По теореме 1, для существования в точке \tilde{x}_0 производной 1-го порядка от функции (5) необходимо и достаточно невырожденности всех интервалов, служащих значениями независимой переменной \tilde{x} этой функции в некоторой окрестности точки \tilde{x}_0 . Но производная 1-го порядка от функции (5) имеет ту же независимую переменную \tilde{x} , что и сама функция. Поэтому, согласно теореме 1, для существования в точке \tilde{x}_0 производной от производной 1-го порядка функции (5) (т.е. производной 2-го порядка от интервальной функции (5)) необходимо и достаточно выполнения того же условия, что и для существования в точке \tilde{x}_0 производной 1-го порядка от функции (5), т.е. невырожденности всех интервалов, являющихся значениями \tilde{x} функции (5) в некоторой окрестности точки \tilde{x}_0 . Продолжая рассуждения, приходим к необходимым и достаточным условиям существования в точке \tilde{x}_0 производной n -го порядка от функции (5) в той форме, в которой они даны в теореме 3. Что и требовалось доказать.

Интервальная производная любого n -го порядка ($n = 2, 3, \dots$) от интервальной функции (5), определяемая формулами (18)–(20) итеративно, может быть выражена в конечном виде, аналогично (17) интервальной производной 1-го порядка. Это основано на следующей теореме.

Теорема 4. Интервальная производная n -го порядка ($n = 2, 3, \dots$) от интервальной функции (5) может быть выражена в конечном виде через интервальную производную $(n-1)$ -го порядка от этой функции (если она непрерывная) и независимую переменную \tilde{x} в следующем виде

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n)}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n-1)}(\tilde{x}) - \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n-1)}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}}, n = 2, 3, \dots \quad (21)$$

Доказательство теоремы получается с помощью формулы (17), если подставить в нее в качестве функции $\tilde{f}(\tilde{x})$ производную $(n-1)$ -го порядка $\tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n-1)}(\tilde{x})$ и учесть еще, что производная 1-го порядка от $\tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n-1)}(\tilde{x})$ согласно определению (20) есть производная n -го порядка $\tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n)}(\tilde{x})$.

С помощью теорем 2 и 4 можно последовательно получить конечные выражения для интервальной производной 2-го порядка

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}'' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}''(\tilde{x}) = \frac{\tilde{f}_{\tilde{x}}'(\tilde{x}) - \tilde{f}_{\tilde{x}}'(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}} = \frac{\frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}} - \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}}}{\tilde{x} - \tilde{x}}; \quad (22)$$

для интервальной производной 3-го порядка

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}''' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}'''(\tilde{x}) = \frac{\tilde{f}_{\tilde{x}}''(\tilde{x}) - \tilde{f}_{\tilde{x}}''(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}} = \frac{\frac{\frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}} - \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}}}{\tilde{x} - \tilde{x}} - \frac{\frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}} - \frac{\tilde{f}(\tilde{x}) - \tilde{f}(\tilde{x})}{\tilde{x} - \tilde{x}}}{\tilde{x} - \tilde{x}}}{\tilde{x} - \tilde{x}} \quad (23)$$

и т.д. Отметим, что все эти выражения аналогичны конечному выражению (17) для интервальной производной 1-го порядка.

Примечание 2. Выражения (22), (23),... интервальных производных высших порядков кажутся с первого взгляда суперпозициями неопределенностей вида $0/0$, однако, по причине, указанной в примечании 1, не являются таковыми. Заметим также, что эти выражения не могут быть преобразованы к более простому виду с помощью эквивалентных преобразований, поскольку в алгебре интервальных чисел [3] не выполняются эквивалентности типа

$$(\tilde{a} \pm \tilde{b})\tilde{c} = \tilde{a}\tilde{c} \pm \tilde{b}\tilde{c}; \quad \frac{\tilde{a} \pm \tilde{b}}{\tilde{c}} = \frac{\tilde{a}}{\tilde{c}} \pm \frac{\tilde{b}}{\tilde{c}}. \quad (24)$$

4 РЕЗУЛЬТАТЫ

Доказанные выше выражения интервальных производных (17)–(23) являются аналитическими выражениями, имеющими вид суперпозиций операций над интервальными переменными. Эти выражения удобны для теоретического изучения интервальных производных. Что касается вычисления таких производных, то использование здесь выражений (17)–(23) оказывается неудобным, поскольку оно предполагает объемную работу с весьма громоздкими формулами интервальной математики (4), которые и позволяют выразить в конце концов интервальную производную в виде интервального числа с явно выраженными в числовой форме нижней и верхней границами. Однако гораздо удобнее вычислять интервальные производные по формулам, выражающим сразу в явном виде нижнюю и верхнюю границы интервального числа, служащего значением интервальной производной. Эти формулы выводятся ниже.

Теорема 5. Интервальная производная первого порядка от непрерывной интервальной функции (5), выражаемая для произвольной точки \tilde{x} формулой (17) в виде суперпозиции операций над интервальными переменными, может быть также представлена явно в виде интервала, нижняя и верхняя границы которого выражены через нижнюю и верхнюю границы интервальных независимой $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ и зависимой $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ переменных функции в точке \tilde{x} в виде

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}'(\tilde{x}) = \left[-\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right]. \quad (25)$$

Доказательство. Будем исходить из выражения интервальной производной от интервальной функции (5) формулой (17). Представим указанную функцию в явном виде интервала

$$\tilde{f}(\tilde{x}) = [f_1(\tilde{x}), f_2(\tilde{x})] \equiv [y_1, y_2] \equiv \tilde{y}. \quad (26)$$

$$y_1 = f_1(\tilde{x}), \quad y_2 = f_2(\tilde{x}) \quad (27)$$

есть соответственно нижняя и верхняя границы интервальной зависимой переменной функции (5). Аналогично представим интервальную независимую переменную \tilde{x} :

$$\tilde{x} = [x_1, x_2]. \quad (28)$$

После проведения необходимых подстановок выражение (17) интервальной производной от интервальной функции (5) примет вид

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \frac{\tilde{y} - \tilde{y}}{\tilde{x} - \tilde{x}} = \frac{[y_1, y_2] - [y_1, y_2]}{[x_1, x_2] - [x_1, x_2]}. \quad (29)$$

Разности интервалов в числителе и знаменателе выражения (29) по формуле (4) представим в виде интервального числа

$$\begin{aligned} [y_1, y_2] - [y_1, y_2] &= [y_1 - y_2, y_2 - y_1], \\ [x_1, x_2] - [x_1, x_2] &= [x_1 - x_2, x_2 - x_1]. \end{aligned} \quad (30)$$

Подставив выражения (30) в (29), получим представление интервальной производной в виде частного двух интервалов

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \frac{[y_1 - y_2, y_2 - y_1]}{[x_1 - x_2, x_2 - x_1]}. \quad (31)$$

В свою очередь, выражение (31) можно, согласно формуле (4), представить в виде следующего произведения двух интервалов

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = [y_1 - y_2, y_2 - y_1] \cdot [1/(x_2 - x_1), 1/(x_1 - x_2)]. \quad (32)$$

Перемножая интервалы в правой части (32) по соответствующему правилу (4), получим

$$\begin{aligned} \tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) &= \left[\min \left(\frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}, \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \right), \right. \\ &\left. \max \left(\frac{y_1 - y_2}{x_2 - x_1}, \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (33)$$

Одинаково подчеркнутые члены в выражении (33) равны. Оставив из каждых двух равных членов по одному, представим выражение (33) в более простом виде

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[\min \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \right), \max \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2} \right) \right]. \quad (34)$$

Два члена в круглых скобках формулы (34) различаются лишь знаком, причем (с учетом того, что $x_2 > x_1, y_2 > y_1$) левый член положителен, а правый – отрицателен. Таким образом, из (34) получается следующее простейшее выражение интервальной производной первого порядка от интервальной функции вида (5)

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[\frac{y_2 - y_1}{x_1 - x_2}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right]. \quad (35)$$

С учетом того, что $x_1 - x_2 = -(x_2 - x_1)$, выражение (35) окончательно переписывается в виде

$$\tilde{y}'_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[-\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right], \quad (36)$$

что и требовалось доказать.

Аналогичное (25) явное выражение интервальной производной функции, дающее сразу в явном виде нижнюю и верхнюю границы интервального числа – значения этой функции – справедливо и для производных высших порядков. Это выражение приведено ниже.

Теорема 6. Интервальная производная любого n -го ($n = 2, 3, \dots$) порядка от непрерывной интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ вида (5), выражаемая для произвольной точки \tilde{x} формулой (21) в виде суперпозиции операций над интервальными переменными, может быть представлена в данной точке также в явном виде интервала, нижняя и верхняя границы которого выражены через нижнюю и верхнюю границы интервальных независимой переменной $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ и промежуточной переменной – производной $(n-1)$ -го порядка $\tilde{y}^{(n-1)} = [y_1^{(n-1)}, y_2^{(n-1)}]$ от интервальной функции (5) следующим образом

$$\tilde{y}^{(n)}_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}^{(n)}_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[-\frac{y_2^{(n-1)} - y_1^{(n-1)}}{x_2 - x_1}, \frac{y_2^{(n-1)} - y_1^{(n-1)}}{x_2 - x_1} \right]. \quad (37)$$

Доказательство теоремы 6 аналогично доказательству теоремы 5, с той разницей, что в качестве исходного выражения искомой интервальной производной n -го порядка от интервальной функции (5) берется формула (21), тогда как в случае теоремы 5 исходным выражением искомой интервальной производной 1-го порядка от функции (5) служит такая же по форме формула (17).

Используя формулу (37), легко получить простые явные выражения типа (25) для интервальных производных 2-го, 3-го и т.д. порядка от интервальной функции (5). Действительно, для интервальной производной 2-го порядка из (37) имеем

$$\tilde{y}''_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[-\frac{y'_2 - y'_1}{x_2 - x_1}, \frac{y'_2 - y'_1}{x_2 - x_1} \right]. \quad (38)$$

Подставляя в соотношении (38) значения нижней и верхней границ интервальной производной 1-го порядка из (25) в виде

$$y'_1 = -\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad y'_2 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \quad (39)$$

с учетом необходимых эквивалентных преобразований, получим

$$\tilde{y}''_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}''_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[-\frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2}, \frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2} \right]. \quad (40)$$

Аналогично, для интервальной производной 3-го порядка из (37) имеем

$$\tilde{y}'''_{\tilde{x}} \equiv \tilde{f}'''_{\tilde{x}}(\tilde{x}) = \left[-\frac{y''_2 - y''_1}{x_2 - x_1}, \frac{y''_2 - y''_1}{x_2 - x_1} \right]. \quad (41)$$

Как и в предыдущем случае, подставляя в формулу (41) значения границ интервальной производной 2-го порядка из (40) в виде

$$y''_1 = -\frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2}, \quad y''_2 = \frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2}, \quad (42)$$

будем, после необходимых эквивалентных преобразований, иметь

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}''' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}'''(\tilde{x}) = \left[-\frac{4(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^3}, \frac{4(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^3} \right]. \quad (43)$$

Продолжая этот процесс для интервальных производных 4-го, 5-го и последующих порядков, приходим к следующему общему результату, приведенному в табл. 1.

Теорема 7. Интервальная производная любого n -го ($n = 2, 3, \dots$) порядка от непрерывной интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ вида (5), выражаемая для произвольной точки \tilde{x} формулой (21) в виде суперпозиции операций над интервальными переменными, может быть представлена в указанной точке также в явном виде интервала с явно выраженными нижней и верхней границами вида (25), (40), (43)

$$\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n)}(\tilde{x}) = \left[-\frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n}, \frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n} \right]. \quad (44)$$

Здесь x_1, x_2 – нижняя и верхняя границы интервальной независимой переменной $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ в точке взятия производной от функции $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$, а y_1, y_2 – нижняя и верхняя границы интервальной зависимой переменной $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ этой функции в той же точке.

Сводка полученных явных выражений интервальных производных функций различных порядков приведена в табл. 1.

5 ОБСУЖДЕНИЕ

Предложенный в настоящей работе математический аппарат недетерминистского дифференциального исчисления может быть успешно применен к построению и количественному изучению свойств различных недетерминированных систем динамического типа, т.е. систем, количественные характеристики которых известны с той или иной степенью неопределенности и вдобавок изменяются во времени. Такие системы широко распространены в экономике, социологии и экологии. Они также встречаются в технике и технологиях.

Методика применения указанного математического аппарата к названным системам основана на предполо-

жении о том, что все параметры изучаемой системы определяются с точностью до интервалов возможных значений. При этом статические звенья характеризуются постоянными интервалами возможных значений их параметров, а динамические звенья – переменными интервалами этих значений.

В соответствии с этим для построения действующей математической модели изучаемой недетерминированной системы и последующего математического моделирования этой системы нужно:

1) взять (построить) математическую модель идеального (детерминированного) прообраза системы, которая получается в предположении, что все параметры системы заданы точно, соответственно чему статические звенья системы имеют постоянные точечные значения параметров, а динамические звенья – переменные точечные значения параметров; таким образом, в этой модели изучаемые характеристики системы принимают точечные постоянные и переменные значения и могут быть представлены в виде суперпозиции обычных алгебраических операций над точно известными постоянными и переменными значениями параметров звеньев системы;

2) заменить в полученной на шаге 1 математической модели точечные значения параметров соответствующими интервалами возможных значений данных параметров; обычные производные в исходной детерминированной системе заменяются соответствующими интервальными производными, в результате получаем математическую модель собственно изучаемой системы, все параметры которой определяются с точностью до интервалов возможных значений; в этой модели изучаемые характеристики системы принимают интервальные значения и могут быть представлены в виде суперпозиции интервальных операций (3) над интервалами – значениями параметров звеньев системы;

3) используя соотношения (4), выражающие результаты элементарных преобразований интервалов, представляем интервальнозначные характеристики недетерминированной системы в явной форме интервала $\tilde{F} = [f_1, f_2]$, нижняя f_1 и верхняя f_2 границы которого являются обычными (детерминированными) функциями от нижних и верхних границ интервалов – параметров звеньев системы.

Таблица 1 – Интервальные производные

Функция	Обозначение функции	Явное выражение функции
Исходная интервальная функция	$\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x}), \tilde{x} = [x_1, x_2], \tilde{y} = [y_1, y_2]$	$[y_1, y_2] = \tilde{f}[x_1, x_2]$ или $[y_1, y_2] = [f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)]$
Интервальная производная функция 1-го порядка	$\tilde{y}_{\tilde{x}}' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}'(\tilde{x})$ или $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(1)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(1)}(\tilde{x})$	$\left[-\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right]$
Интервальная производная функция 2-го порядка	$\tilde{y}_{\tilde{x}}'' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}''(\tilde{x})$ или $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(2)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(2)}(\tilde{x})$	$\left[-\frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2}, \frac{2(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^2} \right]$
Интервальная производная функция 3-го порядка	$\tilde{y}_{\tilde{x}}''' \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}'''(\tilde{x})$ или $\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(3)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(3)}(\tilde{x})$	$\left[-\frac{4(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^3}, \frac{4(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^3} \right]$
...
Интервальная производная функция n -го порядка	$\tilde{y}_{\tilde{x}}^{(n)} \equiv \tilde{f}_{\tilde{x}}^{(n)}(\tilde{x})$	$\left[-\frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n}, \frac{2^{n-1}(y_2 - y_1)}{(x_2 - x_1)^n} \right]$

После этого математическое моделирование изучаемой недетерминированной системы по любой ее интервальной характеристике $\tilde{F}=[f_1, f_2]$ сводится к анализу двух обычных детерминированных функций f_1, f_2 .

Пример. Рассмотрим простейшее применение предложенного математического аппарата в экономике. Пусть $y = f(x)$ – некоторая детерминированная функция, показывающая зависимость одного экономического показателя y от другого x [7]. Тогда эластичностью $E_x(y)$ этой функции называется предел относительного приращения функции y к относительному приращению аргумента (независимой переменной) x при $\Delta x \rightarrow 0$, т.е.

$$E_x(y) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{y} / \frac{\Delta x}{x} \right) = \frac{x}{y} \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{x}{y} \cdot y'_x. \quad (45)$$

Эластичность функции показывает приближенно, на сколько процентов изменится значение функции $y = f(x)$ при изменении значения аргумента x на 1%. Например, если функция $y = f(x)$ показывает зависимость спроса y на товар от его цены x , то эластичность этой функции $E_x(y)$ есть коэффициент, приближенно показывающий, на сколько процентов изменится спрос на товар при изменении его цены на 1%. Аналогично, если функция $y = f(x)$ показывает зависимость издержек производства y от объема выпускаемой продукции x , то эластичность этой функции $E_x(y)$ показывает приближенно, на сколько процентов изменятся издержки производства при изменении объема выпускаемой продукции на 1%. Наконец, если изучаемая нами функция $y = f(x)$ есть зависимость себестоимости единицы продукции y от стоимости всей выпускаемой продукции x , то эластичность данной функции $E_x(y)$ показывает приближенно, на сколько процентов изменится себестоимость единицы продукции при изменении стоимости всей продукции на 1% и т.д.

Положим теперь, что (как это часто бывает на практике) независимая x и зависимая y переменные рассматриваемой экономической функции $y = f(x)$ определяются не точно, а с точностью до интервалов возможных значений. Тогда эта функция из детерминированной превращается в недетерминированную (интервальную) функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ вида (5), где $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ – независимая интервальная переменная (интервальный аргумент), а $\tilde{y} = [y_1, y_2]$ – зависимая интервальная переменная. Построим теперь математическую модель получившейся экономической системы, используя описанный выше трехшаговый алгоритм.

1) Исходная математическая модель идеальной (детерминированной) системы уже есть, она описывается функцией эластичности системы (45) с точными значениями переменных x и y .

2) Заменяем в математической модели, установленной на шаге 1, точные значения параметров x и y соответствующими интервалами их возможных значений $\tilde{x} = [x_1, x_2]$ и $\tilde{y} = [y_1, y_2]$, а детерминированную производную 1-го порядка y'_x – соответствующей интервальной

производной \tilde{y}'_x , явное выражение которой в виде интервала дается формулой (25). В результате получаем математическую модель искомой недетерминированной экономической системы – ее интервальную функцию эластичности – в виде следующей суперпозиции интервальных операций над интервалами – параметрами системы:

$$\tilde{E}_x(\tilde{y}) = \frac{\tilde{x}}{\tilde{y}} \cdot \tilde{y}'_x = \frac{[x_1, x_2]}{[y_1, y_2]} \cdot \left[-\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}, \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right]. \quad (46)$$

3) После вычисления выражения (46) по формулам (4) элементарных преобразований интервалов, с учетом положительности значений x_1, x_2, y_1, y_2 в экономических системах, получим окончательно следующую математическую модель искомой системы

$$\tilde{E}_x(\tilde{y}) = \left[-\frac{x_2(y_2 - y_1)}{y_1(x_2 - x_1)}, \frac{x_2(y_2 - y_1)}{y_1(x_2 - x_1)} \right]. \quad (47)$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье показана возможность обобщения классического дифференциального исчисления на случай недетерминированных функций, в которых переменные задаются с точностью до интервалов возможных значений.

Новое дифференциальное исчисление идейно близко к классическому дифференциальному исчислению, в частности, производная функция показывает скорость изменения первообразной функции относительно ее аргумента. Однако форма нового исчисления существенно иная. Главные отличия состоят в том, что:

– производная любого порядка является интервальной функцией, в которой все переменные имеют вид интервалов;

– производная любого порядка выражается в явном виде через значения независимой и зависимой переменных первообразной функции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей / Б. В. Гнеденко. – М.: Наука, 2004. – 451 с.
- Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений / Л. А. Заде. – М.: Мир, 1976. – 165 с.
- Алефельд Г. Введение в интервальные вычисления / Г. Алефельд, Ю. Херибергер. – М.: Мир, 1987. – 360 с.
- Левин В. И. Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности / В. И. Левин. – Пенза: Изд-во Пензенского технологического ин-та, 1999. – 64 с.
- Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации / В. И. Левин // Автоматика и вычислительная техника. – 2012. – № 4. – С. 157–163.
- Фихтенгольд Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1 / Фихтенгольд Г. М. – М.: Наука, 2005. – 680 с.
- Кремер Н. Ш. Высшая математика для экономистов / Н. Ш. Кремер [и др.]. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 471 с.
- Вошинин А. П. Оптимизация в условиях неопределенности / А. П. Вошинин, Г. Р. Сотиров. – М.: МЭИ, 1989. – 224 с.
- Ащепков Л. Т. Универсальные решения интервальных задач оптимизации и управления / Л. Т. Ащепков, Д. В. Давыдов. – М.: Наука, 2006. – 285 с.

10. Островский Г.М. Технические системы в условиях неопределенности / Г. М. Островский, Ю. Т. Волин. – М. : Бинум, 2008. – 350 с.

11. Левин В. И. Задача трех станков с неопределенными временами обработки / В. И. Левин // Автоматика и телемеханика. – 1996. – № 1. – С. 109–120.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014.

После доработки 03.04.2015.

Левин В. И.

Д-р техн. наук, профессор кафедры математики Пензенского государственного технологического университета, Пенза, Россия

ІНТЕРВАЛЬНА ПОХІДНА ТА ІНТЕРВАЛЬНО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНОГО ЧИСЛЕННЯ

Розглянуто проблему можливого узагальнення класичного диференціального числення на функції з інтервальною невизначеністю параметрів. У зв'язку з цим розглянуті різні види невизначеності параметрів функцій і можливі математичні підходи щодо вивчення таких функцій. Докладно викладено апарат інтервальної математики, застосований для вивчення функцій з інтервальною невизначеністю параметрів. Поняття інтервальної похідної вводиться за аналогією з поняттям класичної похідної для цілком визначеної функції шляхом граничного переходу. Доведено теорему існування інтервальної похідної. Також доведено теорему про подання інтервальної похідної через вихідну функцію. Уведені інтервальні похідні вищих порядків, доведена теорема існування таких похідних і теорема, що дозволяє подавати похідні будь-якого порядку через вихідну функцію. Виведено явний вираз інтервальної похідної кожного n -го порядку у вигляді інтервалу, нижня і верхня межі якого виражаються через аналогічні межі вихідної інтервальної функції. Наведено приклад застосування інтервальної похідної в економіці.

Ключові слова: інтервал, інтервальна функція, інтервальна похідна, інтервально-диференціальне числення.

Levin V. I.

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

THE INTERVAL DERIVATIVE AND INTERVAL-DIFFERENTIAL CALCULUS

The problem of the possible generalization of the classical differential calculus for functions with interval uncertainty of parameters is considered. In this regard, various types of uncertainty of function parameters and possible mathematical approaches to study of such functions are viewed. A detailed explanation of means of interval mathematics applied to study of functions with interval uncertainty of parameters is given. The concept of interval derivative is introduced by analogy with the classical notion of derivative of fully defined functions by passing to the limit. The theorem of existence of interval derivative is proved. Also we prove a theorem on representation of interval derivative through the original function. The interval derivatives of higher order are introduced and the theorem of existing of such derivatives is proved. Also we prove the theorem that allows us to represent derivatives of any high order through the original function. We derive an explicit expression for the interval derivative of any of order n as the interval the lower and upper limit of which are expressed in terms of boundaries of the original interval function. An example of use of interval derivative in the economy.

Keywords: interval, interval function, interval derivative, interval-differential calculus.

REFERENCES

1. Gnedenko B. V. Kurs teorii veroyatnostey. Moscow, Nauka, 2004, 451 p.
2. Zade L. A. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primeneniye k prinyatiyu priblizhennykh resheniy. Moscow, Mir, 1976, 165 p.
3. Alefeld G., Herberger Yu. Vvedeniye v intervalnye vychisleniya. Moscow, Mir, 1987, 360 p.
4. Levin V. I. Intervalnye metody optimizatsii sistem v usloviyakh neopredelennosti. Penza, Izd-vo Penzenskogo tehnologicheskogo in-ta, 1999, 64 p.
5. Levin V. I. Optimizatsiya v usloviyakh intervalnoy neopredelennosti. Metod determinizatsii, *Avtomatika i vychislitel'naya tehnika*, 2012, No. 4, pp. 157–163.
6. Fihngolc G. M. Kurs differentsialnogo i integralnogo ischisleniya. T. 1. Moscow, Nauka, 2005, 680 p.
7. Kremer N. Sh. Vysshaya matematika dlya ekonomistov. Moscow, UNITI, 2001, 471 p.
8. Voschinin A. P., Sotirov G. R. Optimizatsiya v usloviyakh neopredelennosti. Moscow, MEI, 1989, 224 p.
9. Aschepkov L. T., Davydov D. V. Universalnye resheniya intervalnykh zadach optimizatsii i upravleniya. Moscow, Nauka, 2006, 285 p.
10. Ostrovskiy G. M., Volin Yu. T. Tehnicheskie sistemy v usloviyakh neopredelennosti. Moscow, Binom, 2008, 350 p.
11. Levin V. I. Zadacha trekh stankov s neopredelennymi vremenami obrabotki, *Avtomatika i telemekhanika*, 1996, No. 1, pp. 109–120.

МОДЕЛЬ ТА ІНДИВІДУАЛЬНІ МЕТРИКИ ЯКОСТІ НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ

Проаналізовано відомі метрики наукових публікацій. Встановлено, що їх загальним недоліком є оцінювання статей на зовнішньому по відношенню до їхнього вмісту рівню, що не дозволяє явно судити про якість подання матеріалу статті. Метою даної роботи була розробка комплексу показників, які дозволяють характеризувати властивості наукових праць з точки зору їх структури, лексики та форми подання матеріалу, а також бібліографії. Визначено набір метрик, що дозволяють кількісно оцінювати індивідуальні властивості матеріалу і автоматизувати аналіз наукових публікацій. Запропонований набір містить показники статті: потенціал охоплення читачької аудиторії, структурованість, різноманітність географії, мов та видів джерел бібліографії, якість бібліографії, насиченість тексту посиланнями на джерела, число і цитованість рисунків і таблиць, ілюстрованість, обсяг і використання математичного апарату, ефективність аббревіатур, показники лексики статті (відповідність назви тексту, назви та авторської анотації, авторської анотації і тексту, ключових слів і анотації, ключових слів і назви, ключових слів і тексту, ключових і характеристичних слів, анотації та характеристичних слів, назви і характеристичних слів, УДК та лексики статті, опису таблиць та рисунків тексту, відповідності лексики абзаців, назв літературних джерел і тексту), самоцитовання авторами статті, якість авторського колективу, гібридні та інтегральні показники якості статті. Наведено приклади, що підтверджують практичну застосовність запропонованих показників.

Ключові слова: наукометрія, бібліометрія, якість, стаття, наукова робота, метрика, аналіз цитованості, важливість статті.

НОМЕНКЛАТУРА

IPP – Impact per Publication;
SNIP – Source normalized impact per paper;
SJR – SCImago Journal Rank;
УДК – Універсальна десятикова класифікація;
 $\alpha_1(i)$ – коефіцієнт наукового ступеня i -го автора;
 $\alpha_2(i)$ – коефіцієнт вченого звання i -го автора;
 $\alpha_3(i)$ – коефіцієнт посади i -го автора;
 $\alpha_4(i)$ – коефіцієнт рівня організації, де працює i -й автор;
 $\alpha_5(i)$ – сукупна кількість посилань на статті i -го автора у наукометричних і реферативних базах;
 $\alpha_5(i)$ – середній індекс Гірша i -го автора у наукометричних базах;
 a_i^{str} – функція, що повертає кількісну оцінку наявності i -го необхідного елемента у структурі j -ї статті;
abstract – словник авторської анотації j -ї статті;
abstractⁱ – словник i -ї анотації до j -ї статті;
abstract_i – i -те слово у словнику авторської анотації j -ї статті;
Area_j – обсяг, займаний виданою статтею у см²;
auditory(x) – функція, що повертає оцінку кількості людей, що володіють мовою x ;
aut_k – ідентифікатор k -го автора j -ї статті;
 b_1 – рік виходу j -ї статті;
 b_2 – кількість робіт авторів j -ї статті в у бібліографії до неї (самоцитовання);
 b_3 – найбільш ранній рік джерела у бібліографії до j -ї статті;
 b_4 – найпізніший рік джерела в бібліографії до j -ї статті;
Base – набір наукових праць;
cwrds – набір характеристичних слів j -ї статті;
cwrds_i – i -те слово з набору характеристичних слів j -ї статті;
el_{ji} – формальне позначення i -го елемента j -ї роботи;
eq – функція, що ідентифікує авторство статей;

figcap – словник тексту вмісту k -го рисунка і його підпису;

figcap_{k,i} – i -те слово в словнику тексту вмісту k -го рисунка і його підпису;

geo(ref_i) – функція, що повертає географічний ідентифікатор видавництва i -го посилання у списку бібліографії j -ї статті;

I_j^q – q -й показник якості j -ї статті;

keywords – словник авторських ключових слів j -ї статті;

keywords_i – i -те авторське ключове слово у словнику;

lang(ref_i) – функція, що повертає ідентифікатор мови i -го посилання у списку бібліографії j -ї статті;

lang(x) – функція, що повертає код мови словника x ;

maxcit – сума максимальних кількостей цитувань по всіх базах;

N – кількість статей;

N_a – кількість слів у словнику анотації j -ї статті;

N_{abr} – кількість аббревіатур (крім загальновідомих) без повторень, використуваних у j -ї статті;

N_{abst} – кількість анотацій у j -ї статті;

N_{aut} – кількість авторів j -ї статті;

N_{cwrds} – кількість характеристичних слів j -ї статті;

N_{dmsb} – кількість позначень змінних, констант, нестандартних функцій і операторів, використаних у формулах статті і розшифрованих у тексті статті;

N_{elj} – кількість елементів j -ї статті;

N_f – кількість нумерованих формул у тексті статті;

N_{fig} – кількість рисунків у статті;

N_{figcap_k} – кількість слів у словнику тексту вмісту k -го рисунка і його підпису;

N_{iss} – кількість статей, опублікованих у відповідному номері журналу;

N_{kw} – кількість авторських ключових слів у словнику *keywords*;

N_{msb} – кількість позначень змінних, констант, нестандартних функцій і операторів, використуваних у формулах статті;

N_n – кількість слів у словнику назви j -ї статті;
 N_{par_i} – кількість слів у словнику i -го абзацу;
 Nre_i – кількість разів, коли i -те джерело цитувалося у тексті j -ї статті окремо від інших джерел;
 $Nrec_i$ – кількість разів, коли i -те джерело цитувалося у тексті j -ї статті разом з іншими джерелами;
 N_{reris_i} – кількість посилань у тексті статті на i -й рисунок;
 N_{retabi} – кількість посилань у тексті статті на i -ту таблицю;
 N_{ref} – кількість джерел у бібліографії до j -ї статті;
 N_{ris} – кількість рисунків у статті;
 N_{rf_i} – кількість посилань на i -ту нумеровану формулу в тексті статті;
 $N_{sereris_i}$ – кількість посилань у тексті статті на i -й рисунок;
 $N_{seretabi}$ – кількість окремих посилань у тексті статті на i -ту таблицю;
 N_{serf_i} – кількість окремих посилань на i -ту нумеровану формулу у тексті статті;
 N_j – кількість слів у словнику тексту j -ї статті;
 N_{tab} – кількість таблиць у статті;
 N_{tabcap_k} – кількість слів у словнику тексту вмісту k -ї таблиці та її заголовка;
 N_{UDC} – кількість слів у словнику УДК;
 N_{wref} – кількість слів у списку слів з назв джерел у списку літератури;
 $paper_j$ – j -та наукова праця;
 par_i – словник i -го абзацу;
 par_{ip} – p -те слово словника i -го абзацу;
 $population$ – загальна чисельність населення Землі;
 Q – набір показників, що характеризують властивості статті;
 $reab_i$ – кількість використань i -ї аббревіатури в j -ї статті;
 $reaut_i$ – список ідентифікаторів авторів i -го джерела в бібліографії j -ї статті;
 ref – список слів з назв джерел у списку літератури j -ї статті;
 ref_i – i -те слово зі списку слів з назв джерел у списку літератури;
 sen – кількість речень у тексті j -ї статті;
 $senre$ – кількість речень у тексті j -ї статті, що містить посилання на джерела;
 $syn(v_p)$ – функція, що повертає список слів-синонімів для слова v_p , а також їхні переклади (з їхніми синонімами) на всі доступні мови;
 t – період часу;
 $tabcap$ – словник тексту вмісту k -ї таблиці та її заголовка;
 $tabcap_{k,i}$ – i -те слово в словнику тексту вмісту k -ї таблиці та її заголовка;
 $text$ – словник тексту статті;
 $text$ – словник тексту j -ї статті;
 $time$ – функція, що повертає рік, том, номер для статті-аргументу;
 $title$ – словник назви j -ї статті;
 $title_i$ – i -те слово у словнику $title$;
 $type(ref_i)$ – функція, що повертає тип i -го джерела бібліографії до j -ї статті;

UDC – словник текстових розшифровок наведених у j -ї статті індексів УДК;
 UDC_i – i -те слово зі словника текстових розшифровок УДК;
 v – словник;
 v_i – i -те слово у словнику v ;
 w_i^{str} – ваговий коефіцієнт, що характеризує важливість i -го елемента структури статті;
 $year_i$ – рік i -го джерела бібліографії до j -ї статті.

ВСТУП

Постійно зростаючий обсяг наукових публікацій робить практично неможливим їхній аналіз людьми вручну і, відповідно, викликає необхідність автоматизації аналізу властивостей наукових публікацій.

Державні структури (ут. ч. фонди, спеціалізовані вчені ради із захисту дисертацій, атестаційні органи), дослідницькі організації, а також приватні фонди, що фінансують дослідження, зацікавлені у використанні математичного забезпечення, що дозволяє аналізувати значимість як окремих публікацій, так і їхніх авторів, організацій авторів, видань, що у єдиній системі критеріїв дає можливість оцінити і порівняти різні дослідження і дослідників, не затрачаючи значних засобів і часу на проведення їхньої спеціальної експертизи людьми.

Для науковців таке математичне забезпечення повинне забезпечувати можливість підтримки прийняття рішень на вибір наукових журналів і конференцій для опублікування своїх досліджень, а також можливість оцінки і порівняння характеристик своїх публікацій і публікацій колег, що стимулює конкуренцію дослідників, їхніх досліджень і дослідних організацій.

Для редакцій наукових журналів також необхідно математичне забезпечення, що дозволяє аналізувати статистику і динаміку властивостей опублікованих статей, а також характеризувати якість розглянутих наукових публікацій у єдиній системі показників.

На даний час відомий ряд показників та інструментальних засобів [1–15], що і їх реалізують та дозволяють аналізувати публікації, які вийшли, їхніх авторів, журнали, а також організації за числом посилань на них в інших публікаціях, або за числом завантажень файлів публікацій у мережі Інтернет.

Недоліком відомих засобів [1–15] є те, що вони не дозволяють оцінити характеристики наукових праць до їхньої публікації на стадії розгляду редакцією наукового журналу й обмежуються тільки посиланнями на статті / авторів / організації / журнали, не приділяючи уваги структурі, лексиці і формі подання матеріалу публікацій.

Метою даної статті є розробка комплексу показників, які дозволять кількісно характеризувати властивості наукових праць з погляду на їхню структуру, лексику і форму подання матеріалу, а також враховуватимуть бібліографію статей і посилання на неї в опублікованих джерелах.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай ми маємо набір наукових праць (статей, тез і т.п.) $Base = \{paper_j\}, j = 1, 2, \dots, N$. Кожну наукову працю будемо розглядати як сукупність текстових і графічних елементів $paper_j = \{el_{ji}\}, i = 1, 2, \dots, N_{elj}$.

Тоді задача оцінювання якості наукової статті полягає у визначенні набору показників $Q = \{I_j^q\}$, що характеризують властивості статті $paper_j$.

Показники якості статті розділимо на абсолютні – ті, що визначені у вихідних одиницях виміру, а також відносні – ті, що співвіднесені зі значеннями відповідних показників інших статей.

На основі кожного абсолютного показника якості статей, опублікованих за визначений період (визначається роком, томом, номером / випуском) у журналі, визначимо, відповідно:

– відносний показник якості номерів (випусків) журналу за період t :

$$I_j^q = \frac{I_j^q}{\bar{I}^q},$$

де середній показник якості номерів (випусків) журналу за період t :

$$\bar{I}^q = \frac{1}{N_{iss}} \sum_{j=1}^{N_{iss}} \{(I_j^q) | time(I_j^q) \in t\}.$$

– нормований показник якості номерів (випусків) журналу за період t :

$$\tilde{I}^{qt} = \frac{I^{qt} - \bar{I}^{qt}}{\hat{I}^{qt} - \bar{I}^{qt}},$$

де \bar{I}^{qt} – мінімальний показник якості номерів (випусків) журналу за період t :

$$\bar{I}^{qt} = \min_{j=1,2,\dots,N_{iss}} \{I_j^q | time(I_j^q) \in t\},$$

\hat{I}_p^t – максимальний показник якості номерів (випусків) журналу за період t :

$$\hat{I}_p^t = \max_{j=1,2,\dots,N_{iss}} \{I_j^q | time(I_j^q) \in t\}.$$

2 ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД

Відомі показники [1–15], що характеризують наукові публікації, можна поділити на декілька груп: метрики на рівні статей, метрики на рівні журналів, метрики на рівні авторів.

Метрики на рівні статей характеризують властивості окремих статей. Найбільш широко використовуваними метриками даної групи є: кількість цитувань статті у певній базі публікацій (чим більше стаття цитується, тим вона вважається важливішою), кількість завантажень файлу статті з певної бази (чим більше завантажень статті, тим вона вважається цікавішою і важливішою), PageRank – кількісна величина, що характеризує «важливість» публікації в мережі Інтернет або базі публікацій, яка визначається за вхідними посиланнями з урахуванням того, як сильно вони рекомендують розглянуту публікацію (чим більше є посилань на публікацію, тим вона вважається більш важливою, а її вага визначається з урахуванням ваг посилань, переданих сторінками, що посилаються). Метрики даної групи оперують винятково кількістю посилань або завантажень статей без урахування вмісту, його структури, обсягу, форми і якості подання. Вони дають лише зовнішню оцінку використання матеріалу статті в ціло-

му, не дозволяючи охарактеризувати її властивості і зробити аналіз вмісту.

Метрики на рівні журналів [13–15] характеризують набір статей, опублікованих в одному журналі за визначений період. Найбільше широко використовуваними метриками даної групи є: базові метрики (кількість статей, опублікованих у журналі за певний період, кількість цитувань статей, опублікованих у журналі за певний період, середня кількість цитувань статей, опублікованих у журналі за певний період), імпаکت-фактор, індекс оперативності, напівжиття цитувань, SNIP, SJR, IPP.

Імпакт-фактор – чисельний показник важливості наукового журналу, що розраховується за базою Thomson Reuters за визначений часовий період як відношення кількості посилань на статті журналу за рік визначення імпаکت-фактора до кількості посилань на статті журналу за декілька (частіше два-чотири) попередніх роки (чим вище імпакт-фактор, тим сильніше вплив статей журналу на інші статті за даний період). Переваги імпакт-фактора: велике охоплення наукової літератури базою Thomson Reuters, публічність, простота у розумінні і використанні, як правило, більш жорстка система резонування у журналів з високим імпакт-фактором. Недоліки імпакт-фактора: невизначеність і неоднозначність взаємозв'язку кількості цитувань і якості конкретної статті, висока залежність імпакт-фактора від часового інтервалу, за який він визначається, велика залежність імпакт-фактора від обсягу і частоти статей у конкретній області науки, непрозорість і монополізація процесу розрахунку імпакт-фактора, вплив суб'єктивної думки експертів при відборі видань, індексованих базою, нерівномірне охоплення видань різних країн і на різних мовах [13–15].

Зведений імпакт-фактор (aggregate impact factor) – відношення кількості цитат для всіх журналів у предметній області до числа статей з усіх журналів у предметній області (чим більше його значення, тим більше середня кількість цитат статей у визначеній предметній області) [14, 15].

Індекс оперативності (immediacy index) – кількість цитувань статей журналу за даний рік, поділена на кількість статей, опублікованих у даному році (чим вище значення даного індексу, тим оперативніше цитуються статті, що публікуються) [14, 15].

Напівжиття цитувань (cited half-life) – середній вік статей, що цитувалися щороку, зокрема у Journal Citation Reports, тобто кількість років, що безпосередньо передують року розрахунку індексу з його урахуванням, на які приходиться половина цитованих статей з даного журналу у році розрахунку індексу, а інша половина – цитати статей за попередні до цього періоду роки (чим вище значення даного індексу, тим довше цитуються опубліковані статті) [14, 15].

Вплив публікації (IPP) – кількість цитувань за заданий рік наукових праць, опублікованих за три попередніх роки, поділена на кількість наукових статей, опублікованих за ці ж три роки [1].

SNIP (нормований вплив джерела на статтю) визначається як відношення середньої кількості цитувань статей, опублікованих у журналі, до частки потенціалу цитування і середнього потенціалу цитування статей із предметної області журналу, де потенціал цитування області

визначається як середня довжина списків літератури в області. SNIP вимірює вплив контекстного цитування за допомогою зваження цитувань, заснованого на загальній кількості цитувань у предметній області. Вплив одного цитування одержує більше значення в тих предметних областях, де цитування бувають рідше і навпаки [14, 15].

SJR – це кількість зважених цитувань, отриманих у заданому році, статей, опублікованих у заданому журналі за три попередні роки, поділене на загальну кількість статей, опублікованих у журналі за три попередні роки. SJR – міра наукового впливу журналів, що враховує як кількість цитувань, отриманих журналом, так і важливість або престиж журналів, звідкіля отримані цитування [2–5].

Власний фактор (eigenfactor) журналу в заданому році визначається як відсоток зважених цитат, отриманих журналом у заданому році, статей, опублікованих за п'ять попередніх років, від загального числа цитувань, отриманого всіма журналами в базі даних. При цьому не враховуються цитати, отримані журналом, для якого визначається власний фактор [6].

Вплив статті (Article Influence) визначається як частка від ділення Eigenfactor на відсоток усіх статей, зареєстрованих у Journal Citation Reports, що були опубліковані в заданому журналі [6].

Загальним недоліком метрик даної групи є їхня незастосовність для окремих статей, для неопублікованих робіт, що знаходяться на розгляді, для окремих учених.

Метрики на рівні авторів характеризують вплив авторів на наукові публікації, що наявні у базі. До метрик даної групи відносяться: базові метрики (сума відношень кількості цитувань статей до кількості авторів статей, середня кількість авторів статті, середня кількість цитувань на автора у рік, середня кількість статей на автора), h -індекс, g -індекс та i -індекс й ін. індекси, визначені на їхній основі.

Індекс Гірша (h -індекс) – кількісна характеристика продуктивності вченого, групи вчених, наукової організації або країни у цілому, заснована на кількості публікацій і кількості цитувань цих публікацій: учений має індекс h , якщо h з його N статей цитуються як мінімум h разів кожна, у той час як $(N-h)$ статей, що залишилися, цитуються не більш, ніж h разів кожна, тобто вчений з індексом h опублікував h статей, на кожну з яких послали як мінімум h разів. Переваги індексу Гірша: чим вище індекс Гірша, тим більше публікацій написав учений і тем більше на них є посилань. Недоліки індексу Гірша: його залежність від виду, обсягу й охоплення використовуваної бази публікацій, залежність від способу підрахунку (з урахуванням і без урахування самоцитування) [7, 13–15].

Індекс Егтха (g -індекс) – кількісний показник для вимірювання наукової продуктивності, що розраховується

на основі розподілу цитувань, отриманих публікаціями вченого для заданого набору статей, відсортованого у порядку убутання кількості цитувань, що одержали ці статті, тобто g -індекс – це найбільше число, таке, що g самих цитованих статей одержали (сумарно) не менше g^2 цитувань. Колективний індекс g_1 визначають за набором вчених, впорядкованому за убутанням їхніх g -індексів, як (унікальне) найбільше число, таке що верхні g_1 дослідників мають у середньому як мінімум g -індекс g_1 . Перевагою g -індексу є те, що він спрямований на поліпшення на h -індексу, наділяючи великою вагою високо цитовані статті. Недоліком g -індексу є його непристосованість до ситуації, коли середнє кількість цитувань для всіх опублікованих робіт перевищує загальну кількість опублікованих робіт [8–10].

I -індекс – чисельна характеристика публікаційної активності наукової організації, що розраховується на основі розподілу індексу Гірша вчених з даної наукової організації: наукова організація має індекс i , якщо не менш i учених з цієї організації мають h -індекс не менший за i [11, 12].

Загальним недоліком метрик даної групи є те, що вони не враховують характеристики вмісту статті, якості його подання.

Узагальнюючи результати аналізу усіх відомих індексів можна дійти висновку, що їхнім загальним недоліком є оцінювання статей на зовнішньому стосовно їхнього вмісту рівні. Це не дозволяє явно судити про якість подання матеріалу статті, а також визначати рівень статті за відсутності доступу до конкретних баз наукових публікацій. Крім того, відомі метрики є сильно залежними від обсягу і ширини охоплення наукових публікацій використовуваними базами, їхньої мови.

Тому представляється необхідним розробити комплекс індивідуальних метрик якості для автоматизації аналізу наукових публікацій, що дозволяють усунути відзначені недоліки відомих метрик.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Під словником текстового фрагменту $v = \{v_j\}$ будемо розуміти набір слів v_p , що містяться у текстовому фрагменті, поданих у нормалізованій формі (наприклад, іменники і прикметники в однині і називному відмінку, дієслова – у невизначеній формі й однині і т.п.) без повторень.

Також визначимо на основі словників мов $syn(v_i)$ – функцію, що повертає список слів-синонімів для слова v_p , а також їхні переклади (з їхніми синонімами) на всі доступні мови.

Ключовим аспектом будь-якої публікації є її доступність для читачів.

Потенціал охоплення читачької аудиторії при необмеженому доступі до статті визначимо за формулою:

$$I_{aud j} = \frac{auditory(lang(text)) + \frac{1}{N_t N_{abst}} \sum_{i=1}^{N_{abst}} \{N_{a,i} \cdot auditory(lang(abstract^i)) \mid lang(abstract^i) \neq lang(text)\}}{population}$$

де оцінку розміру аудиторії носіїв кожної мови $auditory(x)$ можна одержати з [16].

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим стаття буде більш доступною за мовою для потенційно більшої читацької аудиторії.

Відповідно до історично сформованої практики написання наукових статей і її відображенням у вимогах ведучих наукових видавництв світу [17] структура статей повинна містити низку обов'язкових елементів, явну відсутність яких варто розглядати як недолік форми подання результатів досліджень. Кількісно виразити відповідність структури статті вимогам пропонується за допомогою показника якості структурованості статті:

$$I_j^{str} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{str}} w_i^{str} a_i^{str}}{\sum_{i=1}^{N_{str}} w_i^{str}},$$

де $0 < w_i^{str} \leq 1, 0 \leq a_i^{str} \leq 1$.

У найпростішому випадку функції a_i^{str} можуть повертати значення «1» за наявності в статті i -го елемента і значення «0» – за його відсутності. При більш складній із програмістської точки зору реалізації функції a_i^{str} можуть також визначати неявне наведення в статті відомостей, що відносяться до i -го необхідного елемента структури, явно не зазначеного у ній, і повертати число в діапазоні від нуля до одиниці.

Пропонується визначати функції a_i^{str} програмним способом, а відповідні їм ваги w_i^{str} для елементів статті – відповідно до табл. 1.

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більш якісною за структурою є стаття, тобто тим більше вона відповідає вимогам [17].

Таблиця 1 – Основні елементи структури статті і їхні ваги

Елемент структури статті	w_i^{str}
Індекс УДК чи іншої системи класифікації наукових публікацій	1
Назва статті англійською мовою	0,9
Назва статті іншою мовою	0,1
Анотація англійською мовою	0,9
Анотація іншою мовою	0,1
Ключові слова англійською мовою	0,9
Ключові слова іншою мовою	0,1
Автори й організації англійською мовою	0,9
Автори й організації іншою мовою	0,1
Номенклатура (перелік позначень і скорочень)	0,1
Вступ	1
Постановка задачі (проблеми)	0,9
Мета роботи	0,1
Огляд літератури	1
Експерименти	1
Результати	1
Обговорення	1
Висновки	1
Подяки	0,1
Список літератури мовою оригіналу	0,9
Транслітерований список літератури (якщо наведений тільки один список усі джерела в якому подані латиницею, то вважається, що транслітерований список наявний у статті)	0,1
Матеріали і методи	1
Інші підрозділи (мається на увазі наявність одного і більш підрозділів, з назвами, відсутніми в даній таблиці)	0,8

Важливою інформацією про зв'язок статті з іншими роботами, що дозволяє також оцінити рівень поінформованості авторів про рівень науки у відповідній предметній області, є наведена у ній бібліографія.

Показник розмаїтості географії джерел бібліографії визначимо як:

$$I_j^{bib\ geo} = \frac{1}{N_{ref}} \left| \bigcup_{i=1}^{N_{ref}} geo(ref_i) \right|, N_{ref} > 0.$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні (0, 1]: його значення буде тим більше, чим різноманітніше місця розташування видавництв джерел, наведених у бібліографії.

Показник розмаїтості мов джерел бібліографії:

$$I_j^{bib\ lang} = \frac{1}{N_{ref}} \left| \bigcup_{i=1}^{N_{ref}} lang(ref_i) \right|, N_{ref} > 0.$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні (0, 1]: його значення буде тим більше, чим різноманітніше мови джерел, наведених у бібліографії.

Показник розмаїтості видів джерел у бібліографії до j -ї статті пропонується визначати за формулою:

$$K_{Tj} = \frac{1}{8} \sum_{k=1}^8 \left\{ 1 \left(\sum_{i=1}^{b_1} \{1 | type(ref_i) = k\} \right) > 0 \right\},$$

де $type(ref_i)$ бере значення: 1 – стаття у журналі, 2 – тези доповіді на конференції чи стаття (розділ) у книзі, 3 – книга, 4 – документ про інтелектуальну власність (патент на винахід або авторське свідоцтво), 5 – дисертація або автореферат, 6 – електронний ресурс, 7 – стандарт, 8 – інші види джерел.

В ідеалі стаття повинна цитувати усі основні види наукових джерел. У цьому випадку коефіцієнт розмаїтості видів джерел буде приймати значення «1». Чим менше буде значення даного коефіцієнта, тим менше різноманітних видів джерел приведено в бібліографії. У найгіршому випадку (за відсутності бібліографії як такої) коефіцієнт дорівнюватиме нулю.

Показник якості бібліографії j -ї статті визначимо за формулою:

$$I_j^{bib} = \left(\frac{(N_{ref} - b_2) I_j^{bib\ lang} I_j^{bib\ geo} K_{Tj}}{N_{ref}^2 (b_4 - b_3) (1 + b_1 - b_4)} \right) \times \left(\sum_{i=1}^{N_{ref}} year_i - N_{ref} b_3 \right) \left(\frac{1 - e^{-\frac{N_{ref}}{2}}}{1 + e^{-\frac{b_2}{2}}} \right).$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим ближче до року виходу j -ї статті найпізніша публікація у бібліографії, чим більше діапазон охоплення публікацій, чим більш різноманітними є географія видавців, мови і роки виходу публікацій, чим більшою є кількість публікацій у бібліографії, чим більш рівномірним за строками видання є публікації в бібліографії.

Показник насиченості тексту статті посиланнями на джерела задамо як:

$$I_j^{cit} = \frac{senre}{sen} \left(\frac{\sum_{i=1}^{N_{ref}} N_{rei}}{\sum_{i=1}^{N_{ref}} (N_{rei} + N_{reci})} \right), sen > 0.$$

Показник якості цитування буде приймати значення у діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більшою буде в аналізованій статті частка речень, що містять посилання на джерела, а також чим більшою буде частка окремих посилань на джерела у загальній кількості посилань у тексті.

На основі запропонованих показників якості бібліографії і насиченості тексту статті посиланнями на джерела визначимо гібридний показник якості бібліографії і її використань у тексті статті:

$$I_j^{bc} = I_j^{bib} I_j^{cit}.$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим ближче до року виходу j -ї статті найпізніша публікація у бібліографії, чим більшим є діапазон охоплення публікацій, чим більш різноманітними є географія видавців, мови і роки виходу публікацій, чим більшою є кількість публікацій у бібліографії, чим більш рівномірним за строками видання є публікації в бібліографії, чим більшою буде в аналізованій статті частка речень, що містять посилання на джерела, а також чим більшою буде частка окремих посилань на джерела у загальній кількості посилань у тексті.

Поряд з бібліографією про рівень подання матеріалу статті може свідчити її ілюстративний апарат, що містить таблиці і рисунки.

Показник кількості і цитовності рисунків визначимо за формулою:

$$I_j^{ris} = \begin{cases} \left(\frac{1 - e^{-N_{ris}}}{1 + e^{-N_{ris}}} \right) \left(\frac{1}{N_{ris}} \sum_{i=1}^{N_{ris}} \{1 | N_{rerisi} > 0\} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{N_{ris}} \sum_{i=1}^{N_{ris}} \left(\frac{N_{sererisi}}{N_{rerisi}} \middle| N_{rerisi} > 0 \right) \right), N_{ris} > 0, \\ 0, N_{ris} = 0. \end{cases}$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більше рисунків є у статті, чим більшою є частка рисунків, на які у тексті статті є посилання, а також чим більше посилань у тексті статті наведено на кожен рисунок окремо.

Показник обсягу і цитовності таблиць:

$$I_j^{tab} = \begin{cases} \left(\frac{1 - e^{-N_{tab}}}{1 + e^{-N_{tab}}} \right) \left(\frac{1}{N_{tab}} \sum_{i=1}^{N_{tab}} \{1 | N_{retabi} > 0\} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{N_{tab}} \sum_{i=1}^{N_{tab}} \left(\frac{N_{seretabi}}{N_{retabi}} \middle| N_{retabi} > 0 \right) \right), N_{tab} > 0, \\ 0, N_{tab} = 0. \end{cases}$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більше таблиць є у статті, чим більшою є частка таблиць, на які в тексті статті є посилання, а також чим більше посилань у тексті статті наведено на кожену таблицю окремо.

Показник ілюстрованості статті пропонується визначати за формулою:

$$I_j^{il} = 0,5(I_j^{ris} + I_j^{tab}).$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більше ілюстрацій (рисунків і таблиць) є у статті, чим більшою є частка ілюстрацій, на які в тексті статті є посилання, а також чим більше посилань у тексті статті наведено на кожену ілюстрацію окремо.

За умови реалізації програмної оцінки фактичної площі у см², займаної ілюстраціями у статті, $Area_j^{il}$ доцільно використовувати показник, що визначається формулою:

$$I_j^{ilvol} = \frac{Area_j^{il}}{Area_j}, Area_j > 0.$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більше частка площі, займаної ілюстраціями, у площі статті.

На основі запропонованих показників визначимо гібридний показник ілюстрованості статті:

$$I_j^{ilh} = I_j^{il} I_j^{ilvol}.$$

Важливою складовою будь-якої наукової статті є її ногація і математичний апарат.

Показник обсягу і використання математичного апарату статті пропонується визначати за формулою:

$$I_j^{eq} = \begin{cases} \left(\frac{1 - e^{-N_f}}{1 + e^{-N_f}} \right) \left(\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \{1 | N_{rfi} > 0\} \right) \times \\ \times \left(\frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} \left(\frac{N_{serf_i}}{N_{rf_i}} \middle| N_{rf_i} > 0 \right) \right) \left(\frac{N_{dmsb}}{N_{msb}} \right), N_f > 0, \\ 0, N_f = 0. \end{cases}$$

Запропонований показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: його значення буде тим більше, чим більше в тексті статті нумерованих формул, чим на більше число нумерованих формул є посилань у тексті статті, чим більше частка окремих посилань на кожену формулу у загальній кількості посилань на формули, а також чим більше використаних нестандартних позначень розшифровано у тексті статті.

Значну інформацію про рівень і зміст наукової статті несе її лексика.

Показник ефективності введених аббревіатур у j -й статті визначимо за формулою:

$$I_{abb_j} = \begin{cases} \frac{1}{N_{reabr}} \sum_{i=1}^{N_{abr}} \{reab_i \mid reab_i > 2\}, N_{reabr} > 0; \\ 0, N_{reabr} = 0, \end{cases}$$

$$N_{reabr} = \sum_{i=1}^{N_{abr}} reab_i.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більш обґрунтованим є використання введених абревіатур у j -й статті.

Відповідність назви тексту статті визначимо за допомогою показника:

$$I_{nt_j} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} \{1 \mid \text{syn}(title_i) \cap \text{text} \neq \emptyset\}.$$

Цей показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше лексика назви відповідає тексту статті.

Відповідність назви статті авторської анотації статті визначимо за допомогою показника:

$$I_{na_j} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_a} \{1 \mid \text{syn}(title_i) \cap \text{abstract} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше лексика назви відповідає лексичі анотації статті.

Відповідність авторської анотації тексту статті визначимо за допомогою показника:

$$I_{at_j} = \frac{1}{N_a} \sum_{i=1}^{N_a} \{1 \mid \text{syn}(abstract_i) \cap \text{text} \neq \emptyset\}.$$

Цей показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше лексика авторської анотації відповідає тексту статті.

Відповідність авторських ключових слів і анотації j -ї статті можливо оцінити за допомогою показника:

$$I_{ka_j} = \frac{1}{N_{kw}} \sum_{i=1}^{N_{kw}} \{1 \mid \text{syn}(keywords_i) \cap \text{abstract} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше виділених автором ключових слів або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається в тексті авторської анотації до статті.

Відповідність авторських ключових слів і назви j -ї статті можливо оцінити за допомогою показника:

$$I_{kn_j} = \frac{1}{N_{kw}} \sum_{i=1}^{N_{kw}} \{1 \mid \text{syn}(keywords_i) \cap \text{title} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше виділених автором ключових слів або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається в тексті назви статті.

Відповідність авторських ключових слів і тексту j -ї статті можливо оцінити за допомогою показника:

$$I_{kt_j} = \frac{1}{N_{kw}} \sum_{i=1}^{N_{kw}} \{1 \mid \text{syn}(keywords_i) \cap \text{text} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше виділених автором ключових слів або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається в тексті статті.

Автори не завжди вдало обирають ключові слова. Частково це можна пояснити халатним відношенням або нерозумінням призначення ключових слів слугувати для пошуку статті у базах публікацій.

Визначимо характеристичне слово як таке слово або його синонім чи переклад, що є одним з найбільш частих у статті, або таке слово, що дозволяє відокремити дану статтю від подібних їй за тематикою. Характеристичні слова можуть виділятися без участі людини за допомогою частотного аналізу лексики статей, а також кластеризації бази статей. Характеристичні слова можуть частково збігатися з авторськими ключовими словами і, чим більше таких збігів, тим краще автор виділив ключові слова.

Відповідність виділених автором ключових слів, характеристичним словам статті пропонується оцінювати за формулою:

$$I_{kc_j} = \frac{1}{N_{kw}} \sum_{i=1}^{N_{kw}} \{1 \mid \text{syn}(keywords_i) \cap \text{cwrds} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше авторських ключових слів або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається серед характеристичних слів статті.

Аналогічно, відповідність авторської анотації характеристичним словам статті пропонується оцінювати за формулою:

$$I_{ac} = \frac{1}{N_{cwrds}} \sum_{i=1}^{N_a} \{1 \mid \text{syn}(abstract_i) \cap \text{cwrds} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше характеристичних слів статті або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається в тексті авторської анотації до статті, тобто тим можливо вдаліше обрана лексика анотації автором.

Відповідність назви і характеристичних слів j -ї статті пропонується оцінювати за допомогою показника:

$$I_{nc_j} = \frac{1}{N_n} \sum_{i=1}^{N_n} \{1 \mid \text{syn}(title_i) \cap \text{cwrds} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше слів назви або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається серед характеристичних слів статті.

Відповідність УДК лексичі статті пропонується оцінювати за допомогою показника:

$$I_{UDC_j} = \frac{1}{N_{UDC}} \sum_{i=1}^{N_{UDC}} \{1 \mid \text{syn}(UDC_i) \cap$$

$$\cap (\text{title} \cup \text{abstract} \cup \text{keywords} \cup \text{text}) \neq \emptyset\},$$

словник UDC може бути складений на основі [18].

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше слів з

розшифровок індексів УДК або їхніх синонімів чи перекладів зустрічається серед слів статті.

Відповідність опису таблиць тексту статті пропонується визначати за формулою:

$$I_{tab j} = \frac{1}{N_{tab}} \sum_{k=1}^{N_{tab}} \left(\frac{1}{N_{tabcap k}} \sum_{i=1}^{N_{tabcap k}} \{1 | \text{syn}(tabcap_{k,i}) \cap \text{text} \neq \emptyset\} \right).$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше слів з тексту і заголовків таблиць зустрічається серед слів статті.

Відповідність опису рисунків тексту статті пропонується визначати за формулою:

$$I_{fig j} = \frac{1}{N_{fig}} \sum_{k=1}^{N_{fig}} \left(\frac{1}{N_{figcap k}} \sum_{i=1}^{N_{figcap k}} \{1 | \text{syn}(figcap_{k,i}) \cap \text{text} \neq \emptyset\} \right).$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше слів з тексту і підписів до рисунків зустрічається серед слів статті.

Показник відповідності лексики i -го і k -го абзаців j -ї статті визначимо як:

$$I_{par j}(i, k) = \frac{1}{N_{par i}} \sum_{p=1}^{N_{par i}} \{1 | \text{syn}(par_{i,p}) \cap par_k \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більш однаковою є лексика відповідних абзаців.

Узагальнений показник відповідності лексики назв літературних джерел лексиці тексту статті визначимо за формулою:

$$I_{rt j} = \frac{1}{N_{wref}} \sum_{i=1}^{N_{wref}} \{1 | \text{syn}(ref_i) \cap \text{text} \neq \emptyset\}.$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим більше слів з назв бібліографічних джерел, їхніх синонімів і перекладів зустрічається серед слів статті.

Показник самоцитування авторами статті визначимо за формулою:

$$I_{sc j} = \frac{1}{N_{ref}} \sum_{i=1}^{N_{ref}} \left\{ 1 \left| \left(\sum_{k=1}^{N_{aut}} \{1 | \text{eq}(aut_k, reaut_i)\} \right) > 0 \right. \right\},$$

де функція, що ідентифікує авторство статей, eq повертає значення «1», якщо обидва аргументи ідентифікують одного й того ж автора, «0» – у іншому випадку.

Показник якості авторського колективу статті визначимо як:

$$I_{Qaut j} = \left(\frac{1 - e^{-2z}}{1 + e^{-2z}} \right),$$

$$z = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^{N_{aut}} \left(\left(\alpha_1(i) + \alpha_2(i) + \alpha_3(i) \alpha_4(i) \right) \left(\frac{\alpha_5(i) + \alpha_6(i)^3}{maxcit} \right) \right),$$

де $\alpha_1(i)$: 1 – доктор наук (хабілітований), 0,5 – кандидат наук / доктор філософії, 0,1 – магістр наук, інженер, 0 – інше; $\alpha_2(i)$: 1 – професор, 0,5 – доцент / асоційований професор, 0 – інше;

$\alpha_3(i)$: 1 – президент, віце-президент, ректор, проректор, декан, заст. декана, завідувач кафедри, начальник відділу, професор, 0,5 – доцент, науковий співробітник, 0,1 – асистент, інженер, фахівець, 0 – інше; $\alpha_4(i)$: 1 – університет, інститут, 0,5 – коледж, технікум, 0,1 – індустрія, 0 – інше.

Інтегральний показник якості наукової статті визначимо на основі показників, що характеризують окремі її властивості:

$$I_{Q j} = (I_{aud j} I_{Qaut j} I_j^{str}) 0,5 (I_j^{bc} + (1 - I_{sc j})) \times \\ 0,2 (I_j^{il} + I_j^{eq} + I_{abb j} + I_{tab j} + I_{fig j}) \times \\ \times 0,09 (I_{nt j} + I_{na j} + I_{at j} + I_{ka j} + I_{kn j} + \\ + I_{kt j} + I_{kc j} + I_{ac} + I_{nc j} + I_{UDC j} + I_{rt j}).$$

Даний показник буде приймати значення в діапазоні [0, 1]: чим більше буде його значення, тим вищою буде якість подання матеріалу і лексичний взаємозв'язок елементів статті.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для експериментального дослідження запропонованих показників була розроблена комп'ютерна програма, що автоматично визначає розроблені показники для статті, поданої у вигляді окремого файлу на диску.

Для розрахунків використовувався матеріал даної статті. У табл. 2 наведені деякі вихідні характеристики статті.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Для даної статті за допомогою розробленого програмного забезпечення визначені значення показників, запропонованих у даній роботі, що наведені у табл. 3.

Як видно з табл. 3, запропоновані показники дозволяють характеризувати властивості наукових праць з погляду на їхню структуру, лексику і форму подання матеріалу, а також бібліографію.

6 ОБГОВОРЕННЯ

У порівнянні з відомими показниками, що відбивають лише властивості статей на зовнішньому до їхнього матеріалу рівні [1–15], запропоновані показники дозволяють кількісно оцінювати індивідуальні властивості матеріалу, що дозволяє явно судити про якість подання матеріалу, а також автоматизувати аналіз наукових публікацій.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено завдання автоматизації аналізу якості наукових публікацій за допомогою розробки математичного забезпечення для чисельного оцінювання якості наукових публікацій.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що вперше запропонована модель якості наукових публікацій, що являє собою набір метрик, які дозволяють кількісно оцінювати індивідуальні властивості матеріалу й автоматизувати аналіз наукових публікацій. Запропонований набір містить такі показники статті: потенціал охоплення читацької аудиторії, структурованість, розмаїтість географії, мов і видів джерел бібліографії, якість бібліографії, насиченість тексту посиланнями на джерела, кількість і цитованість рисунків і таблиць, ілюстрованість, обсяг і використання математичного апарату, ефективність аббревіатур, показники лексики статті (відповідність назви тексту, назви – авторській анотації, авторській анотації – тексту, ключових слів – анотації, ключових слів – назві, ключових слів – тексту, ключових і характеристичних слів, анотації і характеристичних слів, назви і характе-

Таблиця 2 – Вихідні характеристики статті

Показник	Значення
b_1	2015
b_2	0
b_3	2005
b_4	2014
N_{ref}	18
$\alpha_1(i)$	1
$\alpha_2(i)$	1
$\alpha_3(i)$	1
$\alpha_4(i)$	1
$\alpha_5(i)$	558
$\alpha_6(i)$	4
b_2	0
b_3	2005
b_4	2014
$maxcit$	30000
N_a	10
N_{abr}	4
N_{abs}	3
N_{aut}	1
N_{ref}	18
N_{fig}	0
N_{tab}	3
N_f	0
N_{reabr}	11
N_f	0
N_{ref}	18
N_t	587
N_{tab}	3
$population$	$7 \cdot 10^9$
N_{kw}	10
N_n	6
N_{UDC}	20
N_{wref}	93
sen	212
$senre$	20

Таблиця 3 – Показники якості статті

Показник	Значення
$I_{aud j}$	0,0193
I_j^{str}	0,98667
$I_j^{bib geo}$	0,5
$I_j^{bib lang}$	0,111111
$K_T j$	0,375
I_j^{bib}	0,0027
I_j^{cit}	0,008359
I_j^{bc}	$2,2572 \cdot 10^{-5}$
I_j^{ris}	0
I_j^{tab}	0,90515
I_j^{il}	0,45257
I_j^{eq}	0
$I_{abb j}$	0,2727
$I_{nt j}$	0,8333
$I_{na j}$	0,8333
$I_{at j}$	0,8279
I_{ac}	0,7895
$I_{ka j}$	0,7
$I_{kn j}$	0,4
$I_{nc j}$	0,5714
$I_{kt j}$	0,8
$I_{kc j}$	0,5
$I_{UDC j}$	0,4737
$I_{tab j}$	0,9
$I_{fig j}$	0
$I_{rt j}$	0,4625
$I_{sc j}$	0
$I_{Qaut j}$	0,01037
$I_{Q j}$	$2,08398 \cdot 10^{-5}$

ристичних слів, УДК і лексики статті, опису таблиць і рисунків – тексту, відповідності лексики абзаців, назв літературних джерел – тексту), самоцитовання авторами статті, якість авторського колективу, гібридні й інтегральні показники якості статті. Розроблені показники дозволяють характеризувати властивості наукових праць з погляду на їхню структуру, лексику і форму подання матеріалу, а також бібліографію.

Практична цінність отриманих результатів полягає у розробленому програмному забезпеченні для автоматизації розрахунку запропонованих метрик.

Перспективи подальших досліджень полягають у тому, щоб інтегрувати розрахунок запропонованих показників до наукометричних баз, досліджувати можливі взаємозв'язки запропонованих і відомих бібліометричних показників на великому масиві публікацій, вивчити можливий взаємозв'язок запропонованих показників і експертних оцінок якості статей рецен-

зентами-людьми, що є провідними фахівцями у відповідних областях науки.

ПОДЯКИ

Робота виконана у межах держбюджетної науково-дослідної теми Запорізького національного технічного університету «Інтелектуальні інформаційні технології автоматизації проектування, моделювання, керування і діагностування виробничих процесів і систем» (номер держ. реєстрації 0112U005350) при частковій підтримці міжнародного проекту «Центри передового досвіду для молодих учених» програми «Темпус» Європейської Комісії (№ 544137-TEMPUS-1-2013-1-SK-TEMPUS-JPHES).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Moed H. F. Measuring contextual citation impact of scientific journals / H. F. Moed // Journal of Informetrics. – 2010. – Vol. 4, Issue 3. – P. 265–277. DOI: 10.1016/j.joi.2010.01.002
- González-Pereira B. A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator / B González-Pereira, V. P. Guerrero-Bote, F. Moya-Anegyn // Journal of informetrics. – 2010. – Vol. 4, Issue 3. – P. 379–391. DOI: 10.1016/j.joi.2010.03.002
- Guerrero-Bote V. P. A further step forward in measuring journals' scientific prestige: The SJR2 indicator / V. P. Guerrero-Bote, F. Moya-Anegyn // Journal of Informetrics. – 2012. – Vol. 6, Issue 4. – P. 674–688. DOI: 10.1016/j.joi.2012.07.001
- Butler D. Free journal-ranking tool enters citation market / D. Butler // Nature. – 2008. – Vol. 451, Issue 6. – P. 6. DOI:10.1038/451006a.
- Falagas M. E. Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor // M. E. Falagas, V. D. Kouranos, R. Arcencibia-Jorge, D. E. Karageorgopoulos // The FASEB Journal. – 2008. – Vol. 22, Issue 8. – P. 2623–2628. DOI:10.1096/fj.08-107938.
- Bergstrom C. T. The Eigenfactor Metrics / C. T. Bergstrom, J. D. West, M. A. Wiseman // Journal of Neuroscience. – 2008. – Vol. 28, Issue 45. – P. 11433–11434.
- Hirsch J. E. An index to quantify an individual's scientific research output // Proceedings of The National Academy of Sciences. – 2005. – Vol. 102, № 46. – P. 16569–16572. DOI:10.1073/pnas.0507655102.
- Egghe L. Theory and practise of the g-index / L. Egghe // Scientometrics. – 2006. – Vol. 69, № 1. – P. 131–152. DOI:10.1007/s11192-006-0144-7.
- Woeginger G. J. An axiomatic analysis of Egghe's g-index / G. J. Woeginger // Journal of Informetrics. – 2008. – Vol. 2, Issue 4. – P. 364–368. DOI:10.1016/j.joi.2008.05.002
- Tol R. S. J. A rational, successive g-index applied to economics departments in Ireland / R. S. J. Tol // Journal of Informetrics. – 2008. – Vol. 2, Issue 2. – P. 149–155. DOI:10.1016/j.joi.2008.01.001.
- Kosmulski M. I – a bibliometric index / M. Kosmulski // Forum Akademickie. – 2006. – Vol. 11. – P. 31.
- Prathap G. Hirsch-type indices for ranking institutions' scientific research output // Current Science. – 2006. – Vol 91, Issue 11. – P. 1439.
- Игра в цифирь, или как теперь оценивают труд ученого (сборник статей о библиометрике). – М.: МЦНМО, 2011. – 72 с.
- Цыганов А. В. Краткое описание наукометрических показателей, основанных на цитируемости // Управление большими системами: сб. тр. Спец. вып. 44 – Наукометрия и экспертиза в управлении наукой / [под ред. Д. А. Новикова, А. И. Орлова, П. Ю. Чеботарева]. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С. 248–261.
- Штовба С. Д. Обзор наукометрических показателей для оценки публикационной деятельности ученого / С. Д. Штовба, Е. В. Штовба // Управление большими системами: сб. тр. Спец. Вып. 44 – Наукометрия и экспертиза в управлении наукой / [под ред. Д. А. Новикова, А. И. Орлова, П. Ю. Чеботарева]. – М.: ИПУ РАН, 2013. – С. 262–278.
- List of languages by total number of speakers [Electronic resource]. – Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_languages_by_total_number_of_speakers.

17. Рекомендации EASE (Европейской ассоциации научных редакторов) для авторов и переводчиков научных статей, которые должны быть опубликованы на английском языке [Электронный ресурс]. – 16 с. – Режим доступа: [http://](http://www.ease.org.uk/sites/default/files/ease_guidelines-june2014-russian.pdf)

www.ease.org.uk/sites/default/files/ease_guidelines-june2014-russian.pdf

18. The UDC Summary [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.udcc.org/udccsummary/php/index.php?lang=ru&pr=Y>

Стаття надійшла до редакції 04.02.2015.

Субботин С. А.

Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

МОДЕЛЬ И ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ МЕТРИКИ КАЧЕСТВА НАУЧНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Проанализированы известные метрики научных публикаций. Установлено, что их общим недостатком является оценивание статей на внешнем по отношению к их содержанию уровне, что не позволяет явно судить о качестве представления материала статьи. Целью данной работы являлась разработка комплекса показателей, позволяющих характеризовать свойства научных работ с точки зрения их структуры, лексики и формы представления материала, а также библиографии. Определен набор метрик, позволяющих количественно оценивать индивидуальные свойства материала и автоматизировать анализ научных публикаций. Предложенный набор включает показатели статьи: потенциал охвата читательской аудитории, структурированность, разнообразие географии, языков и видов источников библиографии, качество библиографии, насыщенность текста ссылками на источники, число и цитируемость рисунков и таблиц, иллюстрированность, объем и использование математического аппарата, эффективность аббревиатур, показатели лексики статьи (соответствие названия тексту, названия и авторской аннотации, авторской аннотации и текста, ключевых слов и аннотации, ключевых слов и названия, ключевых слов и текста, ключевых и характеристических слов, аннотации и характеристических слов, названия и характеристических слов, УДК и лексики статьи, описания таблиц и рисунков тексту, соответствия лексики абзацев, названий литературных источников и текста), самоцитирование авторами статьи, качество авторского коллектива, гибридные и интегральные показатели качества статьи. Приведены примеры, подтверждающие практическую применимость предложенных показателей.

Ключевые слова: наукометрия, библиометрия, качество, статья, научная работа, метрика, анализ цитируемости, важность статьи.

Subbotin S. A.

Dr.Sc., Professor, Professor of department of software tools, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

MODEL AND INDIVIDUAL QUALITY METRICS OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS

The existent metrics of scientific publications has been analyzed. Their common disadvantage is the external evaluation of articles relatively to external level to their content. This obviously does not allow to assess the quality of presentation of the article. The purpose of this paper is to develop a set of indicators to characterize the properties of scientific papers in terms of their structure, vocabulary and forms of presentation, as well as a bibliography. The set of metrics allowing to quantificate the material individual properties and to automate the analysis of scientific publications has been defined. The proposed set includes such paper indices as: potential readership coverage, structuring, diversity of geography, languages and types of bibliographic sources, bibliography quality, text richness by the links to sources, figures and tables number and quotability, Illustrativity, mathematical apparatus volume and the use, abbreviation effectiveness, paper vocabulary indices (compliance of title with text, of title with author's abstracts, of author's abstracts with text, of keywords with abstracts, of keywords with title, of keywords with text, of keywords with characteristic words, of abstracts with characteristic words, of names with characteristic words, of UDC with paper vocabulary, of tables and figures descriptions with text, of vocabulary compliance with paragraphs, of references names with text), self-citations of the authors, author team quality, hybrid and integrated indicators of paper quality. The examples confirming practical applicability of the proposed indicators are shown.

Keywords: scientometrics, bibliometrics, quality, paper, scientific work, metric, citation analysis, article importance.

REFERENCES

1. Moed H. F. Measuring contextual citation impact of scientific journals, *Journal of Informetrics*, 2010, Vol. 4, Issue 3, pp. 265–277. DOI: 10.1016/j.joi.2010.01.002
2. González-Pereira B., Guerrero-Bote V. P., Moya-Anegyn F. A new approach to the metric of journals' scientific prestige: The SJR indicator, *Journal of Informetrics*, 2010, Vol. 4, Issue 3, pp. 379–391. DOI: 10.1016/j.joi.2010.03.002
3. Guerrero-Bote V. P., Moya-Anegyn F. A further step forward in measuring journals' scientific prestige: The SJR2 indicator, *Journal of Informetrics*, 2012, Vol. 6, Issue 4, pp. 674–688. DOI: 10.1016/j.joi.2012.07.001
4. Butler D. Free journal-ranking tool enters citation market, *Nature*, 2008, Vol. 451, Issue 6, pp. 6. DOI:10.1038/451006a.
5. Falagas M. E., Kouranos V. D., Arencibia-Jorge R., Karageorgopoulos D. E. Comparison of SCImago journal rank indicator with journal impact factor, *The FASEB Journal*, 2008, Vol. 22, Issue 8, pp. 2623–2628. DOI:10.1096/fj.08-107938.
6. Bergstrom C. T., West J. D., Wiseman M. A. The Eigenfactor Metrics, *Journal of Neuroscience*, 2008, Vol. 28, Issue 45, pp. 11433–11434.
7. Hirsch, J. E. An index to quantify an individual's scientific research output. – Proceedings of The National Academy of Sciences, 2005, Vol. 102, No. 46, pp. 16569–16572. DOI:10.1073/pnas.0507655102.
8. Egghe L. Theory and practise of the g-index, *Scientometrics*, 2006, Vol. 69, No. 1, pp. 131–152. DOI:10.1007/s11192-006-0144-7.
9. Woeginger G. J. An axiomatic analysis of Egghe's g-index, *Journal of Informetrics*, 2008, Vol. 2, Issue 4, pp. 364–368. DOI:10.1016/j.joi.2008.05.002

10. Tol R. S. J. A rational, successive g-index applied to economics departments in Ireland, *Journal of Informetrics*, 2008, Vol. 2, Issue 2, pp. 149–155. DOI:10.1016/j.joi.2008.01.001.
11. Kosmulski M. I – a bibliometric index, *Forum Akademickie*, 2006, Vol. 11, P. 31.
12. Prathap G. Hirsch-type indices for ranking institutions' scientific research output, *Current Science*, 2006, Vol 91, Issue 11, P. 1439.
13. Igra v cyfir', ili kak teper' ocenivayut trud uchenogo (sbornik statej o bibliometrike). Moscow, MCNMO, 2011, 72 p.
14. Cyganov A. V. Kratkoe opisaniye naukometricheskix pokazatelej, osnovannyx na citiruemosti, *Upravlenie bol'shimi sistemami : sb. tr. Spec. vyp. 44 – Naukometriya i e'kspertiza v upravlenii naukoj*, [pod red. D. A. Novikova, A. I. Orlova, P. Yu. Chebotareva]. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 248–261.
15. Shtovba S. D., Shtovba E. V. Obzor naukometricheskix pokazatelej dlya ocenki publikacionnoj deyatelnosti uchenogo, *Upravlenie bol'shimi sistemami : sb. tr. Spec. vyp. 44 – Naukometriya i e'kspertiza v upravlenii naukoj*, [pod red. D. A. Novikova, A. I. Orlova, P. Yu. Chebotareva]. Moscow, IPU RAN, 2013, pp. 262–278.
16. List of languages by total number of speakers [Electronic resource]. Access mode: https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_languages_by_total_number_of_speakers.
17. Rekomendacii EASE (Evropejskoj asociacii nauchnyx redaktorov) dlya avtorov i perevodchikov nauchnyx statej, kotorye dolzhny byt' opublikovany na anglijskom yazyke [E'lektronnyj resurs], 16 p. Rezhim dostupa: http://www.ease.org.uk/sites/default/files/ease_guidelines-june2014-russian.pdf
18. The UDC Summary [Electronic resource]. Access mode: <http://www.udcc.org/udccsummary/php/index.php?lang=ru&pr=Y>

НЕЙРОІНФОРМАТИКА ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ

НЕЙРОІНФОРМАТИКА И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

NEUROINFORMATICS AND INTELLIGENT SYSTEMS

UDC 004.9

Romanuke V. V.

D. Sc., Professor of Khmelnytskyi National University, Ukraine

PARAMETRIZATION OF THE OPTICAL FLOW CAR TRACKER WITHIN MATLAB COMPUTER VISION SYSTEM TOOLBOX FOR VISUAL STATISTICAL SURVEILLANCE OF ONE-DIRECTION ROAD TRAFFIC

A computer vision problem is considered. The prototype is the optical flow car tracker within MATLAB Computer Vision System Toolbox, tracking cars in one-direction road traffic. For adapting the tracker to work with other problems of moving cars stationary-camera-detection, having different properties (video length, resolution, velocity of those cars, camera disposition, prospect), it is parametrized. Altogether there are 19 parameters in the created MATLAB function, fulfilling the tracking. Eight of them are influential regarding the tracking results. Thus, these influential parameters are ranked into a nonstrict order by the testing-experience-based criterion, where other videos are used. The preference means that the parameter shall be varied above all the rest to the right side of the ranking order. The scope of the developed MATLAB tool is unbounded when objects of interest move near-perpendicularly and camera is stationary. For cases when camera is vibrating or unfixated, the parametrized tracker can fit itself if vibrations are not wide. Under those restrictions, the tracker is effective for visual statistical surveillance of one-direction road traffic.

Keywords: computer vision, optical flow, one-direction road traffic, car tracker, MATLAB function parametrization, visual statistical surveillance.

NOMENCLATURE

CAMS is a continuously adaptive mean shift;

CVST is Computer Vision System Toolbox™;

KLT is Kanade-Lucas-Tomasi;

MCSCD is a moving cars stationary-camera-detection;

MNF are motion numerical features;

OFCT is an optical flow car tracker;

VSS is visual statistical surveillance;

A is an algorithm used to compute optical flow;

a_{blob} is a ratio between area of the blob and area of the bounding box;

b_{max} is a maximum blob area in pixels;

b_{min} is a minimum blob area in pixels;

b_{offset} is a border offset in plotting motion vectors;

c_{max} is a maximum number of blobs in the input image;

d_{col} is a step through horizontal axis, when coordinates are generated for plotting motion vectors;

d_{frame} is a number of frames between reference frame and current frame;

d_{line} is a distance between centers of structuring element members at opposite ends of the line;

d_{row} is a step through vertical axis, when coordinates are generated for plotting motion vectors;

F_0 is a set of OFCT attributes;

\bar{F} is a narrowed and ranked set of relevant OFCT parameters;

g_{motion} is a motion vectors gain;

$N_{\text{moment}}(t)$ is a number of cars intersecting an appropriate region at a moment t ;

$N_{\text{total}}(t)$ is a total number of cars intersected the line all over the video (first) frames;

r_{blob} is a marginal ratio in classifying the blob as a car;

r_{factor} is a frame scaling percentage;

T is a total number of frames;

t is a moment (a frame);

v_{th} is a velocity threshold, computed from the matrix of complex velocities;

w is a width (in pixels) of a square structuring element;

x_{max} is maximal deviation ratio of the bounding box through horizontal axis;

y_{end} is a value of ordinate in the frame, where tracking ends;

y_{\max} is maximal deviation ratio of the bounding box through vertical axis;

y_{start} is a value of ordinate in the frame, where tracking starts;

α_{line} is an angle of the line as measured in a counterclockwise direction from the horizontal axis;

γ is a binary classification factor;

θ is a time unit.

INTRODUCTION

Computer vision is an inseparable and high-promising part of automation. This is a very huge scientific field, included methods for acquiring, processing, analyzing, and understanding multi-dimensional data from the real world in order to produce decisions as numerical or symbolic information [1, 2]. Particularly, these data are images and frames from video sequences, views from cameras, or plane projections from scanners. Computer vision efficiently uses utilities and facilities of applied mathematics, machine learning and artificial intelligence, image and signal processing [1, 3, 4]. Being scientific-technological discipline, computer vision renders its theories and models to the construction of computer vision systems. Such systems mainly are designed for controlling industrial processes, autonomous vehicle navigation, detecting events for VSS, organizing imaged and databased information, analyzing and modeling topographical environments, computer-human interaction [1, 5, 6].

The being described application areas employ a few contemporary general problems of computer vision, whose resolution depends on the application requirements and approaches in solving. Typically, these problems are recognition, motion analysis, scene reconstruction, image restoration. Computer vision system methods for solving them issue from multi-dimensional data acquisition, preprocessing, feature extraction, detection, segmentation, high-level processing. Eventually, the final decision required for the application is made.

Before computer vision system projection, using hardware (power sources, multi-dimensional data acquisition devices, processors, control and communication cables, wireless interconnectors, monitors, illuminators) anyway, its work must be modeled in order to heed of the application area unpredictable specificities. Up-to-date MATLAB® environment grants a powerful CVST, providing algorithms and tools for the design and simulation of computer vision and video processing systems [4, 7, 8]. CVST proposes a lot of MATLAB® functions, MATLAB System objects™, and Simulink® blocks for feature extraction, motion detection, object detection, object tracking, stereo vision, video processing, and video analysis. Its tools include video file input/output, video display, drawing graphics, and compositing. For rapid prototyping and embedded system design, CVST supports fixed-point arithmetic and C code generation. Also there are demos, showing advantages of CVST. Some of those demos are a good basis for projecting real computer vision systems. However, for doing that there sometimes are not enough evident parameters, whose values might have been adjusted for other tasks within the regarded computer vision problem class. One of the classes, demonstrated in CVST, is the optical flow object tracking [2, 3, 9, 10].

When studying methods of tracking the object and motion estimation, one of the key demos in CVST is OFCT. This demo tracks cars in a one-direction road traffic video by detecting motion using the optical flow methods [2, 11, 12]. These methods, trying to calculate the motion between two image frames which are taken at neighboring times at every voxel position, are based on local Taylor series approximations [2, 3, 13] of the image signal. They use partial derivatives with respect to the spatial and temporal coordinates. The cars are segmented from the background by thresholding the motion vector magnitudes. Then, blob analysis is used to identify the cars [1, 14, 15].

A blob is an image region in which some properties are constant or vary within a prescribed range of values. All the points in a blob can be considered in some sense to be similar to each other. Blob detection refers to mathematical methods that are aimed at detecting image regions that differ in properties, such as brightness or color, compared to areas surrounding those regions. Given some property of interest expressed as a function of position on the digital image, there are two main classes of blob detectors [14, 16, 17]. The first class is differential methods, which are based on derivatives of the function with respect to position. The second class is methods based on finding the local maxima and minima of the function.

CVST algorithms for video tracking are CAMS and KLT ones [2, 4, 18, 19]. CAMS uses a moving rectangular window that traverses the back projection of an object's color histogram to track the location, size, and orientation of the object from frame to frame. KLT tracks a set of feature points from frame to frame and can be used in video stabilization, camera motion estimation, and object tracking applications. CVST also provides an extensible framework to track multiple objects in a video stream. It includes Kalman filtering to predict a physical object's future location, reduce noise in the detected location, and help associate multiple objects with their corresponding tracks [2, 3, 19]. The Hungarian algorithm is for assigning object detections to tracks [20]. Blob analysis and foreground detection is used for moving object detection. Additionally, there are annotation capabilities to visualize object location and to add object label.

Motion estimation is the process of determining the movement of blocks between adjacent video frames. CVST provides a variety of motion estimation algorithms –optical flow, block matching, template matching. These algorithms create motion vectors, which relate to the whole image, blocks, arbitrary patches, or individual pixels [21, 22]. The evaluation metrics, for finding the best match in the block and template matching, includes particularly mean-square error principle [2, 3, 21, 23, 24].

OFCT within CVST shows how moving objects are detected with a stationary camera. In series of video frames, optical flow is calculated and detected motion is shown by overlaying the flow field on top of each frame. But OFCT takes the specified series of 121 video frames, and so this demo cannot be applied outright for other moving cars videos with different frames' number or distinct frame size. Besides, OFCT didn't offer a numerical feature of motion results in the video frames series, except instant calculation of objects intersecting an early horizontal line at a moment.

Therefore OFCT should be parametrized for getting some needful numerical features of motion results in the video frames series, and for resolving at least slightly different tasks of MCSCD.

1 PROBLEM STATEMENT

Our goal is to view and rank the clue parameters in OFCT for parametrizing it within MATLAB CVST, what is going to be adapted for working with other MCSCD problems, having different properties (video length, resolution, velocity of those cars, camera disposition, prospect). Nominally, from the given set F_0 of OFCT attributes, we must yield a set of relevant OFCT parameters, whereupon this set is narrowed and ranked to \bar{F} . Formally, this is a map $\rho(F_0) = \bar{F}$, ensuring true MNF of videos. Parametrization of OFCT within MATLAB CVST by adding the MNF will allow projecting a computer vision system for VSS of one-direction road traffic. This is very important problem in organizing and optimizing the road traffic for its safety.

The successive components of the said goal are the following. Firstly, there must be structuring and algorithmization of information processing stages when one-direction road traffic is video-analyzed. Then, for VSS, MNF at OFCT windows should be added. And, eventually, the parametrized OFCT is going to be tested on another video.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

Structurally, video information processing is divided into four items [2, 3, 8]:

- 1) extraction of the foreground;
- 2) extraction and classification of moving objects;
- 3) tracking trajectories of the revealed objects;
- 4) recognition and description of objects-of-interest activity.

Conventionally, the video foreground is of moving objects or regions. So, extraction of the foreground consists in separating moving fragments of the view from the motionless ones. These ones, being stationary objects or regions, are background of the view. Accuracy at this stage predetermines whether a computer vision problem is going to be satisfactorily solved. And nearly the best accuracy in selecting moving objects can be ensured with the optical flow methods [2, 3, 9]. The foreground extraction stage predetermines also the requirements to computational resources that may be needed at the rest three stages.

At the second stage, the extracted foreground is segmented. Each segment is a compact region whose pixels move at approximately equal velocities. Before segmentation the image is filtered for reducing noise, including impulse noise [1, 4, 25, 26]. Median filter as nonlinear digital filtering technique is usually invoked for noise reduction, running through the image entry by entry, and replacing each entry with the median of neighboring entries [26, 27]. For removing image defects (non-compactness), morphological dilatation and erosion over segments are fulfilled [1]. Subsequently, contours of the selected segments become smoother and they contain minimal quantity of spaces (gaps) within the object. Then those segmented regions, being moving objects, are classified. The classification is rough, meaning that its result is the moving object's type – a man, a car, an animal, etc.

At the third stage, the revealed objects' trajectories are tracked. For the tracking fulfillment, the one-to-one correspondence between the revealed objects on successive frames must be determined.

Finally, there are recognition and description of the revealed-and-tracked objects. In particular, for a task of MCSCD, it is VSS. Here, major MNF are number $N_{\text{moment}}(t)$ of cars intersecting an appropriate region (for instance, horizontal line) at a moment t , and total number $N_{\text{total}}(t)$ of cars intersected the line all over the video (first) frames:

$$N_{\text{total}}(t) = \sum_{\tau=1}^t N_{\text{moment}}(\tau) \text{ by } t = \overline{1, T} \quad (1)$$

and the total number of frames T , where the moment t corresponds to the t -th video frame. The feature $N_{\text{moment}}(t)$ is the varying number of the currently surveyed cars. The feature (1) is the aggregate of the surveillance. And for frame frequency per a time unit θ (how many frames pass per second, minute, hour, etc) there can be counted the motion T -intensity

$$\lambda(T) = \frac{\theta \cdot N_{\text{total}}(T)}{T} = \frac{\theta \cdot \sum_{t=1}^T N_{\text{moment}}(t)}{T}, \quad (2)$$

implying how many cars intersect the line on average in the time unit θ (second, minute, hour, etc).

3 MATERIALS AND METHODS

The video in MATLAB OFCT demo has resolution 120-by-160, where the one-direction road traffic runs approximately vertically. Stages of this video processing are the said above within the processing loop to track cars along the series of 121 video frames. Initially the optical flow estimates direction and speed of motion. The optical flow vectors are stored as complex numbers, and the velocity threshold from the matrix of complex velocities is computed. Then median filter removes speckle noise introduced during thresholding and segmentation. For thinning out the parts of the road and other unwanted objects and filling holes in the blobs, there are applied morphological erosion and closing methods. After that the blob analysis method estimates the area and bounding box of the blobs, filtering out objects which cannot be cars with binary classification factor

$$\gamma = \frac{\text{sign}(a_{\text{blob}} - r_{\text{blob}}) + 1}{2} \cdot \text{sign}(a_{\text{blob}} - r_{\text{blob}}) \quad (3)$$

by $r_{\text{blob}} = 0.4$, where a_{blob} is the ratio between area of the blob and area of the bounding box, and r_{blob} is the marginal ratio in classifying the blob as a car. Due to (3), if $\gamma = 1$ then the blob is the car, otherwise the blob is ignored. The tracked cars are drawn around with bounding boxes.

Having analyzed the MATLAB code of OFCT demo, there in Table 1 are its input parameters.

The original MATLAB OFCT demo displays just $N_{\text{moment}}(t)$ and no MNF are returned. There are created

CVST objects to display the original video, motion vector video, the thresholded video and the final result. $N_{\text{moment}}(t)$ is displayed in the viewer named «Results» (Figure 1) in its left upper corner.

As it is well seen the demo is not ideal – there is the missed front car, without box bounding it, and $N_{\text{moment}}(73) = 2$ is returned instead of $N_{\text{moment}}(73) = 3$.

Table 1 – Parameters in MATLAB OFCT demo

MATLAB OFCT parameter name	Assignment	Math symbol	Value	Restriction
filename	name of the file, containing video T frames from a stationary camera	–	viptraffic.avi	video file with the supported extension
ReferenceFrameDelay	number of frames between reference frame and current frame, when optical flow method is applied	d_{frame}	3	$d_{\text{frame}} \in \mathbb{N}$
–	distance between the centers of the structuring element members at opposite ends of the line, when a flat linear structuring element that is symmetric with respect to the neighborhood center is created	d_{line}	5	–
–	angle (in degrees) of the line as measured in a counterclockwise direction from the horizontal axis, when a flat linear structuring element that is symmetric with respect to the neighborhood center is created	α_{line}	45	–
MinimumBlobArea	minimum blob area in pixels	b_{min}	250	$b_{\text{min}} \in \mathbb{N} \cup \{0\}$
MaximumBlobArea	maximum blob area in pixels	b_{max}	3600	$b_{\text{max}} \geq b_{\text{min}}, b_{\text{max}} \in \mathbb{N}$
MaximumCount	maximum number of blobs in the input image	c_{max}	80	$c_{\text{max}} \in \mathbb{N}$
–	width (in pixels) of a square structuring element, when morphological erosion object is created for removing portions of the road and other unwanted objects	w	2	$w \in \mathbb{N} \cup \{0\}$
ResizeFactor	for percentage scaling of the frame	r_{factor}	100	$r_{\text{factor}} > 0$
lineRow	value of ordinate in the frame, where tracking starts	l_{row}	22	$l_{\text{row}} \in \mathbb{N}, l_{\text{row}} < V$ by video resolution $V \times H$
motionVecGain	for gaining motion vectors	g_{motion}	20	$g_{\text{motion}} > 0$
borderOffset	border offset in plotting motion vectors	b_{offset}	5	$b_{\text{offset}} \in \min\{V, H\}$
decimFactorRow	step through vertical axis, when coordinates are generated for plotting motion vectors	d_{row}	5	$d_{\text{row}} \in \overline{1, V-1}$
decimFactorCol	step through horizontal axis, when coordinates are generated for plotting motion vectors	d_{col}	5	$d_{\text{col}} \in \overline{1, H-1}$
–	ratio between area of the blob and area of the bounding box, which is marginal in classifying the blob as a car	r_{blob}	0.4	$r_{\text{blob}} \in (0; 1)$
–	scales the velocity threshold, computed from the matrix of complex velocities	v_{th}	0.5	$v_{\text{th}} > 0$

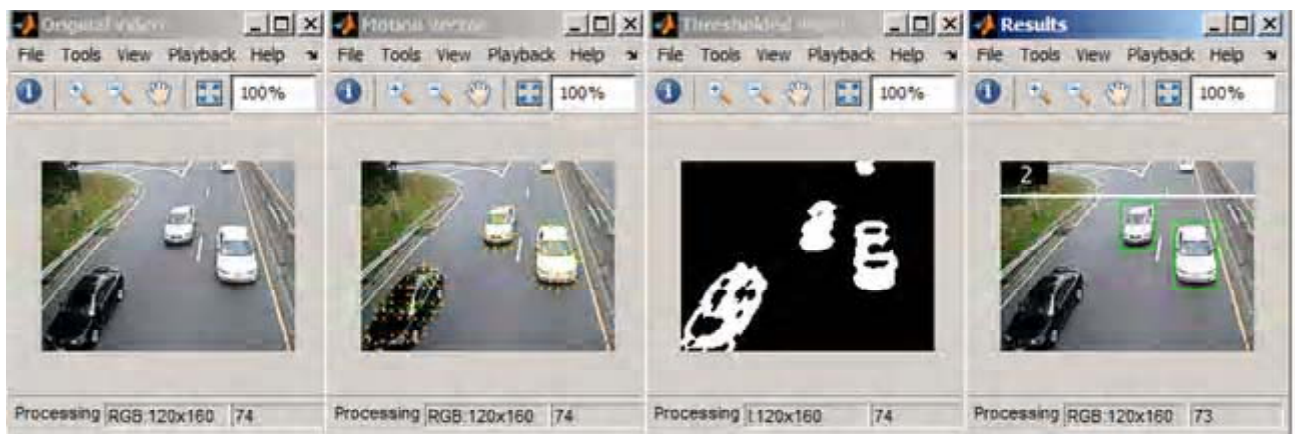


Figure 1 – Four viewers, visualizing the running MATLAB OFCT demo

Therefore the MATLAB OFCT demo may be modified over one or several parameters from the set

$$P = \{d_{\text{frame}}, d_{\text{line}}, \alpha_{\text{line}}, b_{\text{min}}, b_{\text{max}}, c_{\text{max}}, w, l_{\text{row}}, g_{\text{motion}}, b_{\text{offset}}, d_{\text{row}}, d_{\text{col}}, r_{\text{blob}}, v_{\text{th}}\} \quad (4)$$

of them. And for adding MNF at OFCT the new parameters $\{y_{\text{start}}, y_{\text{end}}\}$ are introduced, where $y_{\text{start}} = l_{\text{row}}$ and y_{end} is value of ordinate in the frame, whereupon tracking stops. Surely, $y_{\text{end}} > y_{\text{start}}$. Another two parameters being introduced are $\{x_{\text{max}}, y_{\text{max}}\}$ allowing to adjust the tracking to the car deviation through horizontal axis and vertical axis. Here x_{max} is maximal deviation ratio of the bounding box through horizontal axis, and y_{max} is maximal deviation ratio of the bounding box through vertical axis. Furthermore, the algorithm A used to compute optical flow ought to be specified. The available

ones are algorithms of Horn–Schunck and of Lucas-Kanade. Thus, the set of parameters (Table 2)

$$P_* = \{A, y_{\text{start}}, y_{\text{end}}, x_{\text{max}}, y_{\text{max}}\} \quad (5)$$

is attached to the subset $P \setminus \{l_{\text{row}}\}$.

The modified OFCT code screenshot is in Figure 2. Having been made as a MATLAB function, it works with other MCSCD problems. But primarily it should to be adjusted to the problem, slightly changing 19 parameters (name of the file is not reckoned in) in sets (4) and (5). These parameters are input in the following order:

$\{A, d_{\text{frame}}, r_{\text{factor}}, w, d_{\text{line}}, \alpha_{\text{line}}, b_{\text{min}}, b_{\text{max}}, c_{\text{max}}, y_{\text{start}}, y_{\text{end}}, r_{\text{blob}}, x_{\text{max}}, y_{\text{max}}, g_{\text{motion}}, b_{\text{offset}}, d_{\text{row}}, d_{\text{col}}, v_{\text{th}}\}$ and the video file name is input at the front of them.

Table 2 – Adjustable parameters attached to the MATLAB OFCT demo

MATLAB OFCT parameter name	Assignment	Math symbol	Restriction
OpticalFlowMethod	algorithm used to compute optical flow	A	either algorithm of Horn-Schunck (string name «Horn-Schunck») or of Lucas-Kanade (string name «Lucas-Kanade»)
lineStart	value of ordinate in the frame, where tracking starts	y_{start}	$y_{\text{start}} \in \mathbb{N}, y_{\text{start}} < V$ by video resolution $V \times H$
lineEnd	value of ordinate in the frame, where tracking ends	y_{end}	$y_{\text{end}} \in \mathbb{N}, y_{\text{end}} > y_{\text{start}}, y_{\text{end}} < V$
xDeviationMax	maximal deviation ratio of the bounding box through horizontal axis	x_{max}	$x_{\text{max}} \in (0; 1)$
yDeviationMax	maximal deviation ratio of the bounding box through vertical axis	y_{max}	$y_{\text{max}} \in (0; 1)$

```
function [hVideo4] = ofct(filename, OpticalFlowMethod, ReferenceFrameDelay, ResizeFactor, w, d_line,
alpha_line, ...
        MinimumBlobArea, MaximumBlobArea, MaximumCount, lineStart, lineEnd,
r_blob, xDeviationMax, yDeviationMax, ...
        motionVecGain, borderOffset, decimFactorRow, decimFactorCol, v_th)

% Create the System objects outside of the main video processing loop.
% Object for reading video file.
hVidReader = vision.VideoFileReader(filename, 'ImageColorSpace', 'RGB', 'VideoOutputDataType',
'single');

% Optical flow object for estimating direction and speed of object motion.
hOpticalFlow = vision.OpticalFlow( ...
    'OutputValue', 'Horizontal and vertical components in complex form', 'Method',
OpticalFlowMethod, 'ReferenceFrameDelay', ReferenceFrameDelay); %ReferenceFrameDelay=3;

% Create two objects for analyzing optical flow vectors.
hMean1 = vision.Mean; hMean2 = vision.Mean('RunningMean', true);

% Filter object for removing speckle noise introduced during segmentation.
hMedianFilt = vision.MedianFilter;

% Morphological closing object for filling holes in blobs.
hclose = vision.MorphologicalClose('Neighborhood', strel('line', d_line, alpha_line));

% Create a blob analysis System object to segment cars in the video.
hblob = vision.BlobAnalysis('CentroidOutputPort', false, 'AreaOutputPort', true,
'BoundingBoxOutputPort', true, 'OutputDataType', 'double', ...
    'MinimumBlobArea', MinimumBlobArea, 'MaximumBlobArea', MaximumBlobArea,
'MaximumCount', MaximumCount);

% Morphological erosion object for removing portions of the road and other unwanted objects.
herode = vision.MorphologicalErode('Neighborhood', strel('square', w)); %strel('square', 2)

% Create objects for drawing the bounding boxes and motion vectors.
hshapeins1 = vision.ShapeInserter('BorderColor', 'Custom', 'CustomBorderColor', [0 1 0]);
hshapeins2 = vision.ShapeInserter('Shape', 'Lines', 'BorderColor', 'Custom', 'CustomBorderColor',
[255 255 0]);
```

Figure 2 – The modified MATLAB OFCT code, made as MATLAB function «ofct» with 19 adjustable parameters

The flaw concerning the 73-th frame of the video in original MATLAB OFCT demo is remedied by launching the modified MATLAB OFCT code as follows (from the MATLAB Command Window prompt):

```
ofct('viptraffic.avi', 'Horn-Schunck', 1,
    150, 2, 5, 45, 400, 3600, 40, 22, 130,
    0.35, 0.3, 0.7, 20, 5, 5, 5, 0.5).
```

Now the previously missed front car is captured and $N_{\text{moment}}(73) = 3$ is returned as well (Figure 3). And there are no missed or defectively-tracked cars anymore.

Hereinafter, we will test the OFCT parametrized under (4) and (5) for seeing how MATLAB function “ofct” performs on other MCSCD problems for VSS of one-direction road traffic. But the part of empirical adjustment is omitted. The omission cause is that the adjustment is not routine.

4 EXPERIMENTS

For testing the parametrized OFCT, diverse videos containing one-direction road traffic have been explored. It is noteworthy that the road view is not always straight perpendicular. Figure 4 shows that cars are successfully tracked when they move non-perpendicularly having different velocities and accelerations. At that, the input arguments of the being invoked parametrized OFCT are just slightly different. For instance, there are invocations:

```
ofct('test1.avi', 'Horn-Schunck', 1, 100,
    2, 5, 45, 200, 4000, 40, 22, 250, 0.5, 0.3,
    0.6, 20, 1, 1, 1, 0.1)
```

and

```
ofct('test2.avi', 'Horn-Schunck', 1, 100,
    2, 5, 45, 200, 8000, 40, 22, 250, 0.3, 0.3,
    0.8, 20, 1, 1, 1, 0.4)
```

at the MATLAB Command Window prompt.

While testing, some parameters from the set $\{P \setminus \{l_{\text{row}}\}\} \cup P^*$ are not varied at all. And variation of some parameters does not influence on the tracking visibly. Particularly, algorithm of Lucas-Kanade for computing optical flow is non-effective. Such non-influential parameters are in the set

$$\{A, d_{\text{frame}}, w, d_{\text{line}}, \alpha_{\text{line}}, c_{\text{max}}, g_{\text{motion}}, b_{\text{offset}}, d_{\text{row}}, d_{\text{col}}, v_{\text{th}}\}.$$

On the contrary, values of parameters

$$\{r_{\text{factor}}, b_{\text{min}}, b_{\text{max}}, y_{\text{start}}, y_{\text{end}}, r_{\text{blob}}, x_{\text{max}}, y_{\text{max}}\} \quad (6)$$

influence on the tracking much. Mostly, it is sensitive to r_{factor} , b_{min} , b_{max} , r_{blob} , x_{max} , y_{max} . Reasonable values of y_{start} and y_{end} depend rather than on video resolution and the road disposition.

5 RESULTS

Guided by the testing experience, the influential parameters (6) are ranked as

$$(x_{\text{max}} \sim y_{\text{max}}) \succ (b_{\text{min}} \sim b_{\text{max}}) \succ r_{\text{blob}} \succ r_{\text{factor}} \succ (y_{\text{start}} \sim y_{\text{end}}) \quad (7)$$

pointing to their importance. The nonstrict order (7) means that the couple $\{x_{\text{max}}, y_{\text{max}}\}$ should (is advised to) be adjusted first. Then goes the couple $\{b_{\text{min}}, b_{\text{max}}\}$ defining the size of blob area. Naturally, the marginal ratio r_{blob} in (3) for classifying the blob as a car is near to $\{b_{\text{min}}, b_{\text{max}}\}$. The frame scaling r_{factor} is more important to set adjusted before putting $\{y_{\text{start}}, y_{\text{end}}\}$ because is global-like.

6 DISCUSSION

The parametrized OFCT should be adjusted for every new MCSCD problem. Fundamentally, the scope of this MATLAB tool is unbounded when objects of interest move

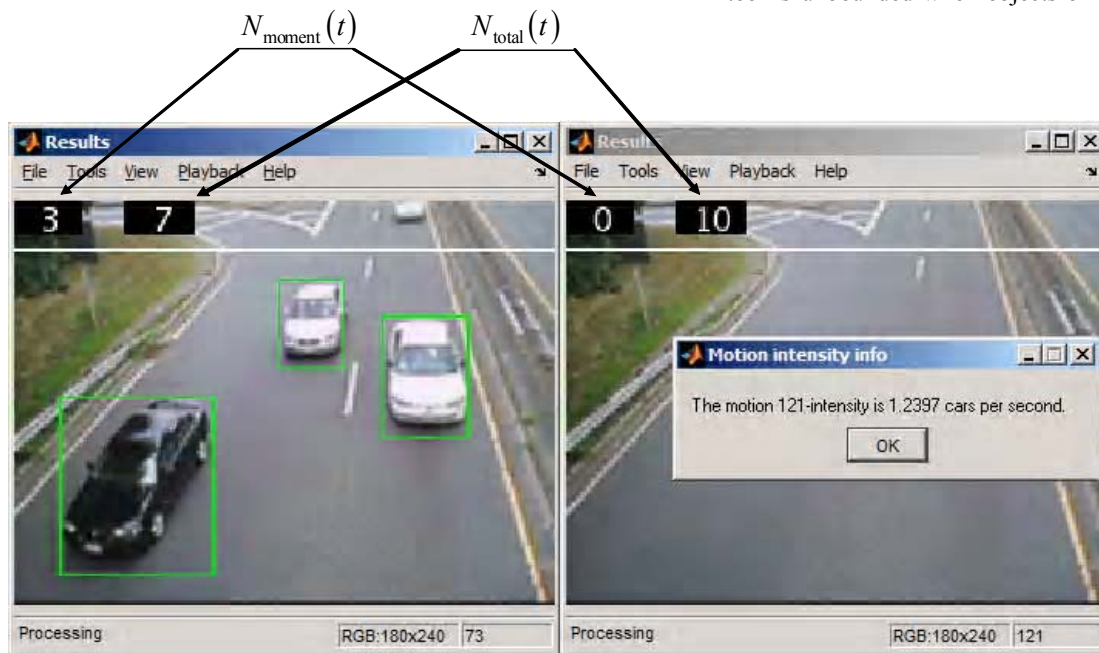


Figure 3 – The fourth viewer «Results», visualizing MNF $N_{\text{moment}}(t)$ and (1) by the message box with (2) for MCSCD problem on video «viptraffic.avi» from MATLAB OFCT demo



Figure 4 – Snapshots off the viewer «Results», visualizing the running OFCT by MATLAB function «ofct» on other MCSCD problems for VSS of one-direction road traffic

near-perpendicularly (but not horizontally or close to that) and camera is stationary. Nonetheless, adjustment even on the foremost couple $\{x_{\max}, y_{\max}\}$ by (7) may take substantial time. And tracking any vehicles is handled harder.

VSS of bigger vehicles causes a new problem. Trucks having long trailers may be split into a few blobs and thus the big long vehicle is tracked as two or more. Another great problem is that the rectangular bounding box sometimes disappears for a frame or two and then appears again. This effect may cause a fail of MNF calculation.

For cases when camera is vibrating or unfixed, the parametrized OFCT can fit itself if vibrations are not wide. However, the influential parameters (6) and their order (7) may become incomplete. Wider ranges of the camera vibration will require either to re-rank the elements of the set (6) or to re-select influential parameters from the set $\{P \setminus \{t_{\text{row}}\}\} \cup P^*$. The frame scaling r_{factor} will probably become crucial exceeding both r_{blob} and $\{b_{\min}, b_{\max}\}$.

CONCLUSIONS

The testing-experience-based criterion of ranking OFCT parameters has allowed to reduce the set of 19 non-arranged elements down to eight ones (6) ordered as (7). The advantage (preference) means that the parameter (of the couple) shall be varied above all the rest (to the right side of the ranking order). At that, there is no preference inside of the couples $\{x_{\max}, y_{\max}\}$, $\{b_{\min}, b_{\max}\}$, $\{y_{\text{start}}, y_{\text{end}}\}$, and their elements are likely to be varied simultaneously.

The adjustment is that naive heuristic optimization of values in (6) giving true $\{N_{\text{moment}}(t)\}_{t=1}^T$ and MNF (1) for an MCSCD problem. This is possible owing to parametrization of the OFCT within MATLAB CVST whose corollary is the ranking (7). Consequently, MCSCD problems are solved via MATLAB function «ofct». These primitives are indispensable to projecting a computer vision system for VSS of one-direction road traffic and ensuring its safety.

For general VSS of one-direction road traffic, the parametrized MATLAB function «ofct» is not going to be used straight off. The explanation lies in that the objects-of-interest activity is the cars' movement which must be almost perpendicular, and camera disposition ought to hang over the road (hanging not low). Hence, the promising research is in adapting the developed MATLAB tool for tracking vehicles of any form and size, moving in one-direction under arbitrarily disposed camera.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work is technically supported by the Parallel Computing Center at Khmelnytskyi National University (<http://parallelcompute.sourceforge.net>).

REFERENCES

1. Parker J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision / J. R. Parker. – Indianapolis : Wiley, 2011. – 480 p.
2. Klette R. Concise Computer Vision. An Introduction into Theory and Algorithms / R. Klette. – London : Springer, 2014. – 429 p.
3. Forsyth D. A. Computer Vision. A Modern Approach / D. A. Forsyth, J. Ponce. – New Jersey : Pearson, 2012. – 761 p.
4. Sonka M. Image Processing, Analysis, and Machine Vision / M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle. – Toronto : Thomson, 2008. – 829 p.
5. Mohr J. A computer vision system for rapid search inspired by surface-based attention mechanisms from human perception / J. Mohr, J.-H. Park, K. Obermayer // *Neural Networks*. – 2014. – Vol. 60. – P. 182–193. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2014.08.010>
6. Cyganek B. Hybrid computer vision system for drivers' eye recognition and fatigue monitoring / B. Cyganek, S. Gruszczynski // *Neurocomputing*. – 2014. – Vol. 126. – P. 78 – 94. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2013.01.048>
7. Park M.-W. Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers / M.-W. Park, I. Brilakis // *Automation in Construction*. – 2012. – Vol. 28. – P. 15–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.001>
8. Balasubramanian A. Utilization of Robust Video Processing Techniques to Aid Efficient Object Detection and Tracking / A. Balasubramanian, S. Kamate, N. Yilmazer // *Procedia Computer Science*. – 2014. – Vol. 36. – P. 579 – 586. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.057>
9. Bhattacharyya S. High-speed target tracking by fuzzy hostility-induced segmentation of optical flow field / S. Bhattacharyya, U. Maulik, P. Dutta // *Applied Soft Computing*. – 2009. – Vol. 9, Issue 1. – P. 126–134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2008.03.012>
10. Cortical surface shift estimation using stereovision and optical flow motion tracking via projection image registration / [S. Ji, X. Fan, D. W. Roberts, A. Hartov, K. D. Paulsen] // *Medical Image Analysis*. – 2014. – Vol. 18, Issue 7. – P. 1169–1183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2014.07.001>
11. A self-adaptive optical flow method for the moving object detection in the video sequences / [Y. Xin, J. Hou, L. Dong, L. Ding] // *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*. – 2014. – Vol. 125, Issue 19. – P. 5690–5694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.092>
12. Xiong J.-Y. An Improved Optical Flow Method for Image Registration with Large-scale Movements / J.-Y. Xiong, Y.-P. Luo, G.-R. Tang // *Acta Automatica Sinica*. – 2008. – Vol. 34, Issue 7. – P. 760 – 764. DOI: <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1004.2008.00760>

13. Wolfinger R. D. Two Taylor-series approximation methods for nonlinear mixed models / R. D. Wolfinger, X. Lin // *Computational Statistics & Data Analysis*. – 1997. – Vol. 25, Issue 4. – P. 465–490. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473\(97\)00012-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473(97)00012-1)
14. Automated detection of microaneurysms using scale-adapted blob analysis and semi-supervised learning / [K. M. Adal, D. Sidibé, S. Ali, E. Chaum, T. P. Karnowski, F. Mériaudeau] // *Computer Methods and Programs in Biomedicine*. – 2014. – Vol. 114, Issue 1. – P. 1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.009>
15. Leitner R. Real-time classification of polymers with NIR spectral imaging and blob analysis / R. Leitner, H. Mairer, A. Kercek // *Real-Time Imaging*. – 2003. – Vol. 9, Issue 4. – P. 245–251. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rti.2003.09.016>
16. Ferraz L. A sparse curvature-based detector of affine invariant blobs / L. Ferraz, X. Binefa // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2012. – Vol. 116, Issue 4. – P. 524–537. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2011.12.002>
17. Sclaroff S. Active blobs: region-based, deformable appearance models / S. Sclaroff, J. Isidoro // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2003. – Vol. 89, Issues 2–3. – P. 197–225. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1077-3142\(03\)00003-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1077-3142(03)00003-1)
18. Mean shift based gradient vector flow for image segmentation / [H. Zhou, X. Li, G. Schaefer, M. E. Celebi, P. Miller] // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2013. – Vol. 117, Issue 9. – P. 1004–1016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2012.11.015>
19. Bagherpour P. Upper Body Tracking Using KLT and Kalman Filter / P. Bagherpour, S. A. Cheraghi, M. bin Mohd Mokji // *Procedia Computer Science*. – 2012. – Vol. 13. – P. 185–191. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.127>
20. Jonker R. Improving the Hungarian assignment algorithm / R. Jonker, T. Volgenant // *Operations Research Letters*. – 1986. – Vol. 5, Issue 4. – P. 171–175. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377\(86\)90073-8](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377(86)90073-8)
21. A Comparison of Different Block Matching Algorithms for Motion Estimation / [R. Yaakob, A. Aryanfar, A. A. Halin, N. Sulaiman] // *Procedia Technology*. – 2013. – Vol. 11. – P. 199–205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protecy.2013.12.181>
22. Park C.-S. Level-set-based motion estimation algorithm for multiple reference frame motion estimation / C.-S. Park // *Journal of Visual Communication and Image Representation*. – 2013. – Vol. 24, Issue 8. – P. 1269–1275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.08.008>
23. Frasca P. On the mean square error of randomized averaging algorithms / P. Frasca, J. M. Hendrickx // *Automatica*. – 2013. – Vol. 49, Issue 8. – P. 2496–2501. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.04.035>
24. Perez F. L. An improved mean-square weight deviation-proportionate gain algorithm based on error autocorrelation / F. L. Perez, F. das Chagas de Souza, R. Seara // *Signal Processing*. – 2014. – Vol. 94. – P. 503–513. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.06.030>
25. Qiu Z. A new feature-preserving nonlinear anisotropic diffusion for denoising images containing blobs and ridges / Z. Qiu, L. Yang, W. Lu // *Pattern Recognition Letters*. – 2012. – Vol. 33, Issue 3. – P. 319–330. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.11.001>
26. Toprak A. Impulse noise reduction in medical images with the use of switch mode fuzzy adaptive median filter / A. Toprak, İ. Güler // *Digital Signal Processing*. – 2007. – Vol. 17, Issue 4. – P. 711–723. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2006.11.008>
27. Sebastiani G. A Bayesian approach for the median filter in image processing / G. Sebastiani, S. Stramaglia // *Signal Processing*. – 1997. – Vol. 62, Issue 3. – P. 303–309. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684\(97\)00131-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684(97)00131-X)

Article was submitted 26.01.2015.
After revision 02.02.2015.

Романюк В. В.

Д-р техн. наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна

ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ОТСЛЕЖИВАТЕЛЯ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ ПО ОПТИЧЕСКОМУ ПОТОКУ В MATLAB COMPUTER VISION SYSTEM TOOLBOX ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО СТАТИСТИЧЕСКОГО НАБЛЮДЕНИЯ ОДНОСТОРОННЕГО ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Рассматривается задача компьютерного зрения. Прототипом является отслеживатель легковых автомобилей по оптическому потоку в MATLAB Computer Vision System Toolbox, который отслеживает автомобили в одностороннем дорожном движении. Для приспособления отслеживателя к работе с другими задачами обнаружения движущихся легковых автомобилей неподвижной камерой, имеющих разные параметры (длительность видео, разрешение, скорость легковых автомобилей, расположение камеры, обзор), он параметризуется. В созданной MATLAB-функции, выполняющей отслеживание, всего насчитывается 19 параметров. Восемь из них оказывают решающее влияние на результаты отслеживания. Эти влияющие параметры соответственно ранжируются в некий нестрогий порядок по критерию на основании опыта тестирования с использованием других видео. Предпочтение означает то, что параметр должен изменяться первым перед другими в правой части порядка ранжирования. Возможности разработанного MATLAB-средства неограниченны при условии, когда соответствующие объекты осуществляют движение, близкое к перпендикулярному, и камера является неподвижной. В случаях, когда камера вибрирует или не закреплена, параметризованный отслеживатель способен подстраиваться, когда диапазон вибраций незначителен. При этих ограничениях отслеживатель эффективен для визуального статистического наблюдения одностороннего дорожного движения.

Ключевые слова: компьютерное зрение, оптический поток, одностороннее дорожное движение, отслеживатель легковых автомобилей, параметризация MATLAB-функции, визуальное статистическое наблюдение.

Романюк В. В.

Д-р техн. наук, професор, Хмельницький національний університет, Україна

ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ ВІДСТЕЖУВАЧА ЛЕГКОВИХ АВТОМОБІЛІВ ЗА ОПТИЧНИМ ПОТОКОМ У MATLAB COMPUTER VISION SYSTEM TOOLBOX ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО СТАТИСТИЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ОДНОСТОРОННЬОГО ДОРОЖНОГО РУХУ

Розглядається задача комп'ютерного зору. Прототипом є відстежувач легкових автомобілів за оптичним потоком у MATLAB Computer Vision System Toolbox, що відстежує автомобілі в односторонньому дорожньому русі. Для пристосування відстежувача до роботи з іншими задачами виявлення легкових автомобілів у русі нерухомою камерою, що мають різні параметри (тривалість відео, роздільність, швидкість легкових автомобілів, розташування камери, огляд), він параметризується. У створеній MATLAB-функції, що виконує відстеження, всього налічується 19 параметрів. Вісім з них є вельми впливовими на результати відстежування. Ці впливові параметри відповідно ранжуються у деякий нестрогий порядок за критерієм на основі досвіду тестування з використанням інших відео. Перевага означає те, що параметр має змінюватись першим за решту у правій частині порядку ранжування. Можливості розробленого

MATLAB-засобу необмежені за умови, коли відповідні об'єкти здійснюють рух, близький до перпендикулярного, і камера є нерухомою. У випадках, коли камера вібує або не закріплена, параметризований відстежувач здатен підлаштуватись, якщо діапазон вібрацій є незначним. За цих обмежень відстежувач є ефективним для візуального статистичного спостереження одностороннього дорожнього руху.

Ключові слова: комп'ютерний зір, оптичний потік, односторонній дорожній рух, відстежувач легкових автомобілів, параметризація MATLAB-функції, візуальне статистичне спостереження.

REFERENCES

- Parker J. R. Algorithms for Image Processing and Computer Vision. Second Edition, 2011, Wiley Publishing, Inc., 480 p.
- Klette R. Concise Computer Vision: An Introduction into Theory and Algorithms, 2014, Springer, 429 p.
- Forsyth D. A., Ponce J. Computer Vision. A Modern Approach. Second Edition, 2012, Pearson, 761 p.
- Sonka M., Hlavac V., Boyle R. Image Processing, Analysis, and Machine Vision. Third Edition, 2008, Thomson, 829 p.
- Mohr J., Park J.-H., Obermayer K. A computer vision system for rapid search inspired by surface-based attention mechanisms from human perception, *Neural Networks*, 2014, Vol. 60, pp. 182–193. <http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2014.08.010>
- Cyganek B., Gruszczyski S. Hybrid computer vision system for drivers' eye recognition and fatigue monitoring, *Neurocomputing*, 2014, Vol. 126, pp. 78–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.neucom.2013.01.048>
- Park M.-W., Brilakis I. Construction worker detection in video frames for initializing vision trackers, *Automation in Construction*, 2012, Vol. 28, pp. 15–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2012.06.001>
- Balasubramanian A., Kamate S., Yilmazer N. Utilization of Robust Video Processing Techniques to Aid Efficient Object Detection and Tracking, *Procedia Computer Science*, 2014, Vol. 36, pp. 579–586. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2014.09.057>
- Bhattacharyya S., Maulik U., Dutta P. High-speed target tracking by fuzzy hostility-induced segmentation of optical flow field, *Applied Soft Computing*, 2009, Vol. 9, Issue 1, pp. 126–134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2008.03.012>
- Ji S., Fan X., Roberts D. W., Hartov A., Paulsen K. D. Cortical surface shift estimation using stereovision and optical flow motion tracking via projection image registration, *Medical Image Analysis*, 2014, Vol. 18, Issue 7, pp. 1169–1183. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.media.2014.07.001>
- Xin Y., Hou J., Dong L., Ding L. A self-adaptive optical flow method for the moving object detection in the video sequences, *Optik – International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, Vol. 125, Issue 19, pp. 5690–5694. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.092>
- Xiong J.-Y., Luo Y.-P., Tang G.-R. An Improved Optical Flow Method for Image Registration with Large-scale Movements, *Acta Automatica Sinica*, 2008, Vol. 34, Issue 7, pp. 760–764. DOI: <http://dx.doi.org/10.3724/SP.J.1004.2008.00760>
- Wolfinger R. D., Lin X. Two Taylor-series approximation methods for nonlinear mixed models, *Computational Statistics & Data Analysis*, 1997, Vol. 25, Issue 4, pp. 465–490. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473\(97\)00012-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-9473(97)00012-1)
- Adal K. M., Sidibé D., Ali S., Chaum E., Karnowski T. P., Mériaudeau F. Automated detection of microaneurysms using scale-adapted blob analysis and semi-supervised learning, *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2014, Vol. 114, Issue 1, pp. 1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cmpb.2013.12.009>
- Leitner R., Mairer H., Kercek A. Real-time classification of polymers with NIR spectral imaging and blob analysis, *Real-Time Imaging*, 2003, Vol. 9, Issue 4, pp. 245–251. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rti.2003.09.016>
- Ferraz L., Binefa X. A sparse curvature-based detector of affine invariant blobs, *Computer Vision and Image Understanding*, 2012, Vol. 116, Issue 4, pp. 524–537. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2011.12.002>
- Sciaroff S., Isidoro J. Active blobs: region-based, deformable appearance models, *Computer Vision and Image Understanding*, 2003, Vol. 89, Issues 2–3, pp. 197–225. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1077-3142\(03\)00003-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1077-3142(03)00003-1)
- Zhou H., Li X., Schaefer G., Celebi M. E., Miller P. Mean shift based gradient vector flow for image segmentation, *Computer Vision and Image Understanding*, 2013, Vol. 117, Issue 9, pp. 1004–1016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cviu.2012.11.015>
- Bagherpour P., Cheraghi S. A., M. bin Mohd Mokji. Upper Body Tracking Using KLT and Kalman Filter, *Procedia Computer Science*, 2012, Vol. 13, pp. 185–191. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2012.09.127>
- Jonker R., Volgenant T. Improving the Hungarian assignment algorithm, *Operations Research Letters*, 1986, Vol. 5, Issue 4, pp. 171–175. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377\(86\)90073-8](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6377(86)90073-8)
- Yaakob R., Aryanfar A., Halin A. A., Sulaiman N. A Comparison of Different Block Matching Algorithms for Motion Estimation, *Procedia Technology*, 2013, Vol. 11, pp. 199–205. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.181>
- Park C.-S. Level-set-based motion estimation algorithm for multiple reference frame motion estimation, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 2013, Vol. 24, Issue 8, pp. 1269–1275. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvcir.2013.08.008>
- Frasca P., Hendrickx J. M. On the mean square error of randomized averaging algorithms, *Automatica*, 2013, Vol. 49, Issue 8, pp. 2496–2501. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.automatica.2013.04.035>
- Perez F. L., F. das Chagas de Souza, Seara R. An improved mean-square weight deviation-proportionate gain algorithm based on error autocorrelation, *Signal Processing*, 2014, Vol. 94, pp. 503–513. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.06.030>
- Qiu Z., Yang L., Lu W. A new feature-preserving nonlinear anisotropic diffusion for denoising images containing blobs and ridges, *Pattern Recognition Letters*, 2012, Vol. 33, Issue 3, pp. 319–330. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2011.11.001>
- Toprak A., İ. Güler. Impulse noise reduction in medical images with the use of switch mode fuzzy adaptive median filter, *Digital Signal Processing*, 2007, Vol. 17, Issue 4, pp. 711–723. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2006.11.008>
- Sebastiani G., Stramaglia S. A Bayesian approach for the median filter in image processing, *Signal Processing*, 1997, Vol. 62, Issue 3, pp. 303–309. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684\(97\)00131-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-1684(97)00131-X)

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦИИ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ МУРАВЬИНЫХ КОЛОНИЙ

Сегментация изображений является одной из самых важных и сложных задач низкоуровневого анализа изображений. Поскольку это один из первых этапов распознавания изображений, то последующие шаги, такие как выделение сущностей, классификация и распознавание, в значительной степени зависят от его результатов. Поэтому сегментация изображений является предметом интенсивных исследований.

Методов сегментации разработано большое число, но каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Перспективными для исследований представляются новые методы сегментации, основанные на методах роевого интеллекта (муравьиные и роевые алгоритмы, алгоритмы стаи рыб, алгоритмы оптимизации передвижением бактерий и т.п.). Данные алгоритмы основаны на идее моделирования поведения множества агентов, поведение которых исходит из природы, из биологических систем.

В представленной работе выполнены реализация и анализ смешанного алгоритма сегментации К-средних и муравьиных колоний, а также реализована программная система для визуализации и апробации разработанного алгоритма. Проведено тестирование разработанного алгоритма на общедоступных бенчмарках (использован бенчмарк Беркли).

Получены выходные обработанные изображения, а также значения эвристических коэффициентов разработанного алгоритма. Результаты обработки сравнены с результатами, полученными при обработке системой Osiriss.

Ключевые слова: сегментация, алгоритм муравьиных колоний, алгоритм К-средних, анализ изображений.

НОМЕНКЛАТУРА

АСО – алгоритм муравьиных колоний;

MRF – метод случайных полей Маркова;

СУБД – система управления базой данных;

$AvgCDist(k', i)$ – среднее значение цветовых расстояний, причина увеличения уровня феромона при большей однородности кластера;

$AvgPDist(k', i)$ – среднее значение пространственных евклидовых расстояний между каждым пикселем и центрами (цветовым и пространственным) для самого успешного муравья, причина увеличения уровня феромона при большей компактности кластера;

CC_i – i -й спектральный кластерный центр;

$CDist(X_n, CC_i)$ – расстояние между X_n и CC_i согласно цветовым характеристикам пикселей;

f_i – количество феромона в i -ом переходе;

K – количество кластеров;

k – константа, которая используется для балансировки значения η с τ ;

l_i – величина, обратная весу i -го перехода;

m – количество муравьев;

$Min(k')$ – минимальное из цветовых дистанций между каждыми двумя центрами кластеров, найденное муравьем k' (самым успешным муравьем), причина увеличения феромона при большей отдаленности кластеров;

p – величина «стадности» алгоритма, $q + p = 1$;

P_i – вероятность перехода муравья по i -му пути;

PC_i – i -й пространственный центр кластера;

$PDist(X_n, PC_i)$ – евклидово расстояние между X_n и PC_i , согласно расположения пикселя на изображении;

$P_i(X_n)$ – вероятность принадлежности пикселя кластеру i ;

q – величина «жадности» алгоритма;

Q – положительная константа, которая связана с количеством добавленного муравьями феромона;

X_n – пиксель номер n ;

α – константный параметр, определяющий относительное влияние феромона;

β – константный параметр, определяющий относительное влияние эвристической информации;

$\Delta\tau_i(X_n)$ – разница уровня феромона, которая добавляется к предыдущей успешным муравьем;

$\eta_i(X_n)$ – эвристическая переменная принадлежности пикселя X_n кластеру i ;

ρ – коэффициент испарения ($0 \leq \rho \leq 1$), который воздействует на ранее установленный уровень феромона;

$\tau_i(X_n)$ – информация об уровне феромона.

ВВЕДЕНИЕ

Сегментацией называется процесс разделения изображения на различные по некоторому признаку или признакам области. Области должны соответствовать непосредственно реальным объектам или их частям, а соответственно границы разбиений – границам реальных объектов или их частей.

Широкий спектр методов сегментации изображений описан в различной литературе, например, хороший обзор таких методов можно найти в [1].

Объектом исследования является процесс сегментации медицинских изображений.

Большинство существующих методов сегментации изображений невосприимчивы к зашумлению изображений, вариативности фона, различиям между частями

ми изображения. Это вызывает необходимость исследования новых методов, которые могли бы лучше приспособиться к данным факторам.

Предметом исследования является метод сегментации изображений на основе смешанного алгоритма К-средних и муравьиных колоний.

Целью данной работы является разработка метода сегментации медицинских изображений с помощью одного из алгоритмов роевого интеллекта – алгоритма муравьиных колоний, разработка программной системы для исследования алгоритма, получение эвристических коэффициентов алгоритма и проведение сравнительного анализа результатов работы.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Задача сегментации может рассматриваться в нескольких постановках:

- разбиение изображения на идентичные по некоторому признаку области;
- выделение нескольких сегментов на исходном изображении с целью последующей обработки.

В первом варианте возможно представление изображения в виде набора значений интенсивности на объединениях сегментов. Данные значения на каждом сегменте подвергаются дальнейшей обработке, хотя методы обработки могут отличаться для сегментов. Данная постановка задачи используется на первых этапах при решении задачи сжатия изображений.

Вторая постановка задачи используется в задачах поиска характерных фрагментов изображений или в задачах анализа сцен.

В данной работе задача сегментации изображения рассматривается в первой постановке [1]. Необходимо

найти разбиение $\Omega = \bigcup_{i=1}^k \Omega_i$ области изображения $I(x,y)$

на непересекающиеся области, чтобы выполнялись условия оптимальности по цветовым и пространственным евклидовым расстояниям между пикселями изображения и центрами соответствующих кластеров (выделено 3 критерия, которые подробно описаны в алгоритме ниже). Процедура построения разбиения Ω на однородные области называется сегментацией изображения.

Для оценки результатов сегментации не существует единого подхода, т.к. задача весьма специфичная. Наиболее качественный результат получается лишь при анализе результата непосредственно исследователем. Поэтому целесообразно провести обработку изображений из одного из наиболее популярных бенчмарков (наборов данных) и выполнить сравнение результатов с уже существующими алгоритмами.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

В литературе представлен обширный перечень методов сегментации изображений, например в [1].

Среди них метод случайных полей Маркова (Markov random field), является одним из наиболее часто используемых [2]. Методы, основанные на MRF, ищут оптимальные маркировки пикселей изображения. При этом набор меток представляет классы шаблонов в изображении.

Алгоритм муравьиных колоний (ant colony optimization) – современный популяционный подход в современной теории искусственного интеллекта, основанный на модели коллективного поведения муравьев, предназначенный, прежде всего для решения задач комбинаторной оптимизации [3].

При сегментации достаточно часто используется алгоритм k-средних, который основан на минимизации квадратичной ошибки. Данный алгоритм, как правило, неплохо выполняет кластеризацию точек (пикселей) на изображении, но в процессе обработки изображения он не может исключить лишнюю информацию, такую, как например, шумы различного рода. Алгоритм k-средних выполняет построение k различных кластеров [1]. Выбор числа кластеров k, как правило, базируется на результатах предыдущих исследований либо на основании экспертной оценки. Поскольку мы этот алгоритм также будем использовать в качестве вспомогательного средства, приведем его основные этапы:

1. Первичное сопоставление объектов кластерам.
2. Выбор центров кластеров (случайным образом или заранее известным способом).
3. Итеративный процесс, который включает в себя новое вычисление кластерных центров, пересчет значений координат кластера и перераспределение объектов по кластерам.
4. Условия завершения:
 - стабилизация кластерных центров (между итерациями ни один центр не поменял своего значения);
 - достижение максимального числа итераций алгоритма.

В данной работе представлена разработанная программная система сегментации изображений, в основе которой лежит алгоритм муравьиных колоний в сочетании с алгоритмом k-средних [4], который показал свою конкурентоспособность при решении NP-полных комбинаторных задач по сравнению с генетическими алгоритмами (genetic algorithms) или алгоритмами имитации отжига (simulated annealing algorithms) [5].

Суть АСО состоит в использовании модели поведения муравьев, прокладывающих путь от колонии к источнику пищи и представляет метаэвристическую оптимизацию [5]. Впервые этот алгоритм был предложен М. Дориго в 1992 году и использовался для поиска оптимального пути в графе.

Основу алгоритма составляет реальное поведение муравьиной колонии – отметка более лучших путей большим количеством феромона. Изначально все муравьи размещаются в вершинах графа, после чего начинается движение муравьев, направление которого определяется вероятностным методом на основании формулы вида:

$$P_i = \frac{l_i^q \cdot f_i^p}{\sum_{k=0}^N l_k^q \cdot f_k^p}$$

Было предложено несколько моделей АСО. Среди них три наиболее успешные: Ant System [5], Ant colony system [6] и MAX-MIN ant system [7].

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для получения эффективного алгоритма сегментации изображений предлагается метод, в котором используется преимущества муравьиного алгоритма и метода k -средних [4]. На первом этапе необходимо установить значение количества кластеров и случайным образом инициализировать их центры. Далее, согласно алгоритму кластеризации k -средних, определяется принадлежность каждого пикселя изображения определенному кластеру. На этом этапе решающую роль играет алгоритм муравьиных колоний. Он определяет связь каждого пикселя с кластерами изображения. Это выполняется согласно значению вероятности, которое обратно пропорционально расстоянию между пикселем, центром кластера и переменной τ , которая представляет уровень феромона. Уровень феромона определяется пропорционально минимальному расстоянию между каждой парой центров кластеров и обратно пропорционально расстоянию между каждым пикселем и его центром. Таким образом, значение уровня феромона растет с увеличением дистанции между центрами кластеров, а также с увеличением компактности пикселей в кластере. При этих же условиях возрастает и вероятность присоединения пикселя к кластеру.

Испарение феромона рассчитывается для того, чтобы ослабить воздействие предыдущих выбранных решений, которые являются менее приоритетными. Аналогично алгоритму k -средних, в распределенном состоянии происходит обновление кластерных центров, путем пересчета среднего значения пикселей в каждом кластере. Это продолжается до тех пор, пока изменение значения кластерного центра существенно не меняется. В отличие от алгоритма k -средних, разработанный метод не останавливается на этом этапе. Процесс кластеризации продолжают выполнять m муравьев, каждый из которых в конечном итоге находит потенциальное решение. Критерий поиска лучшего решения и коррекция уровня феромона соответственно для следующей группы m муравьев являются определяющими для метода. При выполнении критерия останова кластеризация завершается. Таким образом, находится лучшее решение.

В программной реализации алгоритм начинается с определения уровня феромона τ и задания эвристической информации η для каждого пикселя. Затем, каждый муравей определяет принадлежность пикселя кластера с вероятностью P , которая рассчитывается из выражения (1):

$$P_i(X_n) = \frac{[\tau_i(X_n)]^\alpha [\eta_i(X_n)]^\beta}{\sum_{j=0}^K [\tau_j(X_n)]^\alpha [\eta_j(X_n)]^\beta}. \quad (1)$$

Эвристическая информация $\eta_i(X_n)$ вычисляется согласно выражению (2):

$$\eta_i(X_n) = \frac{k}{CDist(X_n, CC_i) \cdot PDist(X_n, PC_i)}. \quad (2)$$

При этом значение уровня феромона на начальном этапе устанавливается равным 1, поэтому на первой итерации он не оказывает влияние на вероятность перехода.

Предположим, что определено m – количество муравьев для кластеризации изображения. Каждый муравей находит свое индивидуальное решение задачи. После того, как m муравьев сегментировали изображение, выбирается лучшее решение для текущей итерации, для него корректируется уровень феромона и происходит обновление всех центров кластеров согласно выбранному лучшему решению. На следующей итерации инициализация муравьев происходит согласно предыдущему опыту. На каждой итерации каждый из m муравьев находит индивидуальное решение, которое корректируется согласно собственным эвристическим знаниям и общим лучшим решением, найденным всеми муравьями. Это повторяется, пока не будет найдено решение, удовлетворяющее всем заданным условиям.

Общее решение из m индивидуальных решений выбирается по двум параметрам:

1. Эвклидово расстояние между кластерными центрами, исходя из цветовых характеристик. Оно характеризует разбиение с точки зрения обособленности кластеров.

2. Суммы эвклидовых расстояний между центром кластера и каждым его пикселем согласно цветовым и пространственным характеристикам. Они определяют характеристики разбиения согласно критерия подобия и компактности кластеров.

Чтобы выбрать глобальное лучшее решение из всех построенных локальных необходимо, чтобы выполнялись следующие условия:

1. Эвклидово расстояние между кластерами, с точки зрения цветовых характеристик, должно быть велико, соответственно кластеры будут отличными друг от друга.

2. Сумма эвклидовых расстояний между центром кластера и каждым его пикселем, согласно цветовым характеристикам, должна быть маленькой, соответственно кластер будет более однородным.

3. Сумма эвклидовых расстояний между центром кластера и каждым его пикселем, согласно пространственным характеристикам, должна быть маленькой, соответственно кластеры будут более компактными.

Для того чтобы выполнить первое условие, мы для каждого муравья рассчитывается расстояние между каждой парой центров кластеров и сортируются эти значения по возрастанию. Затем выбирается минимальное среди всех муравьев и на основе сравнения, выбирается максимальный.

При выполнении пунктов 2 и 3 необходимо:

1. Подсчитать суммы расстояний между кластерными центрами и их пикселями.

2. Отсортировать эти значения по возрастанию.

3. Выбрать максимальное и минимальное значение для каждого муравья.

Каждый раз выбранное значение получает дополнительный приоритет, а самое приоритетное является лучшим. После того как выбрано лучшее решение обновляется значение уровня феромона согласно выражению (3):

$$\tau_i(X_n) \leftarrow (1 - \rho)\tau_i(X_n) + \sum_i \Delta\tau_i(X_n). \quad (3)$$

Благодаря ρ усиливается влияние более поздних приоритетных решений и ослабляется более ранних. $\Delta\tau_i(X_n)$ вычисляется согласно выражению (4):

$$\Delta\tau_i(X_n) = \begin{cases} \frac{Q \cdot \text{Min}(k')}{\text{AvgCDist}(k', i) \cdot \text{AvgPDist}(k', i)}, & \text{если } X_n \in \text{кластеру } i; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (4)$$

Смешанный алгоритм муравьиных колоний и k -средних далее представлен пошагово:

1. Инициализируем основные параметры алгоритма: K, m , а значение уровня феромона на первом этапе полагаем равным единице.
2. Инициализируем m муравьев для K случайно выбранных центров кластеров.
3. Пусть каждый муравей связывает каждый пиксель X_n с одним из кластеров i случайным образом, с вероятностью $P_i(X_n)$ согласно (1).
4. Вычисляем новые центры кластеров. Если новые центры совпадают с предыдущими, то переходим к п. 5, если нет, переходим к п. 3.
5. Сохраняем лучшее решение из всех найденных m муравьями.
6. Обновляем уровень феромона для каждого пикселя согласно (3) и (4).
7. Корректируем общее лучшее решение, исходя из найденных индивидуальных решений каждого муравья.
8. Если выполняется критерий останова, то переходим к следующему шагу; в противном случае – переходим к пункту 3.
9. Поиск общего лучшего решения.

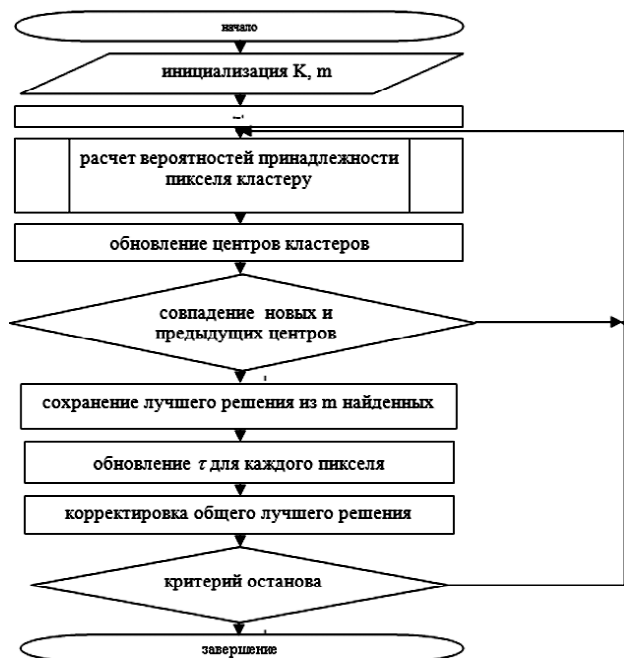


Рисунок 1 – Схема алгоритма сегментации изображений методом муравьиных колоний

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Предложенный алгоритм был программно реализован. Система разработана в среде Microsoft Visual Studio и использует для своей работы платформу Microsoft .NET Framework. Для сохранения данных используется СУБД Microsoft SQL Server.

Разработанная программная система позволяет визуализировать и индивидуально подстраивать процесс сегментации. Дополнительно имеется возможность воспроизведения и сохранения, ранее полученных результатов. В будущей редакции планируется ввести критерии качества сегментации, используя например обобщенный индекс Данна.

Система обладает интуитивно понятным пользовательским интерфейсом и хорошей и удобной системой справочной информации (рис. 2).

На рис. 3 приведено окно запуска выполнения алгоритма. В качестве параметров необходимо указать количество муравьев, количество итераций и количество кластеров, на которые планируется разбивать изображение. Также необходимо выбрать само изображение для сегментации, поддерживаются разнообразные форматы изображений. В качестве результата сегментации мы получаем собственно сегментированное изображение, промежуточные варианты сегментации, а также значения эвристических коэффициентов α и β .

Для понимания принципов работы системы приведены UML-диаграммы вариантов использования (рис. 4) и UML-диаграмма компонентов (рис. 5). На рис. 4 приведены последовательности действий пользователя при работе с системой.

На рис. 5 изображена диаграмма компонентов системы для понимания внутренней организации программного кода и процесса обработки и сохранения данных.

При помощи подсистемы работы с архивом (рис. 6) есть возможность получить сравнительную характеристику сегментации изображения при разных начальных параметрах, что существенно повышает возможность улучшения точности и получения большей наглядности в процессе исследований.

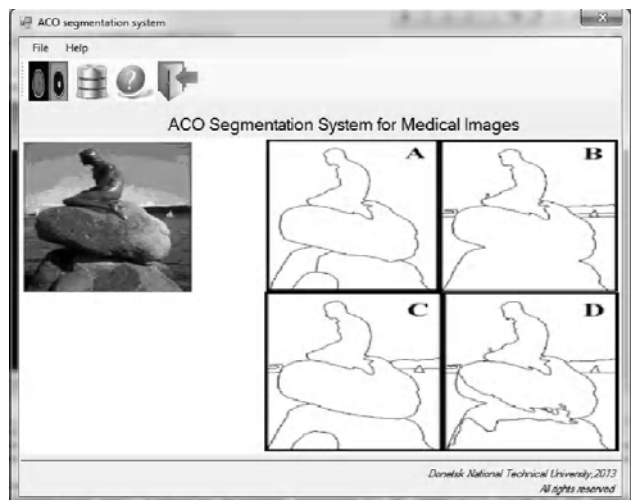


Рисунок 2 – Внешний вид интерфейса системы

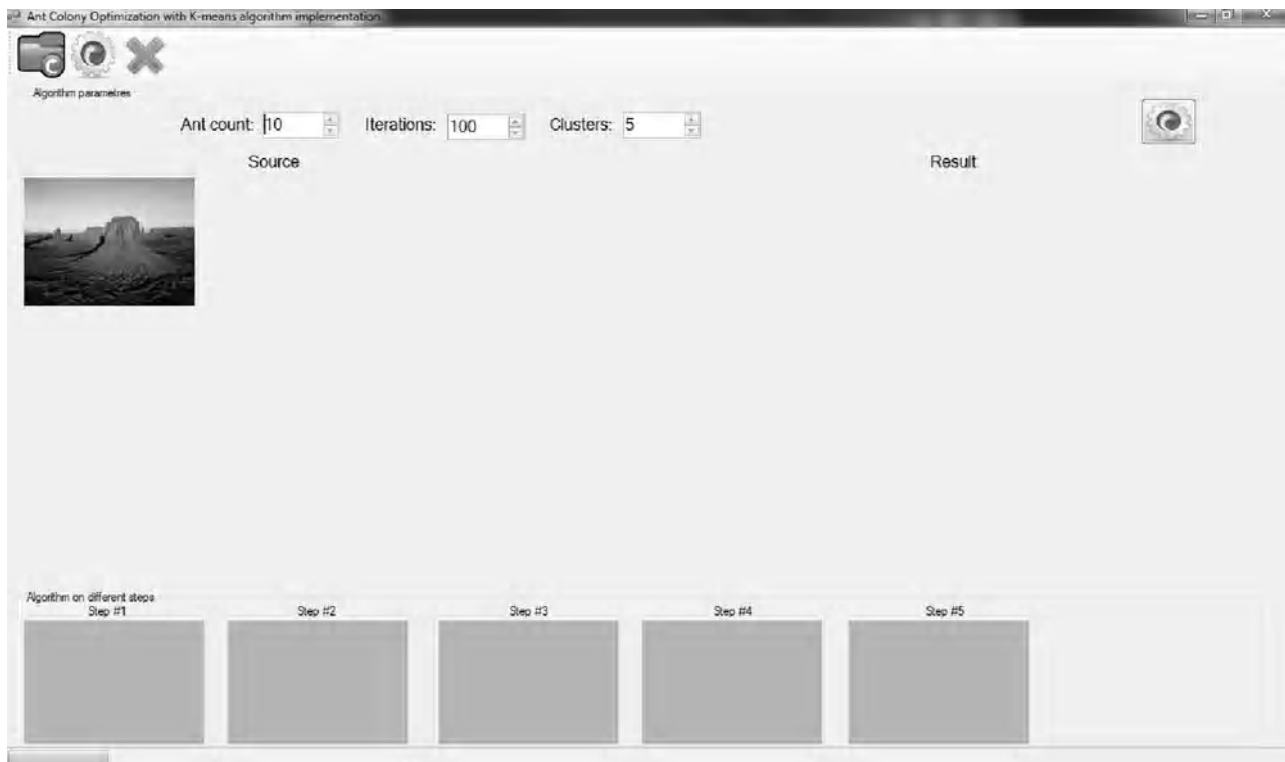


Рисунок 3 – Интерфейс настраиваемой параметрической части

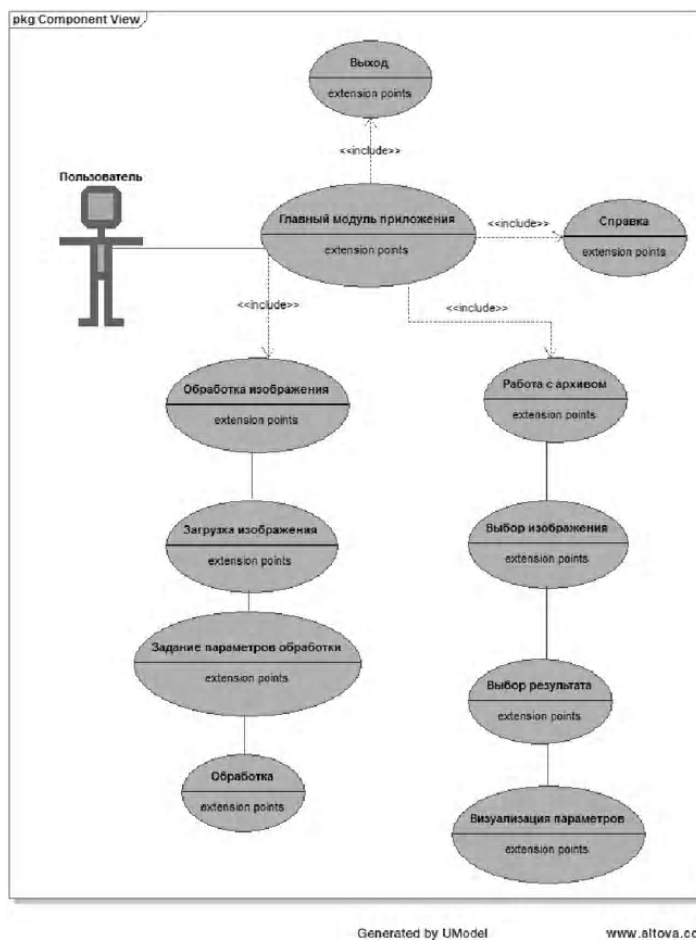


Рисунок 4 – Диаграмма вариантов использования разработанной системы



Generated by UModel

www.altova.com

Рисунок 5 – Диаграмма компонентов системы



Рисунок 6 – Подсистема работы с архивом

При проведении любых исследований в области обработки изображений, как правило для оценивания результатов используют наборы эталонных изображений из коллекций. В нашем исследовании мы использовали базу Беркли [8].

К сожалению, база [8] не содержит изображений медицинских снимков, но имеется большое количество изображений из разных областей. Было выбрано несколько изображений и проведена сегментация.

Для сравнения результатов работы разработанного алгоритма мы предлагаем провести сравнительный анализ результатов сегментации нашей системой и узкоспециализированной системой Osiriss [9]. Все изображения – реальные снимки различных органов и частей тела человека, используемые врачами для постановки диагнозов и проведения диагностики.

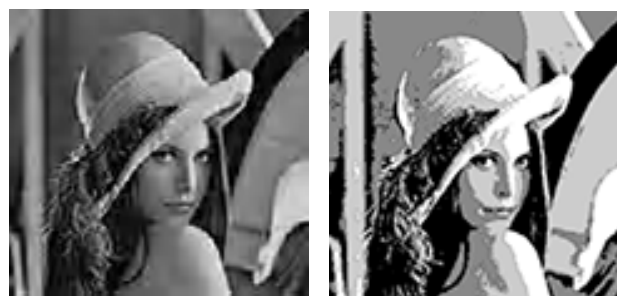
5 РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 7 и 8 приведены результаты обработки изображений из бенчмарка Беркли.

Как видно из рис. 7 и 8, результаты обработки получились приемлемыми. В первом случае изображение было разбито на пять кластеров, все части одежды, фона и лица девушки были отнесены к разным кластерам. При более детальном рассмотрении можно увидеть некоторые недочеты в принадлежности пикселей вследствие возможно не совсем точной настройки параметров алгоритма.

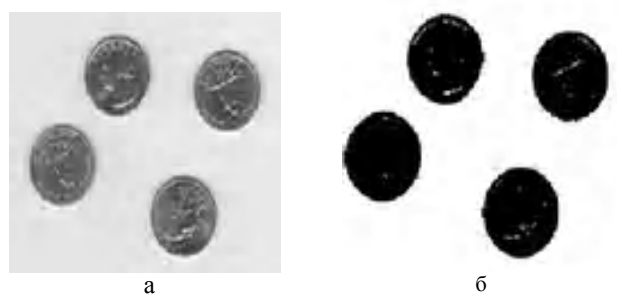
Результаты на рис. 7 кластеризованы на две группы: монеты и фон. Как видим, все отделено аккуратно, но

также имеются небольшие погрешности при увеличенном рассмотрении пикселей.



а б

Рисунок 7 – Изображение Lena из бенчмарка Беркли: а – исходное изображение, б – результат сегментации



а б

Рисунок 8 – Изображение монет из бенчмарка Беркли: а – исходное изображение, б – результат сегментации

В целом мы считаем результаты работы алгоритма с общетематическими изображениями неплохими и пригодными к использованию на практике.

Далее предлагаем оценить работу алгоритма при обработке более сложных изображений медицинской направленности, сегментированные с помощью нашей системы и системы Osiriss [11].

На рис. 9–14 представлены результаты сегментации разработанной системой и системой Osiriss.

На рис. 9 представлен снимок легких. Изображение сегментировали на четыре кластера. На рис. 9б представлен результат обработки нашей системой, на рис. 9в – системой Осирис. Так, на рис. 9 при сегментации снимка легких разработанная система визуально более качественно произвела сегментацию, т.к. были отделены контуры альвеол. На системе Осирис данный фрагмент вышел слившимся с другой частью.

На рис. 10 представлены снимки черепа, результат по качеству во многом схож у обеих систем, т.к. необходимые для идентификации объекты были обозначены. Сегментация в нашей системе проводилась на пять кластеров. Результаты работы систем схожи и пригодны для идентификации частей.

На рис. 11 результат схож с результатом на рис. 9. Разработанная система в отличие от швейцарской лучше очертила контуры важных узлов, а это очень важно для анализа снимков. Сегментация проводилась на четыре кластера.

На рис. 12 разработанная система показала результат гораздо хуже, чем Осирис. Не были выделены важнейшие узлы на изображении и некоторые части получились частью других областей. Сегментация проводилась на четыре кластера. Возможно, что неудачно были по-



Рисунок 9 – Легкие: а – исходный снимок, б – обработанный в разработанной системе, в – обработанный в системе Осирис

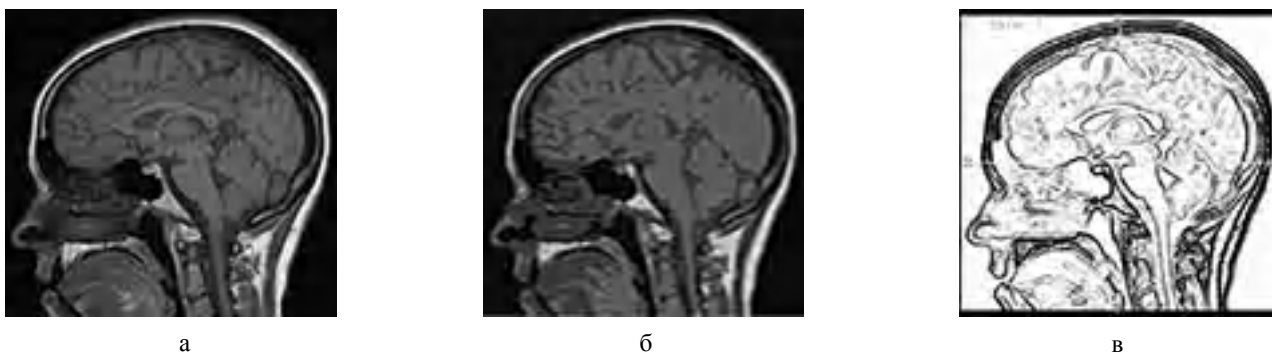


Рисунок 10 – Череп: а – исходный снимок, б – обработанный в разработанной системе, в – обработанный в системе Осирис

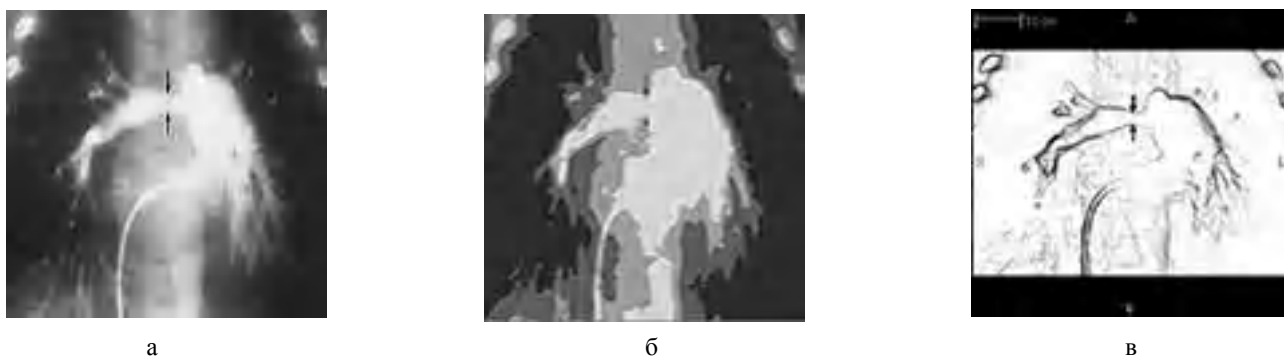


Рисунок 11 – Легкие: а – исходный снимок, б – обработанный в разработанной системе, в – обработанный в системе Осирис

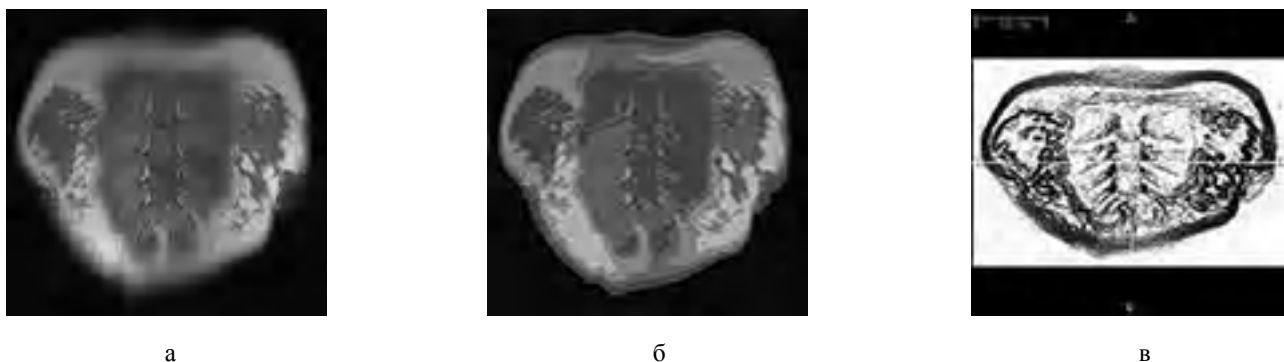


Рисунок 12 – Сердце: а – исходный снимок, б – обработанный в разработанной системе, в – обработанный в системе Осирис

добраны эвристические коэффициенты в нашем алгоритме и результат вышел не очень хорошим.

На рис. 13 и рис. 14 представлены снимки мозга и позвоночника. Видна локализация наиболее сложных и труднодоступных элементов и их отделение от фона. Изображения сегментированы достаточно качественно и пригодны для дальнейшей идентификации врачами.

Результаты исследований были сгруппированы и систематизированы.

В таблице 1 приведены значения коэффициентов α , β для каждого изображения, а также время обработки.

Таблица 1 – Результаты исследований

Номер изображения	α	β	t , сек
9	0,35	0,8	10
10	0,7	0,7	9
12	0,25	0,08	10
13	0,02	0,12	12
14	0,82	0,91	8

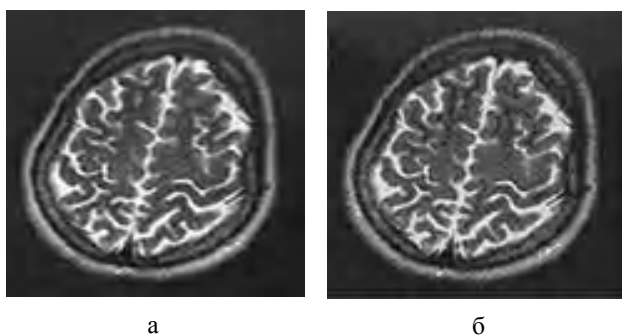


Рисунок 13 – Мозг: а – исходное изображение, б – результат сегментации



Рисунок 14 – Позвоночник: а – исходное изображение, б – результат сегментации

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из представленных результатов, предложенный метод вполне неплохо справился с поставленной задачей. Визуально наблюдается правильность отделения частей изображения от фона. Однако, как видно из представленных результатов, для достижения оптимума все же метод нуждается в правильном подборе эвристических параметров.

Предложенная система представляет возможности для более углубленного изучения разработанного алгоритма. Сравнение результатов работы с системой Osiriss указывает на перспективность алгоритмов роевого интеллекта в задачах компьютерной сегментации изображений.

ВЫВОДЫ

Была разработана компьютерная система сегментации изображений на основании модифицированного алгоритма муравьиных колоний и К-средних. Проведена апробация на бенчмарке Berkley, а также на реальных медицинских снимках. Апробация показала высокую эффективность разработанного алгоритма.

Использованный алгоритм показал в некоторых случаях свое превосходство по качеству результатов по сравнению с некоторыми специализированными программными комплексами, такими, как например Osiriss. Разработанный алгоритм возможно доработать и улучшить, в частности введением в систему индекса Данна, для сравнения полученного результата с эталонным, также в данном случае будет возможность автоматизировать и оптимизировать подбор эвристических параметров до необходимых оптимальных значений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках госбюджетной научно-исследовательской темы кафедры «Автоматизированные системы управления» Донецкого национального технического университета «Разработка и исследование методов создания компьютерных систем медицинской и технической диагностики в научной и учебной работе» (шифр и номер темы: Н-18-12, период действия темы : 01.01.2012–31.12.2016).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pal N. R. A review on image segmentation techniques / N. R. Pal, S. K. Pal // Pattern Recognition. – 1993. – № 9 (26). – P. 1277–1294.
2. Solberg A. H. S. A Markov random field model for classification of multisource satellite imagery / A. H. S. Solberg, T. Taxt,

- A. K. Jain // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 1994. – № 4 (32). – P. 768–778.
- Dorigo M. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents / M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi // *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* – 1996. – Part B, 1(26). – P. 29–41.
- Скобцов Ю. А. Сегментация изображений методом муравьиных колоний / Ю. А. Скобцов, С. А. Эль-Хатиб, А. И. Эль-Хатиб // *Вестник Херсонского Национального Технического Университета*. – Херсон, 2013. – № 1(46). – С. 204–211.
- Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms : PhD.thesis / Marko Dorigo. – Milano, 1992. – 25 p.
- Dorigo M. Ant Colony Optimization / M. Dorigo, T. Stzle. – MIT Press, Cambridge, 2004. – 35 p.
- Huizhi C. A Novel Image Segmentation Algorithm Based on Artificial Ant Colonies. / C. Huizhi, P. Huang, S. Luo // *Medical Imaging and Informatics (MIMI) : Second International Conference, Beijing, August 14–16*. – Berlin : Springer-Verlag, 2007. – P. 52.
- Berkeley Segmentation Dataset: Images [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/BSDS300/html/dataset/images.html>
- Медицинская система OsiriX [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.osirix-viewer.com/>

Статья поступила в редакцию 11.02.2015.

После доработки 09.03.2015.

Ель-Хатиб С. А.¹, Скобцов Ю. О.²

¹Аспірант кафедри автоматизованих систем управління Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

²Д-р техн. наук, професор, зав. кафедри автоматизованих систем управління Донецького національного технічного університету, Донецьк, Україна

КОМП'ЮТЕРНА СИСТЕМА СЕГМЕНТАЦІЇ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ МЕТОДОМ МУРАШИНИХ КОЛОНІЙ

Сегментация изображений є однією з найважливіших та складних задач низькорівневого аналізу зображень. Оскільки це один з перших етапів розпізнавання зображень, то подальші кроки, такі як виділення сутностей, класифікація і розпізнавання, у значній мірі залежать від його результатів. Тому сегментация зображень є предметом інтенсивних досліджень.

Методів сегментации розроблено велику кількість, але кожен з методів має як свої переваги, так і недоліки. Перспективними для досліджень вважаються нові методи сегментации, що базуються на методах ройового інтелекту (мурашині та ройові алгоритми, алгоритми зграї риб, алгоритми оптимизации пересуванням бактерій тощо). Наведені алгоритми засновані на ідеї моделювання поведінки великої кількості агентів, поведінка яких виходить з природи, з біологічних систем.

У наведеній роботі виконані реалізація та аналіз змішаного алгоритму сегментации К-середніх та мурашиних колоній, а також реалізована програмна система для візуалізації та апробації розробленого алгоритму. Проведено тестування розробленого алгоритму на загальнодоступних бенчмарках (використано бенчмарк Берклі). Отримано вихідні оброблені зображення, а також значення евристичних коефіцієнтів розробленого алгоритму. Результати обробки порівняні з результатами, отриманими при обробці системою Osiriss.

Ключові слова: сегментация, алгоритм мурашиних колоній, алгоритм К-середніх, аналіз зображень.

El-Khatib S. A.¹, Skobtsov Y. A.²

¹Post-graduate student of the Automated Control Systems department of Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of the Automated Control Systems department of Donetsk National Technical University, Donetsk, Ukraine

THE COMPUTER SYSTEM OF MEDICAL IMAGE SEGMENTATION BY ANT COLONY OPTIMIZATION

The image segmentation is one of the most important and complex low-level image analysis tasks. Because it is one of the first stages of image recognition, the next steps, such as the allocation of entities, classification and recognition, largely depend on its results. Therefore, the image segmentation is the subject of intense research.

There are a lot of segmentation methods, but each of them has its own advantages and disadvantages. New segmentation methods based on swarm intelligence look are promising for researching. They are ant colony optimization algorithm, swarm optimization, fish and bacteria foraging algorithms etc. These algorithms are based on the behavior modeling of set of agents and inspired by the nature, especially by biological systems.

The mixed segmentation algorithm of K-means and ant colony optimization was implemented and analyzed in the presented paper. The software system for visualization and approbation of the developed algorithm was implemented too. The algorithm was tested on public benchmark Berkley. We have obtained the output processed images, as well as the values of heuristic coefficients of the algorithm. The results are compared with output data obtained by Osiriss system.

Keywords: segmentation, Ant Colony Optimization, K-means algorithm, image processing.

REFERENCES

- Pal N. R., Pal S. K. A review on image segmentation techniques, *Pattern Recognition*, 1993, No. 9(26), pp. 1277–1294.
- Solberg A. H. S., Taxt T., Jain A. K. A Markov random field model for classification of multisource satellite imagery, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1994, No. 4(32), pp. 768–778.
- Dorigo M., Maniezzo V., Colomi A. The Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1996, Part B, 1(26), pp. 29–41.
- Skobcov Ju. A., El-Hatib S. A., El-Hatib A. I. Segmentacija izobrazhenij metodom murav'inyh kolonij, *Vestnik Hersonskogo Nacional'nogo Tehnicheskogo Universiteta*. Herson, 2013, No. 1(46), pp. 204–211.
- Dorigo M. Optimization, learning and natural algorithms : PhD.thesis. Milano, 1992, 25 p.
- Dorigo M., Stzle T. Ant Colony Optimization. MIT Press, Cambridge, 2004, 35 p.
- Huizhi C., Huang P., Luo S. A Novel Image Segmentation Algorithm Based on Artificial Ant Colonies, *Medical Imaging and Informatics(MIMI) : Second International Conference, Beijing, August 14–16*. Berlin, Springer-Verlag, 2007, 52 p.
- Berkeley Segmentation Dataset: Images [Electronic resource]. Access mode: <http://www.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/BSDS300/html/dataset/images.html>
- Medicinskaya sistema OsiriX [E'lektronnyj resurs]. Rezhim dostupa: <http://www.osirix-viewer.com/>

ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIV INFORMATICS TECHNOLOGIES

UDC 004.312.26

Val' O. D.¹, Zhikharevich V. V.², Ovchar R. I.³, Ostapov S. E.⁴¹PhD, Associate professor, Associate professor of software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine²PhD, Associate professor, Associate professor of software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine³Assistant professor of software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine⁴Dr. of Science, Professor, Head of the software department, Chernivtsi Yu. Fed'kovych National University, Chernivtsi, Ukraine

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF THE KEY STREAM GENERATORS ON THE BASE OF CELLULAR AUTOMATA

This paper presents the development and investigations of the binary key stream generators statistical characteristics. Developed generators based on the elementary rules of cells interaction: simple, modified and combined classical rules. We believe that elementary rules «30», «86», «135», «149» are most promising from statistical point of view. Modifications were consist of combining of array bits before outputting and combining various elementary rules of automaton cells interaction. It was developed a new simple interaction rule, based on the logical operation XOR. The investigation of statistical properties was performed using NIST STS v1.8. All designed generators showed good statistical characteristics, which indicates their satisfactory cryptoresistance. In addition we've investigated the developed generators linear complexity using Berlekamp-Massey algorithm. Obtained results shows the high values of linear complexity (about half of the cellular automaton length), which is typical for such structures type. On the base of the developed generator with own cells interaction rule has developed a system for secure communication of audio, text and file information. The statistical investigations of encrypted file showed that it satisfies all the NIST STS requirements.

Keywords: stream cipher, binary key stream generators, cellular automaton, statistical characteristics, secure communications system.

NOMENCLATURE

$A[i]$ is a value of i -th address array elements;

a is a calculated cell address;

$B[i]$ is a buffer array elements;

$C[i]$ is a value of i -th cellular automaton cell;

CA is a cellular automaton;

$C'[i]$ is a value of i -th cellular automaton cell after the interaction act;

$C_{A[a]}$ is a value of CA cell with address $A[a]$;

$C'_{A[i]}$ is a value of CA cell with address $A[i]$ after the interaction act;

$C_R[w]$ is a value of w -th elementary cellular automaton cell;

$C_{out}[w]$ is a value of w -th resulting CA cell after rules combination;

i, k is an array index;

n is a CA length;

NIST STS is a National Institute of Standards and Technologies Statistical Suite;

PIN is a Personal Identification Number;

PLD is a Programmable Logical Devices;

R is an elementary interaction rules; $R=30, 86, 135, 149$;

w is a calculated cell address.

INTRODUCTION

Today most of us are living in the information society. The result of this is a large amount of information, which is transmitted by the telecommunication systems. With an open data also increase amounts of confidential information, requirements for protection of which considerably amplified. Such tendency is observed in Ukraine, especially with the introduction of the personal data protection law. If at the beginning of the computer systems development means for protection of the files, which are transmitted by the network, were used, then today on foreground is protection of information in real time.

At the same time, in Ukraine smart cards are rapidly introduced into the daily life. Now the introduction of electronic passports, medical cards, student tickets and classification books is discussed. The number of different mobile devices is rapidly increasing. Most of these gadgets have limited computing resources, but they also need to protect data transmitted open communication channels.

In any protection system, such as authentication, PIN-code verification and so on, generators of pseudorandom sequences are used. Limitedness of computing resources requires the development of simple generating systems, which would easily compute in parallel. Speed parameters of protection systems and their optimization for specialized real time tasks become crucial. The best for these goals cellular automaton fit.

The main purpose of this paper is the development of the binary key stream generators based on cellular automata, investigation its statistical characteristics and linear complexity.

1 PROBLEM STATEMENT

Let us call the one-dimensional cellular automaton the array $C[i]$, where $i=[0, n-1]$, each element of which are logical zero or one. The automaton state at each time determined by the all its elements states. Automaton transition in a next state is determined by so-called transition rules, which are determined by the elements (cells) interaction with other cells that are at some distance from the selected cell. Elementary interaction rules, defined in [1], set the cell interaction with nearest neighbors.

For example, the famous rule «30» may be written as a Boolean function:

$$C'[i] = C[i-1] \oplus (C[i+1] \vee C[i]);$$

or as an arithmetic function:

$$C'[i] = (C[i-1] + C[i] + C[i+1] + C[i-1]C[i+1]) \bmod 2.$$

To avoid the first and last cell's problem automaton is «rolled» in the torus.

Another transition rules are produced similarly. We've used the «86», «135», «149» rules (see Table 1). There are 256 elementary transition rules, as it shown in [1].

Researchers can also design your own transition rules that take into account the interaction with randomly or pseudo-selected cells, or with no-neighboring cells. This makes the CA modifications and their use almost unlimited.

2 REVIEW OF THE LITERATURE

The first conclusions about the usage of CA for pseudorandom binary sequences generation in cryptographic purposes are found in the Stephen Wolfram work [1]. Soon investigations aimed at proving of the feasibility of specific applications realization appear [2–6]. In the past ten years there have been publications that describe specific generation or encryption algorithms based on the cellular automata. Among these works are articles of S. K. Rososhek et al [7] and Jegadish Kumar K. J. [8] which describes the symmetric encryption systems based on two-dimensional CA. B. M. Suhinin article [9] is about developed hardware implementation on PLD of a high-speed pseudorandom binary sequences generator on the basis of

CA. Norziana Jamil article [10] is devoted to the development and researching of hash function, which uses elementary CA rules for mixing bits of a message.

However, despite of the use of the elementary rules of CA cell interactions in the cryptographic purposes, their statistical properties are insufficiently studied. For example, there is no rigorous justification for the certain rules using, the possibility of their combinations using, compatibility, linear complexity, and other characteristics that may influence on the effectiveness of one-dimensional CA application.

Elementary rules of CA interaction were identified and classified by Stephen Wolfram in [11]. Totally 256 rules of the cell interaction, divided into several classes are allocated. Each class is formed of the, so-called, statistically equivalent rules, i.e. those that can be derived from each other using simple logical change – conjunctive, reflexive and conjunctive-reflexive. Also in [1] mentions that the rule «30» by its statistical characteristics can produce qualitative generator of pseudorandom binary sequences. Therefore, for research were selected all rules belonging to one class with the rule «30» («86», «135», «149») and a few others for comparison [12].

Conducted researches prove that all rules which are in a same class with the rule «30» have such statistical properties [8], which allow use them in different modifications for developing of the cryptoresistant pseudorandom binary sequences generator. As modifications, various options of array outputting, the initial generator state effect and etc. were investigated [13].

3 MATERIALS AND METHODS

The next question that should be explained – how these characteristics can be improved by using combinations of cell interaction rules. In [14–15] it is shown that the best results show a combination of rules that belong to the same class, and combined rules must also have good statistical properties. So we have to use a combination of rules «30», «86», «135», «149».

The sequences bits were combined in the following way. We use four cellular automata that implement these intercellular rules. Each CA output bits was selected by the formula:

$$w = (i + 3 + \sum_{k=0}^{(\log_2 n) - 1} C_{i+3+k} 2^k) \bmod n.$$

The output bits was combined each other in various ways, but the best statistical characteristics was demonstrated by generator, which sequence was formed by the rule:

$$C_{out}[w] = (C_{30}[w] \oplus C_{86}[w] \oplus 1) \oplus (C_{30}[w] \oplus C_{135}[w] \oplus 1) \oplus (C_{30}[w] \oplus C_{149}[w] \oplus 1). \quad (1)$$

Table 1 – Elementary transition rules in the cellular automata

No	Rules	Boolean form	Arithmetic form
1	«30»	$C'[i] = C[i-1] \oplus (C[i+1] \vee C[i])$	$C'[i] = (C[i-1] + C[i] + C[i+1] + C[i-1]C[i+1]) \bmod 2$
2	«86»	$C'[i] = C[i-1] \vee (C[i+1] \oplus C[i])$	$C'[i] = (C[i-1] + C[i] + C[i+1] + C[i-1]C[i+1]) \bmod 2$
3	«135»	$C'[i] = 1 \vee C[i-1] \oplus (C[i] \vee C[i+1])$	$C'[i] = (1 + C[i-1] + C[i]C[i+1]) \bmod 2$
4	«149»	$C'[i] = C[i-1] \vee (C[i] \oplus C[i+1]) \vee 1$	$C'[i] = (1 + C[i-1]C[i] + C[i+1]) \bmod 2$

Another way to study the suitability of CA to generate high-quality pseudorandom key sequences was designing of intercellular interaction alternative rules.

We can propose the following rule. CA contains cells with logical «1» and «0». We use the address array $A[i]$ to select the interacting cells. This array contains decimal numbers (cell's addresses) from 1 to n , pseudo-random filled and duplicated in the buffer array $B[i]$. Cells interact by the simple rule on the base of XOR. Interacted cells are selected as follows:

$$C_{A[i]} = C_{A[a]} \oplus C_{A[i+1]} \oplus C_{A[i]}; \quad (2)$$

$$a = (i + 1 + \sum_{k=0}^{(\log_2 n)-1} C_{i+1+k} 2^{(\log_2 n)-1-k}) \bmod n. \quad (3)$$

First of all, it's necessary to select the target cell address. This cell will contain the interaction result. Its address is determined by the address array $A[i]$. Then we may determine the address of first interaction cell $A[i+1]$. The address of a second interacting cell $A[a]$ is calculated by (3). Here we use the CA cells. The interaction result is recorded to the CA cell and outputted as a next key bit. After the interaction act the i -th and a -th elements of the buffer array are swapped: $B[i] \leftrightarrow B[a]$. If the array index i is reached its end, the address array $A[i]$ is swapped with the buffer array $B[i]$:

$$\sum_{i=1}^n A[i] \leftrightarrow \sum_{i=1}^n B[i].$$

These steps continue as long as necessary for encryption or investigation of the statistical and other generator's characteristics. We have investigated the statistical characteristics and the linear complexity of the obtained key sequences. In the last case we've used the Berlekamp-Massey algorithm [16].

In all cases we have a binary stream, which have been used as key stream in G. Vernam cipher (one-time pad).

4 EXPERIMENTS

Computer programs that implement the proposed generators and encryption systems have been developed. In all cases, we've used cellular automata length of 256 bits.

Statistical investigations of the obtained sequences were performed by the NIST STS technique, which is usual for pseudorandom generators testing [17].

According to this technique it was generated the binary sequences with the length of 10^8 bits each. The sequences were fed to the input of NIST STS v.1.8 as a text file. Statistical suite divided these sequences at the 100 equal parts of 10^6 bits each, making it possible to explore the 100 sequences.

These sequences have been tested by 16-th different groups of tests: frequency and block-frequency tests; cumulative-sums test; runs and longest-run tests; binary matrix rank test; digital Fourier transform; nonperiodic- and overlapping-templates tests; universal test; random-excursions tests; serial test; Lempel-Ziv test; linear-complexity test.

Because of these tests are running with different parameters, we've obtained the vector with 189 values.

Details of the method are described in [11], but we can assume that the whole key sequence have passed the statistical test only if at least 96 of the 100 investigated parts have passed the test.

NIST STS returns the sequence statistical portrait in the text file «FinalAnalysisReport», and than we have built the resulting histograms are shown below.

Additionally we performed linear-complexity tests by the Berlekamp-Massey algorithm for the 256-, 2560- and 25600-bits key sequences. In all cases, we have generated 10 sequences and calculated linear complexity for each of them.

5 RESULTS

Statistical testing results are shown in the fig. 1–2.

The results of linear-complexity investigations are shown in fig. 3. We've studied the various elementary rules for cellular automaton length of 256 bits.

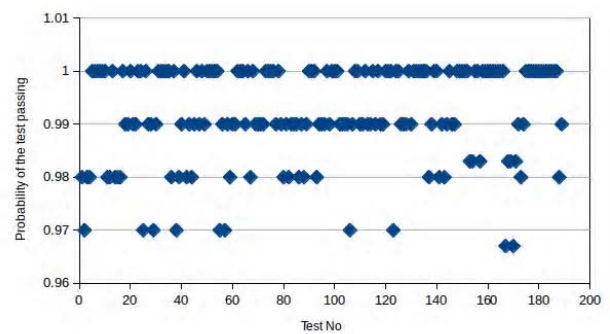


Figure 1 – Statistical portrait of the generator on the base of rule (1)

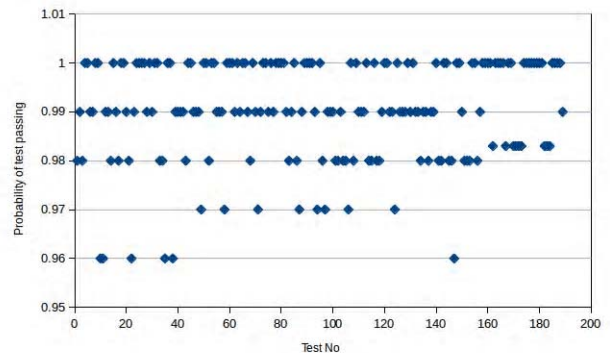


Figure 2 – Statistical portrait of the generator on the base of rule (2)

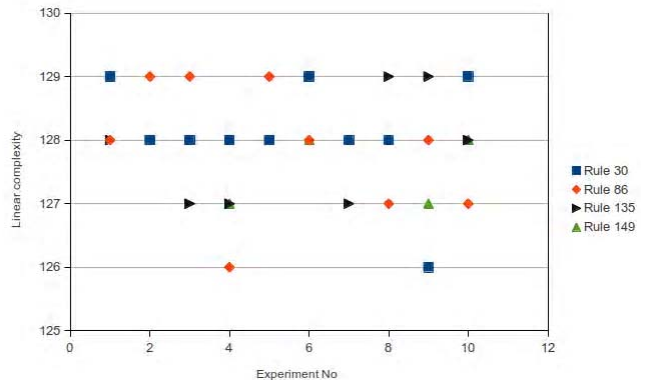


Figure 3 – The results of linear-complexity investigations for the generators on the base of different elementary rules (automaton length – 256 bits)

As a final result of our research, we have developed software for secure data exchange. The software allows you to share encrypted audio information in real time and provides secure text messages (chat) and file exchange. We have used the G. Vernam cipher on the base of developed key sequence generators.

The results of the statistical tests of the input text and encrypted file are shown in fig. 4–5.

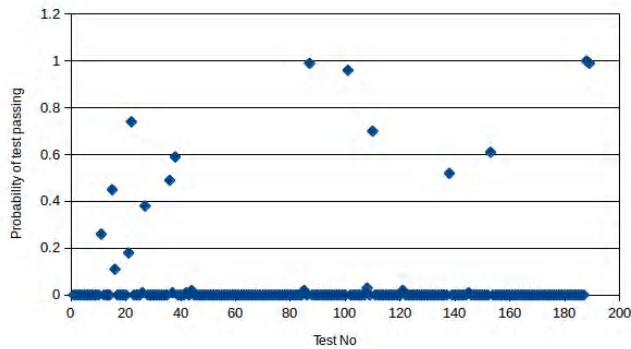


Figure 4 – Statistical portrait of the input text file

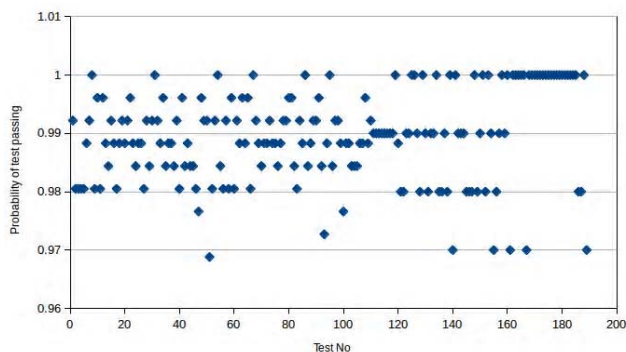


Figure 5 – Statistical portrait of the text file encrypted by stream cipher

6 DISCUSSION

One can see from fig. 1–2, the developed generators have successfully passed all of the statistical NIST tests. In the first case, almost all tests passed with the value >0.97 and only two of them are below this mark.

In the second case (see fig. 2) only five tests are passed with the value 0.96 and rest of them – with the value 0.97 or higher.

These results indicate the high statistical characteristics of the developed generators.

The high statistical characteristics are confirmed by large values of linear complexity. As one can see from fig. 3, the linear complexity values are located near the half of CA length: ~ 128 for 256-bit CA; ~ 1280 and 12800 – for 2560 – and 25600-bit CA respectively. It is known (see [18]) that the high linear complexity values are traditional for binary pseudorandom generators, which was demonstrated in our paper. Moreover, the NIST STS also has a linear-complexity test, and all our generators have passed it with the value not less than 0.98. High linear complexity values was shown by those generators, which not demonstrated the satisfactory statistical characteristics, such as rules «22», «54», «73», «150», «158». Perhaps in the future one can use these rules in the hash function or block ciphers construction as an additional diffusion or confusion element.

The statistical portraits of the input text and encrypted by stream cipher file are shown in fig. 4–5. It was necessary to perform such investigations in order to assess the quality of encryption subsystem in the actual operating conditions. Fig. 4 shows that the input file (Microsoft Word document) passed only three from 189 NIST STS tests. The encrypted file passed all 189 tests (see fig. 5). This fact confirms the results of statistical investigation of the generator on the base of (2), which was used in this software.

The aim of this development was to show the potential of the developed generator applying in the stream data exchange systems. This software gives an opportunity of the real time data exchanging for the network users. It can provide secure voice communication or protected text messages transmission (chat) or other files exchange. The software architecture is client-server and can be used in peer-to-peer networks [19].

When two subscribers open the connection generation and synchronization of encryption key using Diffie-Hellman-Merkle algorithm is implemented. The received general key is used for stream encryption based on cellular automata system initialization, or for symmetric cryptosystem based on Blowfish encryption algorithm session key creation.

CONCLUSION

Summarizing the conducted researches, we can make the following conclusions.

1. For the first time the systematic researches of the statistical characteristics of the pseudorandom binary sequences generators on the basis of elementary CA were conducted. The possibility of modified cell interaction rules application for pseudorandom sequences generating is shown.

2. It was shown that one of the effective ways to increase such generators cryptoresistance is a combination of different cell interaction rules.

3. For the first time the simple interaction rule on the base of XOR was proposed. This rule allows generating binary sequences with good statistical characteristics.

4. Secure voice, text and file exchanging software based on the developed generator was created. This software allows perform protection of audio stream in real time, which indicates on their high speed characteristics.

ACKNOWLEDGEMENTS

This investigation is supported by the department research project of Chernivtsi Yury Fed'kovych National University «Dynamic systems: modeling and software development» (state registration number 0110U005858).

REFERENCES

1. Wolfram S. Random sequence generation by cellular automata / S. Wolfram // *Advances in Applied Mathematics*. – 1986. – Vol. 7. – P. 123–164. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0196-8858\(86\)90028-X](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8858(86)90028-X)
2. Kar B. K. Theory and applications of cellular automata in cryptography / B. K. Kar, S. Nandi, P. P. Chaundhuri // *IEEE Transactions on Computers*. – 1994. – Vol. 43(12). – P. 1346–1357. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/12.338094>
3. Mazoyer J. Signals in one-dimensional cellular automata / J. Mazoyer, V. Terrier // *Theoretical Computer Science*. – 1999. – Vol. 217(1). – P. 53–80. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975\(98\)00150-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975(98)00150-9)

4. Mihaljevic M. A cellular automaton based fast one-way hash function suitable for hardware implementation / M. Mihaljevic, Y. Zheng, H. Imai // *Public Key Cryptography : Lecture Notes in Computer Science*. – Springer Verlag. – 1988. – P. 217–234. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0054027>
5. Porter R. B. Evolving FPGA based cellular automata / R. B. Porter, N. W. Bergmann // In: B. McKay, X. Yao, C. S. Newton, J-H. Kim, and T. Furuhashi (eds.). – *SEAL : Lecture Notes in Computer Science*. – 1998, Vol. 1585. – P. 114–121. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48873-1_16
6. Seredynski F. Cellular automata computations and secret key cryptography / F. Seredynski, P. Bouvry, A. V. Zomaya // *Parallel Computing*. – 2003. – Vol. 30. – P. 753–766. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.parco.2003.12.014>
7. Росошек С. К. Криптосистемы клеточных автоматов / С. К. Росошек, С. И. Боровков, О. О. Евсютин // *Прикладная дискретная математика*. – 2008. – Т. 1 (1). – С. 43–49. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/kriptosistemy-kletochnyh-avtomatov>
8. Jegadish Kumar K. J. Novel and Efficient Cellular Automata Based Symmetric Key Encryption Algorithm for Wireless Sensor Networks / K. J. Jegadish Kumar, K. Chenna Kesava Reddy, S. Salivahanan // *International Journal of Computer Applications*. – 2011. – Vol. 13(4). – P. 30–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.5120/1767-2424>
9. Сухинин Б. М. Высокоскоростные генераторы псевдослучайных последовательностей на основе клеточных автоматов / Б. М. Сухинин // *Прикладная дискретная математика*. – 2010. – Т. 2 (8). – С. 34–41. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/vysokoskorostnye-generatory-psevdosluchaynyh-posledovatelnostey-na-osnove-kletochnyh-avtomatov>
10. Norziana J. A New Cryptographic Hash Function Based on Cellular Automata Rules 30, 134 and Omega-Flip Network / J. Norziana, M. Ramlan, Muhammad Reza Z'aba // *2012 International Conference on Information and Computer networks (ICICN-2012)*. – IACSIT Press, Singapore. – 2012. – V. 27. – P. 163–169. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.ipcsit.com/vol27/32-ICICN2012-N10006.pdf>
11. Wolfram S. A New Kind of Science / S. Wolfram // *Wolfram Media, Inc.* – 2002. – 1197 p. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>
12. Валь Л. О. Розробка та дослідження криптостійкого генератора двійкових послідовностей на основі клітинних автоматів / Л. О. Валь, В. В. Жихаревич, С. Е. Остапов // *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи і компоненти*. – 2009. – № 479. – С. 147–150.
13. Валь Л. О. Використання клітинних автоматів для генерування псевдовипадкових двійкових послідовностей / Л. О. Валь, В. В. Жихаревич, С. Е. Остапов // *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи і компоненти*. – 2010. – Т. 1 (1). – С. 67–72.
14. Чайка Л. О. Криптостійкий генератор псевдовипадкових послідовностей на основі клітинних автоматів / Л. О. Чайка, В. В. Жихаревич, С. Е. Остапов // *Вісник Національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичних наук*. – 2011. – № 1. – С. 215–219.
15. Валь О. Д. Розробка та дослідження генераторів ключового потоку на основі комбінації клітинних автоматів / О. Д. Валь, Л. О. Чайка, С. Е. Остапов // *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи і компоненти*. – 2012. – Т. 3 (2). – С. 6–11.
16. Остапов С. Э. Генераторы псевдослучайных последовательностей на основе клеточных автоматов / С. Э. Остапов, Л. А. Чайка // *Информационные технологии и системы в менеджменте, образовании, науке ; под. общей ред. В. С. Пономаренко*. – Харьков : Цифрова друкарня. – 2013. – № 1. – С. 178–190.
17. Потій О. В. Метод статистичного тестування NIST STS та математичне обґрунтування тестів / О. В. Потій, А. В. Леншин, Ю. А. Ізбенко // *Технічний звіт ІТТ-001-2004*. – Інститут інформаційних технологій. – 2004. – 62 с.
18. Кренгель Е. И. Исследование и разработка новых классов псевдослучайных последовательностей и устройств их генерирования для систем кодовым разделением каналов / Е. И. Кренгель // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://1-ebook.com/asu-peredacha-dannih/lineynaya-slojnost.html>
19. Система захищеного обміну даними на основі клітинних автоматів / [Л. О. Чайка, В. В. Жихаревич, Р. І. Овчар, С. Е. Остапов] // *Науковий вісник Чернівецького університету. Комп'ютерні системи і компоненти*. – 2011. – Т. 2 (1). – С. 15–20.

Article was submitted 13.01.2015.
After revision 03.02.2015.

Валь А. Д.¹, Жихаревич В. В.², Овчар Р. И.³, Остапов С. Э.⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого Национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого Национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

³Ассистент кафедры программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого Национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

⁴Д-р. физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой программного обеспечения компьютерных систем Черновицкого Национального университета имени Юрия Федьковича, Черновцы, Украина

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ КЛЮЧЕВОГО ПОТОКА НА ОСНОВЕ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ

В работе представлены результаты разработки и исследования статистических характеристик генераторов бинарного ключевого потока на основе клеточных автоматов. Разработанные генераторы используют элементарные правила межклеточного взаимодействия, «30», «86», «135» и «149», как наиболее обещающие со статистической точки зрения. Модификации правил заключались как в комбинировании самих правил взаимодействия, так и битов массивов перед выводом очередного бита. Разработано собственное правило межклеточного взаимодействия на основе сложения по модулю два. Исследования статистических характеристик выполнялись с помощью пакета NIST STS v1.8. Все разработанные генераторы продемонстрировали хорошие статистические свойства, которые подтверждают их удовлетворительную криптостойкость. Исследована также линейная сложность разработанных генераторов с использованием алгоритма Берлекемпа-Месси. Получены высокие значения линейной сложности (около половины длины клеточного автомата), что считается традиционным для такого рода систем. На основе исследованных генераторов разработана система защищенного обмена аудио-, текстовой и файловой информацией в реальном времени, что свидетельствует о высоком быстродействии системы защиты. Статистические тесты показывают, что система удовлетворяет всем требованиям NIST STS.

Ключевые слова: потоковый шифр, генератор бинарного ключевого потока, клеточный автомат, статистические характеристики, система защищенного обмена данными.

Валь О. Д.¹, Жихаревич В. В.², Овчар Р. І.³, Остапов С. Е.⁴

¹Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького Національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

²Канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького Національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

³Асистент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького Національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

⁴Д-р фіз.-мат. наук, професор, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького Національного університету імені Юрія Федьковича, Чернівці, Україна

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРІВ БІНАРНОГО КЛЮЧОВОГО ПОТОКУ НА ОСНОВІ КЛІТИННИХ АВТОМАТІВ

В роботі подано результати розробки та дослідження статистичних характеристик генераторів бінарного ключового потоку на основі клітинних автоматів. Розроблені генератори використовують елементарні правила міжклітинної взаємодії, «30», «86», «135» і «149», як найбільш перспективні зі статистичної точки зору. Модифікації правил зводилися як до комбінування власне правил взаємодії, так і бітів масиву перед виводом чергового біта. Розроблено власне правило міжклітинної взаємодії на основі додавання за модулем два. Дослідження статистичних характеристик виконувалося за допомогою пакета NIST STS v1.8. Усі розроблені генератори продемонстрували хороші статистичні властивості, що підтверджує їх задовільну криптостійкість. Досліджено також лінійну складність з використанням алгоритму Берлекемпа-Мессі та отримано високі її значення (приблизно половину довжини клітинного автомата), що вважається традиційним для такого роду систем. На базі досліджених генераторів розроблено систему захищеного обміну аудіо-, текстовою та файловою інформацією в реальному часі, що свідчить про високу швидкодію системи захисту. Результати статистичних тестів демонструють, що система задовольняє усі вимоги NIST STS.

Ключові слова: потоковий шифр, генератор бінарного ключового потоку, клітинний автомат, статистичні характеристики, система захищеного обміну даними.

REFERENCES

1. Wolfram S. Random sequence generation by cellular automata, *Advances in Applied Mathematics*, 1986, Vol. 7, pp. 123–164. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0196-8858\(86\)90028-X](http://dx.doi.org/10.1016/0196-8858(86)90028-X)
2. Kar B. K., Nandi S., Chaundhuri P. P. Theory and applications of cellular automata in cryptography, *IEEE Transactions on Computers*, 1994, Vol. 43 (12), pp. 1346–1357. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/12.338094>
3. Mazoyer J., Terrier V. Signals in one-dimensional cellular automata, *Theoretical Computer Science*, 1999, Vol. 217 (1), pp. 53–80. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975\(98\)00150-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0304-3975(98)00150-9)
4. Mihaljevic M., Zheng Y., Imai H. A cellular automaton based fast one-way hash function suitable for hardware implementation, *Public Key Cryptography: Lecture Notes in Computer Science*. Springer Verlag, 1998, pp. 217–234. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0054027>
5. Porter R. B., Bergmann N. W. Evolving FPGA based cellular automata, In: B. McKay, X. Yao, C. S. Newton, J-H. Kim, and T. Furuhashi (eds.), *SEAL: Lecture Notes in Computer Science*, 1998, Vol. 1585, pp. 114–121. DOI: http://dx.doi.org/10.1007/3-540-48873-1_16
6. Seredynski F., Bouvry P., Zomaya A. V. Cellular automata computations and secret key cryptography, *Parallel Computing*, 2003, Vol. 30, P. 753–766. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.parco.2003.12.014>
7. Rososhek S. K., Borovkov S. I., Evsjutin O. O. Kriptosistemy kletochnyh avtomatov, *Prikladnaja diskretnaja matematika*, 2008, Vol. 1 (1), pp. 43–49. – [Electronic resource]. – Access mode: <http://cyberleninka.ru/article/n/kriptosistemy-kletochnyh-avtomatov>
8. Jegadish Kumar K. J., Chenna Kesava Reddy K., Salivahanan S. Novel and Efficient Cellular Automata Based Symmetric Key Encryption Algorithm for Wireless Sensor Networks, *International Journal of Computer Applications*, 2011, Vol. 13(4), pp. 30–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.5120/1767-2424>
9. Suhinin B. M. Vysokoskorostnye generatory psevdosluchajnyh posledovatel'nostej na osnove kletochnyh avtomatov, *Prikladnaja diskretnaja matematika*, 2010, Vol. 2(8), pp. 34–41. [Electronic resource]. Access mode: <http://cyberleninka.ru/article/n/vysokoskorostnye-generatory-psevdosluchajnyh-posledovatel'nostej-na-osnove-kletochnyh-avtomatov>
10. Norziana J., Ramlan M., Muhammad Reza Z'aba A New Cryptographic Hash Function Based on Cellular Automata Rules 30, 134 and Omega-Flip Network /J. Norziana, M. Ramlan, Muhammad Reza Z'aba, 2012 *International Conference on Information and Computer networks (ICICN-2012)*, IACSIT Press, Singapore, 2012, Vol. 27, pp. 163–169. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.ipcsit.com/vol27/32-ICICN2012-N10006.pdf>
11. Wolfram S. A New Kind of Science, *Wolfram Media, Inc.*, 2002, 1197 p. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>
12. Val' L. O., Zhyharevych V. V., Ostapov S. E. Rozrobka ta doslidzhennja kryptostijkygo generatora dvijkovyh poslidovnostej na osnovi klitynyh avtomativ, *Naukovyj visnyk Chernivec'kogo universytetu. Komp'juterni systemy i komponenty*, 2009, No. 479, pp. 147–150.
13. Val' L. O., Zhyharevych V. V., Ostapov S. E. Vykorystannja klitynyh avtomativ dlja generuvannja psevdovypadkovykh dvijkovyh poslidovnostej, *Naukovyj visnyk Chernivec'kogo universytetu. Komp'juterni systemy i komponenty*, 2010, Vol. 1 (1), pp. 67–72.
14. Chaika L. O., Zhyharevych V. V., Ostapov S. E. Kryptostijkyj generator psevdovypadkovykh poslidovnostej na osnovi klitynyh avtomativ, *Visnyk Nacional'nogo universytetu imeni Tarasa Shevchenko. Serija fizyko-matematychnykh nauk*, 2011, No. 1, pp. 215–219.
15. Val' O. D., Chaika L. O., Ostapov S. E. Rozrobka ta doslidzhennja generatoriv ključovogo potoku na osnovi kombinacij' klitynyh avtomativ, *Naukovyj visnyk Chernivec'kogo universytetu. Komp'juterni systemy i komponenty*, 2012, Vol. 3(2), pp. 6–11.
16. Ostapov S. E., Chaika L. A. Generatory psevdosluchajnyh posledovatel'nostej na osnove kletochnyh avtomatov, In: *Informacionnye tehnologii i sistemy v menezhmente, obrazovanii, nauke: V. S. Ponomarenko (eds)*. Harkiv, Cyfrova drukarnja No. 1, 2013, pp. 178–190.
17. Potij O. V., Lenshyn A. V., Izbenko Yu. A. Metod statystychnogo testuvannja NIST STS ta matematychnye obgruntuvannja testiv, *Tehnichniy zvit IIT-001-2004. Instytut informatsinyh tehnologiy*, 2004, 62 p.
18. Krengel E. I. Issledovanie i razrobotka novykh klassov psevdosluchajnyh posledovatel'nostej i ustrojstv ih generirovanija dlja sistem kodovym razdeleniem kanalov. [Electronic resource]. Access mode: <http://1-ebook.com/asu-peredacha-dannih/lineynaya-slojnost.html>
19. Chaika L. O., Zhikharevich V. V., Ovchar R. I., Ostapov S. E. Sistema zahyshhenogo obminu danymi na osnovi klitynyh avtomativ, *Naukovyj visnyk Chernivets'kogo universytetu. Komp'juterni systemy i komponenty*, 2011, Vol. 2(1), pp. 15–20.

Бомба А. Я.¹, Назарук М. В.², Кунанець Н. Е.³, Пасічник В. В.⁴¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики та прикладної математики Рівненського державного гуманітарного університету, Рівне, Україна²Аспірант кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна³Д-р соц. ком., старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна⁴Д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

УЗАГАЛЬНЕНА ДИFUЗІЙНОПОДІБНА МОДЕЛЬ ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОЦЕСУ ПОШИРЕННЯ ЗНАННЕВОГО ПОТЕНЦІАЛУ

Вирішено задачу розроблення узагальненої дифузійноподібної моделі процесів перерозподілу знаннєвого потенціалу в соціокомунікаційному середовищі крупного міста з урахуванням поповнення знань агентів. Об'єктом дослідження є процес передачі знаннєвого потенціалу в освітньому середовищі на рівні шкіл міста. Предметом дослідження є методи та засоби побудови узагальненої дифузійноподібної моделі інформаційного процесу поширення знаннєвого потенціалу. Запропоновано міське освітнє середовище подавати у вигляді мережевого графа, вершини якого зображають осіб (агентів), які навчаються та беруть участь у навчально-виховних та освітніх процесах. Введено поняття знаннєвого потенціалу агентів, що подається як характеристика певної сукупності, суми знань того чи іншого індивіда, накопиченої впродовж відповідного життєвого періоду. Запропоновано оригінальний модельний підхід до інформаційних процесів поширення знаннєвого потенціалу, який базується на фізичних аналогіях, а саме явищі дифузії. Узагальнено математичну дифузійноподібну модель процесів перерозподілу знаннєвого потенціалу між агентами, що належать до однієї освітньої соціокомунікаційної спільноти (кліка), а також між агентами різних кліків в межах шкільного освітнього рівня міста. Показано вплив бібліотек на поповнення знаннєвого потенціалу агентів в межах кліка та представлені результати чисельних експериментів.

Ключові слова: освітнє середовище міста, агент, кліка, знаннєвий потенціал.

НОМЕНКЛАТУРА

ЗП – знаннєвий потенціал;

A – множина агентів;

R – множина відношень між агентами;

K – соціальна спільнота (кліка);

j – номер поточного кліка;

Φ – числова характеристика знаннєвого потенціалу;

k – номер поточного агента;

$a_{j,k}$ – k -ий агент j -го кліка;

t – час;

$\Phi_{j,k,m}$ – числова характеристика знаннєвого потенціалу k -го агента j -ї освітньої групи в деякий момент часу Δtm ;

$D_{j,k,m}$ – коефіцієнт, що характеризує здатність k -го агента j -ї освітньої групи перерозподіляти інформацію (знання) в момент часу Δtm ;

$f_{j,k,m}$ – числова характеристика основного джерела інформації (знань);

$\sigma_{k,\bar{k},\bar{k}}$ – вагові коефіцієнти;

$\Phi_{j,m}$ – числова характеристика узагальненого потенціалу K_j -ї освітньої соціокомунікаційної спільноти;

$\alpha_{j,k}$ – вагові коефіцієнти;

$D_{j,m}$ – коефіцієнт, що характеризує здатність j -ї освітньої соціокомунікаційної спільноти перерозподіляти знаннєвий потенціал в момент часу Δtm ;

$f_{j,m}$ – числова характеристика основного джерела знань (відповідного освітнього рівня в цілому);

$\omega_{j,\bar{j},\bar{j}}$ – вагові коефіцієнти;

B – сукупність бібліотек міста;

© Бомба А. Я., Назарук М. В., Кунанець Н. Е., Пасічник В. В., 2015

DOI 10.15588/1607-3274-2015-3-8

l – номер поточної бібліотеки;

γ – коефіцієнт трансформації;

$\tilde{\Phi}_{j,k,\bar{m},\bar{l}}$ – числова характеристика поповнення знаннєвого потенціалу k -го агента j -го кліку в момент часу $\Delta t\tilde{m}$ в l -тій бібліотеці;

$\tilde{\Phi}_{j,k,\bar{m}}$ – числова характеристика знаннєвого потенціалу k -го агента j -го кліку в момент часу $\Delta t\tilde{m}$ (з урахуванням бібліотечного поповнення);

a^* – агент-вчитель;

$g(\bar{q})(\)$ – функції, що характеризують взаємодію компонент знаннєвого потенціалу агента K_j кліка.

ВСТУП

Стрімкий розвиток інформаційних технологій та глобальні зміни в підходах до отримання знань – трансформуються як освітні системи, так і процеси отримання та опрацювання інформації школярами, студентами, людьми похилого віку, особами з особливими потребами та ін. стимулює застосування інноваційних підходів в широкому спектрі галузей людської діяльності, в тому числі і в освіті крупного міста. Відбувається просторове наближення та соціопсихологічна адаптація інформативних та пізнавальних освітніх матеріалів до кінцевого споживача, який використовує їх для власного самонавчання та професійного становлення в процесі неперервного навчання впродовж життя. Водночас із розвитком інформаційного суспільства суттєво зростають потоки інформації, швидкість її опрацювання та поширення.

Це в свою чергу обумовлює необхідність розроблення моделей інформаційних процесів поширення знаннє-

вого потенціалу, що уможливить проведення комплексного системного дослідження соціально-освітніх зв'язків, які, в великих соціополісах, притаманні таким освітнім структурам, як: дитячі садки, школи, технікуми, коледжі, університети – з однієї сторони та бізнесу і суспільній громаді – з іншої, з метою реалізації виваженої спільної освітньої, наукової та культурної діяльності.

Базовою соціокомунікаційною структурною одиницею при дослідженні зазначених процесів обрано миський соціополіс, яскравим представником якого виступає велике місто, яке за означенням має наступні концептуальні ознаки:

- економічну основу (виробничо-функціональний та адаптивний стрижень соціополісу як самодостатнього соціоутворення);
- розвинутий сектор соціального та гуманітарного профілю;
- розвинутий сектор освітнього та наукового профілю;
- функціональний механізм запровадження інноваційних технологій і т. ін.

Такий вибір об'єкта дослідження, яким є сучасне велике місто з розлогими та добре розвиненими системами освітньої, наукової та бізнесової галузей дозволяє комплексно розробляти та опрацювати відповідні моделі з мінімальними обмежувачими факторами. Якщо йдеться, зокрема, про сферу освіти, то гіпотетично «моделний прототип великого міста» включає дошкільні, шкільні, професійно-технічні, вищі навчальні заклади, наукові та науково-дослідні установи, які «активно продукують та споживають знання».

Освітнє соціокомунікаційне середовище міста визначаємо як багатогранне та поліфункціональне утворення, що функціонує й розвивається в реальному часі й визначеному територіальному просторі (реальному чи віртуальному), діяльністю якого можна управляти та координувати, через яке здійснюється відповідний педагогічний вплив зовнішніх об'єктивних і суб'єктивних факторів на суб'єкти навчального процесу.

Загалом широкий спектр освітніх процесів, що протікають в соціокомунікаційному середовищі великого міста концептуально вкладаються в узагальнене методологічне подання понятійно-термінологічної тріади «ІНФОРМАЦІЯ – ДАНІ – ЗНАННЯ». В статті використовуються загальноприйняті трактування цих термінів. Для поняття «знання» запропоновано подавати додаткову характеристику, за допомогою якої фіксується певний рівень знань особи, що подається як характеристика певної сукупності, суми знань того чи іншого індивіда, накопиченої впродовж відповідного життєвого періоду. Пропонується означувати цю характеристику як «знанневий потенціал» – Φ . Знанневим потенціалом може бути наділений як реальний суб'єкт, так і деякий віртуальний – бібліотека, інформаційний інтернет-ресурс і т.п.

Метою даної роботи є узагальнення, побудованої нами [1], дифузійноподібної моделі інформаційних процесів поширення знанневого потенціалу в соціокомунікаційному середовищі великого міста. Об'єктом дослідження є процес передачі знанневого потенціалу в освітньому середовищі на рівні шкіл міста. Предметом дослідження є методи та засоби побудови узагальненої дифузійноподібної моделі інформаційного процесу поширення знанневого потенціалу.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Миське освітнє соціокомунікаційне середовище в роботі [2], запропоновано подавати у вигляді мережевого графа $G = (A, R)$, де $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ – не порожня скінченна множина вузлів (агентів), $R = \{r_1, r_2, \dots, r_k\}$ – множина невпорядкованих пар різних елементів з A (відношення між агентами).

Під агентами розуміють вихованців, школярів, студентів, аспірантів та інших осіб, які навчаються, а також вчителів, вихователів, науково-педагогічних працівників, бібліотекарів, батьків та представників бізнесу, установ, фірм, корпорацій, громадських організацій великого міста, які беруть участь у навчально-виховних та освітніх процесах.

Відношення між агентами можуть, зокрема, інтерпретуватись, як «дружба», «співпраця», «комунікація», «навчання» та інші форми взаємодії, які притаманні суб'єктам освітнього соціокомунікаційного середовища міста.

Агенти, в межах певного освітнього рівня можуть об'єднуватись за спільними ознаками та властивостями (наприклад, вік, рівень освіти, навчання в одному закладі), тобто утворюють, так звані, класи (соціальні спільноти) $K_j, (j = \overline{1, n})$ – підграфи чи класи, для яких зв'язки між вузлами всередині такого класу чи групи є міцніші та чисельніші, ніж між вузлами інших класів чи груп, а відповідно підграфів. Основним об'єднуючим фактором при формуванні та функціонуванні такої освітньої соціальної групи є необхідність підвищення знанневого потенціалу Φ її учасників за певним профілем та рівнем.

Спостерігається аналогія між процесом передачі знань та кристалізації твердого тіла з розплаву при відведенні від нього тепла. Як логічний наслідок такого трактування концепту поширення знанневого потенціалу і є спроба опису цих процесів у вигляді відповідної дифузійноподібної моделі.

Відомо, що дифузія (лат. diffusion – поширення, розсіювання, взаємодія) в класичному традиційному розумінні терміну, є процес взаємного проникнення молекул або атомів однієї речовини між молекулами або атомами іншої, що зазвичай приводить до вирівнювання їхніх концентрацій по всьому займаному об'єму. У деяких ситуаціях одна з речовин уже має вирівняну концентрацію, і говорять про дифузію однієї речовини в іншій [3]. Дифузійні процеси – це узагальнене представлення просторово розподілених явищ різної природи. Їх об'єднує той факт, що всі вони відбуваються в активних середовищах, які підтримують їх розвиток на всьому просторі.

Традиційно процеси дифузії за умов конвекції та масообміну (наявності внутрішніх джерел) описують за допомогою наступного диференційного рівняння:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) - \left(v_x \frac{\partial \Phi}{\partial x} + v_y \frac{\partial \Phi}{\partial y} + v_z \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t, \Phi, \alpha_1, \alpha_1, \dots, \beta_1, \beta_2, \dots), \quad (1)$$

де Φ – концентрація речовини, яка бере участь у моделюванні, D – коефіцієнт дифузії, t – час, x, y, z – просторові координати, v_x, v_y, v_z – швидкості конвективного

перенесення, f – задана функція, що характеризує інтенсивність внутрішніх джерел (забруднень, тепла, радіації тощо, в залежності від предметної області), α, β – параметри, що характеризують відповідно «внутрішні індивідуальності» та зовнішні фактори.

У даній роботі поставлена задача, використовуючи рівняння (1), опису (моделювання) у вигляді узагальноної дифузійноподібної моделі процесів перерозподілу знаннєвого потенціалу Φ в межах шкільного освітнього рівня міста з урахуванням поповнення знань агентів.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Результати досліджень поширення інформаційних потоків в соціумі подані у роботах професора Д. В. Ланде, зокрема в [4] описано логістичну модель взаємодії інформаційних потоків; запропоновані підходи до створення інструментів моніторингу, адаптивного агрегування та опрацювання потоків інформації із глобальних комп'ютерних мереж для забезпечення інформаційно-аналітичної діяльності; запропоновано оригінальний метод вордлет-діаграм для аналізу та візуалізації розповсюдження інформаційних масивів; з використанням математичного апарату клітинних автоматів розроблені дифузійні моделі поширення інформації в соціальних та соціокомунікаційних сферах [5, 6].

Процеси обробки інформації у формі знань виходять на перший план при розгляді освітнього простору як єдиної системи. Саме знання є одним з найбільш суттєвих і значущих ресурсів у складі навчального середовища. Виникають різноманітні форми і засоби репрезентації знання, організації навчально-пізнавальної діяльності та комунікації, набувають поширення численні напрямки розробки систем, що ґрунтуються на знаннях [7].

З'являється щораз більше наукових праць присвячених вивченню та аналізу проблем управління знаннями і пов'язаними з ними процесами організації, збирання, дифузії, застосування і експлуатації з метою досягнення цілей організації крупного міста [8, 9]. Проблеми розвитку управління знаннями розглядаються в роботах таких зарубіжних та вітчизняних вчених, як І. Нонака, Е. Уілера, Х. Такеучі, В. Томаха, А. Мирошніченка та ін. Зокрема в роботах [10, 11] побудовані математичні моделі поширення знань та управління процесом навчання студентів, а також розроблені гібридні агент-орієнтовані моделі оцінювання знань учасників дистанційного навчання на основі використання штучних нейронних мереж.

У роботах вчених отримав розвиток ймовірно-статистичний підхід до аналітичного моделювання навчального процесу. Засвоєння або забування одиниці знань розглядається як випадкова подія, а навчання характеризується параметрами, функціонально пов'язаними з часом. У більш загальному вигляді стохастичний за своєю природою процес навчання розглядається як напівмарківський, при якому ймовірність переходу з одного стану в інший залежить як від вихідного стану, так і від часу, в який здійснюється перехід [12]. Враховуючи характер навчання, вважають, що практично можливими є лише переходи в сусідні стани, які можуть залежати від часу. В результаті отримують системи диференціальних рівнянь з залежними від часу коефіцієнтами, які не завжди мають аналітичні рішення.

Проте, в існуючих дослідженнях не досліджено адаптивні характеристики освітніх об'єктів та відсутні моделі передачі знаннєвого потенціалу від одних суб'єктів освітнього середовища іншим, тому є спроба опису інформаційних процесів поширення знаннєвого потенціалу у вигляді узагальноної дифузійноподібної моделі.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Введемо поняття знаннєвого потенціалу $\Phi_{j,k,m}$ агента a_{jk} ($j = \overline{1, k}, k = \overline{1, k_j}$) в деякий момент часу $t = t_m$ ($m = 0, 1, 2, \dots; t_m = \Delta t m$, де Δt – деякий часовий інтервал). Для зручності викладу покладемо $\Delta t = 1$. Процес поширення знаннєвого потенціалу між агентами в межах деякого кліка K_j , за формулою (1) запишемо:

$$f_{j,k,m} + D_{j,k,m} \sum_{1 \leq \underline{k} < k < \bar{k} \leq k_j} \sigma_{k, \underline{k}, \bar{k}} \left((\Phi_{j, \bar{k}, m} - \Phi_{j, k, m}) - (\Phi_{j, k, m} - \Phi_{j, \underline{k}, m}) \right) = \Phi_{j, k, m+1} - \Phi_{j, k, m} \text{ або}$$

$$\Phi_{j, k, m+1} = \Phi_{j, k, m} + f_{j, k, m} + D_{j, k, m} \times$$

$$\times \sum_{1 \leq \underline{k} < k < \bar{k} \leq k_j} \sigma_{k, \underline{k}, \bar{k}} \left(\Phi_{j, \bar{k}, m} - 2\Phi_{j, k, m} + \Phi_{j, \underline{k}, m} \right),$$

$$1 \leq \underline{k} < k < \bar{k} \leq k_j, \bar{k} \neq \underline{k}. \quad (2)$$

Зауважимо, що джерелом інформації може бути один, або декілька із виділених агентів певної соціокомунікаційної спільноти.

Можливими є різні варіанти встановлення шляхів (способів) перерозподілу інформації (знань) між агентами, що належать до однієї соціальної спільноти (кліку), групами агентів різних кліків, а також між кліками в межах деякого освітнього рівня та в освітньому соціокомунікаційному середовищі міста загалом (при цьому слід вводити додатковий індекс, що відповідав би тому чи іншому освітньому рівню).

Одним із варіантів введення узагальноного потенціалу K_j -ї освітньої соціокомунікаційної спільноти $\Phi_{j,m}$ є представлення його у вигляді деякої функції від $\Phi_{j,k,m}$, зокрема, у вигляді узагальноного середнього арифметичного через потенціали агентів даної спільноти:

$$\Phi_{j,m} = \frac{1}{k_j} \sum_{k=1}^{k_j} \alpha_{j,k} \Phi_{j,k,m}. \quad (3)$$

Тоді закон перерозподілу відповідного «усередненого» знаннєвого потенціалу у часі між кліками можемо подати у вигляді:

$$\Phi_{j,m+1} - \Phi_{j,m} = f_{j,m} + D_{j,m} \times$$

$$\times \sum_{1 \leq \underline{j} < j < \bar{j} \leq j_k} \omega_{j, \underline{j}, \bar{j}} \left((\Phi_{j, \bar{j}, m} - \Phi_{j, m}) - (\Phi_{j, m} - \Phi_{j, \underline{j}, m}) \right) \text{ або}$$

$$\Phi_{j,m+1} = \Phi_{j,m} + f_{j,m} + D_{j,m} \times$$

$$\times \sum_{1 \leq \underline{j} < j < \bar{j} \leq j_k} \omega_{j, \underline{j}, \bar{j}} \left(\Phi_{j, \bar{j}, m} - 2\Phi_{j, m} + \Phi_{j, \underline{j}, m} \right),$$

$$1 \leq \underline{j} < j < \bar{j} \leq j_k, \bar{j} \neq \underline{j}. \quad (4)$$

Зауважимо, що джерелом поширення інформації (знань) може бути одна, або декілька із вибраних освітніх соціокомунікаційних спільнот певного освітнього рівня, наприклад $f_{j,m} = \theta_m \Phi_{j,m}$, де $j = \bar{j}_1, \bar{j}_2, \dots, \bar{j}_k, 1 < \bar{j}_1 < \bar{j}_2 < \dots < \bar{j}_k < j_k$.

У запропонованих вище моделях, не враховані психофізіологічні особливості агентів: забування, інерції, сприйняття та осмислення нової інформації тощо. Очевидно, зі зміною часу та з врахуванням вказаних особливостей агентів, в межах деякої соціокомунікаційної спільноти рівень знаннєвого потенціалу основного джерела знань, в ролі якого виступає вчитель, буде спадати, тому необхідно шукати шляхи його підвищення або утримування на деякому рівні. Запропонуємо варіант вирішення задачі підвищення «живлення» знаннєвого потенціалу $\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m}}$ деякого агента $a_{j,k}$ в межах кліка K_j в момент часу \tilde{m} .

Як приклад, поповнити знаннєвий потенціал агент може за рахунок отримання необхідної та корисної інформації з міських бібліотек B_1, \dots, B_l , де $B_1 = B_{УБС}$ – бібліотеки міської Центральної бібліотечної системи; $B_2 = B_{ДНЗ}$ – бібліотеки дошкільних навчальних закладів; $B_3 = B_{СНЗ}$ – бібліотеки середніх навчальних закладів освіти; $B_4 = B_{ПТНЗ}$ – бібліотеки професійно-технічних навчальних закладів; $B_5 = B_{ВНЗ}$ – бібліотеки вищих навчальних закладів; $B_6 = B_{НУ}$ – бібліотеки наукових установ міста; $B_7 = B_{П}$ – профспілкові бібліотеки; $B_8 = B_{ІН}$ – інші бібліотеки міста.

Скажімо, у бібліотеці навчального закладу (школи чи ВНЗ) відбувається передача знаннєвого потенціалу шляхом видачі користувачу (учню чи студенту) комплексу підручників та навчальних посібників, при інформаційному обслуговуванні у відповідь на певний запит тематичного характеру чи щодо отримання конкретного видання.

Через $\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}}$ позначатимемо числову характеристику поповнення знаннєвого потенціалу k -го агента j -го кліка в момент часу \tilde{m} ($\tilde{m} = \overline{1, m}$) в l -тій бібліотеці, а через $\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m}}$ – відповідний знаннєвий потенціал даного агента (з урахуванням бібліотечного поповнення):

$$\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m}} = \Phi_{j,k,m} + \sum_{\tilde{l}=1}^l \sum_{\tilde{m}=0}^m \tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}} \quad (5)$$

(вважатимемо, що $\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}} \geq 0$, зокрема $\tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}} = 0$ у випадку, якщо k -ий агент j -го кліка не поповнює свій науковий потенціал за рахунок бібліотек або не отримав нових знань).

На рис. 1 схематично зображено вплив бібліотек на поповнення знаннєвого потенціалу k -го агента, який, в свою чергу, передає отриманні знання іншим агентам в межах певної соціокомунікаційної спільноти (K_j -го кліка).

Згідно (2–4) джерела інформації кліків та їх агентів можемо поповнити, наприклад, так:

$$f_{j,k,m} = \gamma_{j,k,m} (\Phi_{j,k,m} + \sum_{\tilde{l}=1}^l \sum_{\tilde{m}=0}^m \tilde{\Phi}_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}}), \quad (6)$$

де $\gamma_{j,k,m}$ – коефіцієнт трансформації (знаннєвих потенціалів окремих кліків в деяке «спільне» джерело знань певної спільноти).

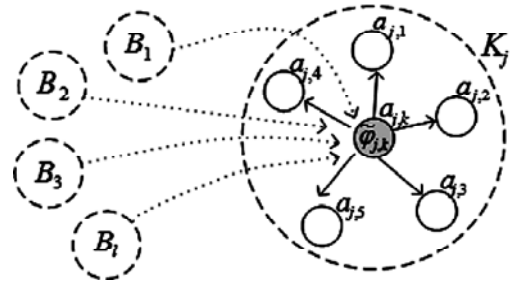


Рисунок 1 – Зображення поповнення ЗП агента з бібліотек B_1, \dots, B_l

В роботі [1] наведено приклад, коли джерелом знань є один із агентів в межах даної освітньої соціокомунікаційної спільноти. При цьому невідомі коефіцієнти можна знайти шляхом розв’язування обернених задач типу ідентифікації параметрів моделей (див., напр., [13]).

В описаних вище моделях ми оперували із деяким абстрактним (надто усередненим) потенціалом Φ . В дійсності ж кожний вчитель, учень, тощо (агент) характеризується багатокритеріальними факторами (вектор-потенціалом $\Phi = (\Phi(1), \Phi(2), \dots, \Phi(q))$). При цьому, відповідний знаннєвий потенціал k -го агента j -го кліку в момент часу m позначимо через: $\Phi_{j,k,m} = (\Phi(1)_{j,k,m}, \dots, \Phi(q)_{j,k,m})$.

Тоді, аналогічно до (2), процес поширення знаннєвого вектор-потенціалу між агентами в межах деякого кліка K_j дифузійноподібно запишемо у вигляді:

$$\begin{cases} \Phi(\tilde{q})_{j,k,m+1} = \Phi(\tilde{q})_{j,k,m} + f(\tilde{q})_{j,k,m} + D(\tilde{q})_{j,k,m} \times \\ \times \sum_{1 \leq \underline{k} < k < \bar{k} \leq k_j} \sigma_{k,\underline{k},\bar{k}} (\Phi(\tilde{q})_{j,\underline{k},m} - 2\Phi(\tilde{q})_{j,k,m} + \Phi(\tilde{q})_{j,\bar{k},m}) + \\ + g(\tilde{q}) (\Phi(1)_{j,k,m}, \dots, \Phi(q)_{j,k,m}) \\ \tilde{q} = \overline{1, q}, \end{cases}$$

де $g(\tilde{q}) (\Phi(1)_{j,k,m}, \dots, \Phi(q)_{j,k,m})$ – функції, що характеризують взаємодію компонент знаннєвого потенціалу даного агента K_j кліка.

У випадку врахування взаємодії компонент знаннєвого потенціалу в межах соціокомунікаційної спільноти (даного кліка K_j) матимемо:

$$g(\tilde{q}) = g(q) (\Phi(1)_{j,1,m}, \dots, \Phi(1)_{j,k_j,m}, \dots, \Phi(q)_{j,1,m}, \dots, \Phi(q)_{j,k_j,m}).$$

Аналогічно до (5–6), з урахуванням набуття знань в бібліотеках, матимемо:

$$\begin{aligned} \Phi(\tilde{q})_{j,k,m+1} = & \Phi(\tilde{q})_{j,k,m} + \gamma(\tilde{q})_{j,k,m} (\Phi(\tilde{q})_{j,k,m} + \\ & + \sum_{\tilde{l}=1}^l \sum_{\tilde{m}=0}^m \tilde{\Phi}(\tilde{q})_{j,k,\tilde{m},\tilde{l}}) + D(\tilde{q})_{j,k,m} \sum_{1 \leq \underline{k} < k < \bar{k} \leq k_j} \sigma_{k,\underline{k},\bar{k}} (\Phi(\tilde{q})_{j,\underline{k},m} - \\ & - 2\Phi(\tilde{q})_{j,k,m} + \Phi(\tilde{q})_{j,\bar{k},m}) + g(q) \times \\ & \times (\Phi(1)_{j,1,m}, \dots, \Phi(1)_{j,k_j,m}, \dots, \Phi(q)_{j,1,m}, \dots, \Phi(q)_{j,k_j,m}). \end{aligned}$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Виконаємо експериментальне дослідження розроблених дифузійноподібних моделей поширення знаннєвого потенціалу між агентами, що належать до однієї освітньої соціокомунікаційної спільноти (квіку). Для цього подамо характерні модельні параметри, що входять в формули (2–4), а саме задаємо початковий стан системи (розподіл знаннєвого потенціалу при $t = 0$): $\Phi_{j,k,0} = \tilde{\Phi}_{j,k}$, $j = \overline{1, n}$, $k = \overline{1, k_j}$ ($\sum_{j=1}^n k_j$ – значень). За формулами (3) обчислимо узагальнений потенціал K_j -ї освітньої соціокомунікаційної спільноти в початковий момент часу:

$$\Phi_{j,0} = \frac{1}{k_j} \sum_{k=1}^{k_j} \alpha_{j,k} \Phi_{j,k,0}.$$

За формулами (2) та (4) (при $t = 0$) обчислюємо $\Phi_{j,k,1}$ та $\Phi_{j,1}$ і переходимо до наступного часового інтервалу.

При цьому, як і в класичних дифузійних задачах, нам не вистачатиме, так би мовити, «крайніх значень» знаннєвого потенціалу Φ (тобто при $k = 1$ та $k = j$), що приводить до необхідності встановлення ієрархії агентів в межах кожного квіку заданого освітнього рівня (наприклад, «вчитель-учень»), а також «крайніх умов» для характеристики знаннєвих потенціалів кожного квіку. В цьому випадку маємо 2 варіанти їх задання:

1) аналогічно до внутрішніх (агентів) характеристик вводимо ієрархію квіків i , при цьому, задаємо потенціали «крайніх», наприклад, встановлюємо ієрархію шкіл в певному районі міста задаючи потенціали «найслабшої» та «найсильнішої»;

2) вважатимемо, що квіки є рівноправні в межах освітнього рівня, при цьому, упорядкування все ж вводимо «чисто формально» (не за пріоритетами) вважаючи, що $\Phi_{1,\dots} = \Phi_{n,\dots}$, тобто задаємо умови аналогічні умовам періодичності (дифузії).

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Результати експериментів дослідження розроблених дифузійноподібних моделей поширення знаннєвого потенціалу між агентами наведено на рис. 2–3. Зокрема, на рис. 2 подано результати розрахунку знаннєвого потенціалу за традиційною та дифузійноподібною схемами, а на рис. 3

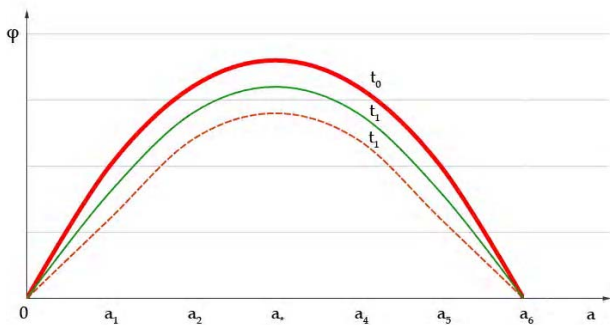


Рисунок 2 – Результати розрахунку знаннєвого потенціалу в початковий момент часу $t_0 = 0$ (жирним) та в момент часу $t_1 = 1$ за традиційною дифузійною схемою (суцільна лінія) та дифузійноподібною (пунктир)

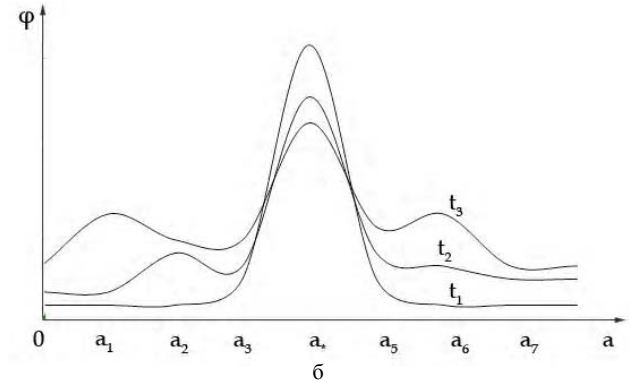
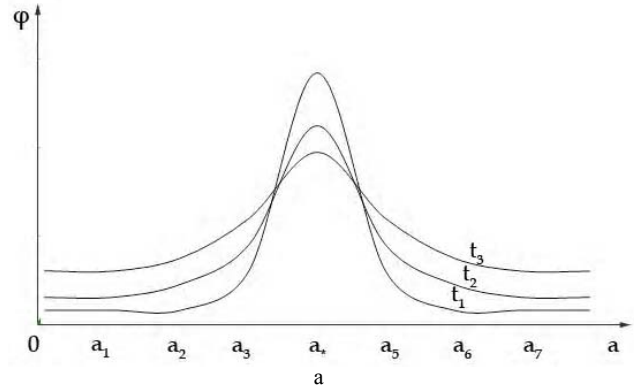


Рисунок 3 – Схематичний розподіл підвищення знаннєвого потенціалу агентів в межах заданого квіку: а – агенти поповнюють знаннєвий потенціал від вчителя; б – агенти поповнюють знаннєвий потенціал не лише від вчителя, а читаючи книги з бібліотеки

зображено розподіл підвищення «живлення» знаннєвого потенціалу агентів в межах квіку (за рахунок отримання необхідної та корисної інформації з міських бібліотек).

6 ОБГОВОРЕННЯ

Підкреслимо, що використовуючи класичні дифузійні моделі для опису інформаційного процесу поширення знаннєвого потенціалу між агентами в межах деякого квіку K_j суттєво відрізняються від описаних вище дифузійноподібних. На рисунку 2 жирною лінією зображено розподіл знаннєвого потенціалу в початковий момент часу $t_0 = 0$, суцільною лінією – розподіл знаннєвого потенціалу, розрахований за традиційною дифузійною схемою в момент часу $t_1 = 1$, а пунктирною лінією зображено дифузійноподібні перерозподіли згідно формул (1)–(3) при $f_{j,k} = 1$, $\sigma = 1$, $D = p$ (де $p = 1$ при взаємодії навколишніх сусідніх агентів із заданими, $p = 0,1$ – в інших випадках) коли знаннєві потенціали знань «крайніх» агентів в межах деякого соціального кільця рівні нулю, а початковий їх розподіл задано симетрично: $\Phi_{0,0} = 0$, $\Phi_{1,0} = 5$, $\Phi_{2,0} = 8$, $\Phi_{3,0} = 9$, $\Phi_{4,0} = 8$, $\Phi_{5,0} = 5$, $\Phi_{6,0} = 0$. Зокрема, як і слід було чекати, значення знаннєвого потенціалу, отриманого згідно запропонованих формул, приймають менші значення в порівнянні з знайденими за традиційною дифузійною схемою (пунктирна лінія проходить нижче суцільної при $t = t_1$). Це пояснюється тим, що агент (вчитель) a_* передає («витрачає»), в даному випадку, свій знаннєвий

потенціал не лише навколишнім агентам (учням) (які, згідно класичної дифузійноподібної моделі, в свою чергу, передають отриману інформацію своїм «сусідам»), але й одночасно всім іншим агентам в межах деякого кліка.

Особливості ситуаційного стану, зображеного на рис. 3, де згідно формул (2)–(6) крім потенціалу Φ_j ,* агента-вчителя a_* (див рис. 3а), враховані потенціали знань агентів-учнів, які поповнили свій потенціал знань від вчителя та читаючи книги з бібліотеки (наприклад, агент a_2 в момент часу t_2 поповнив потенціал знань, наприклад, в бібліотеці B_1 , а агенти a_1 та a_6 в бібліотеках B_2 та B_3 відповідно в наступний момент часу, з метою не загромадження рисунка не конкретизуємо номер бібліотеки, оскільки крім координат Φ та a необхідно вводити третю координату) в межах заданої освітньої соціокомунікаційної спільноти K_j в різні моменти часу. Бачимо, що модель процесу «допомоги» агенту-вчителю підтримки певного рівня знань агентів-учнів бібліотеками соціокомунікаційного середовища міста є відкритою. Вона доступна для різного роду конкретизації та узагальнення.

Очевидно, що доволі «проста» модель в контексті її комп'ютерної реалізації (де фігурують послідовності циклів в послідовностях циклів, багато поверхневі системи, тощо) вимагає значних обчислювальних потужностей з використанням мультимедійних та кластерних архітектур.

ВИСНОВКИ

В роботі побудовано узагальнену дифузійноподібну модель інформаційних процесів поширення знаннєвого потенціалу в освітньому соціокомунікаційному середовищі міста. Зокрема, акцентовано увагу на описі (модельованні) процесів перерозподілу знаннєвого потенціалу в межах шкільного освітнього рівня міста, при цьому сформовано відповідні зовнішні та внутрішні залежності між учасниками (агентами) навчально-виховних та освітніх процесів. Описано процеси перерозподілу ЗП між агентами, що належать до однієї освітньої соціокомунікаційної спільноти (кліка). У запропонованих моделях, врахований той факт, що зі зміною часу та згідно з психофізіологічними особливостями агентів (забування, інерції, сприйняття та осмислення нової інформації тощо) рівень знаннєвого потенціалу основного джерела знань, в ролі якого виступає вчитель, як правило, спадатиме. Тому вперше запропоновано варіанти вирішення задачі моделювання процесів підвищення «живлення» знаннєвого потенціалу агентів в межах заданого кліка за рахунку отримання необхідної та корисної інформації з інших (сторонніх) джерел, а саме, як приклад, з міських бібліотек.

В перспективі подальших досліджень – врахування конкретних залежностей, що характеризують взаємодію (взаємовплив) компонент знаннєвого потенціалу різних агентів в межах заданих соціокомунікаційних спільнот (кліків), а також введення до розгляду багатокомпонентного вектора знаннєвого потенціалу (розв'язання відповідної задачі для системи різницевого рівняння). Очевидно, що характеристика агентів з різного роду знаннєвими потенціалами (що характеризують, наприклад, знання з математики, фізики, літератури тощо, вміння приймати різного роду рішення) забезпечує можливість конкретизації даних моделей, а, отже, моделювання більш реальних ситуаційних станів, що, безумовно, має значну практичну цінність.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Інформаційні технології моделювання освітнього соціокомунікаційного середовища великого міста», а також в рамках держбюджетної науково-дослідної теми Рівненського державного гуманітарного університету «Розробка методів та графічного формату прогресуючого стиснення зображень без втрат» (номер державної реєстрації 0113U001203).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бомба А. Я. Побудова дифузійноподібної моделі інформаційного процесу поширення знаннєвого потенціалу / А. Я. Бомба, М. В. Назарук, В. В. Пасічник // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2014. – № 800 : Комп'ютерна наука та інформаційні технології. – С. 35–45.
2. Назарук М. В. Моделювання міського освітнього середовища як профільної соціальної мережі / М. В. Назарук, В. В. Пасічник / Міжнародний науково-технічний журнал «Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія». – Вінниця : ВНТУ, 2013. – № 3 (28). – С. 42–47.
3. Будник А. Ф. Тепломасоперенос у процесах і матеріалах дизайну матеріалів: Навчальний посібник / А. Ф. Будник. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 158 с.
4. Ландэ Д. В. Моделирование динамики информационных потоков / Д. В. Ландэ // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6. – С. 652–654.
5. Додонов А. Г. Сетевые информационные потоки как содержательная составляющая информационно-аналитических систем / А. Г. Додонов, Д. В. Ландэ, В. В. Жигало // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2010. – № 1. – С. 39–48.
6. Ландэ Д. В. Модель диффузии информации / Д. В. Ландэ // Информационные технологии и безопасность. Менеджмент информационной безопасности. Сборник научных трудов Института проблем регистрации информации. – 2007. – Вып. 10. – С. 51–67.
7. Шишкіна М. П. Системи та засоби моделювання знання у єдиному інформаційно-освітньому просторі / М. П. Шишкіна // Актуальні проблеми психології: Психологічна теорія і технологія. – 2009. – № 6. – С. 317–327.
8. Сявак М. С. Нечітко-інтервальні методи оцінки ризику та ентропії поведінки соціально-економічної системи / М. С. Сявак, О. М. Третяк // Економічна кібернетика. – 2006. – № 3–4 (39–40). – С. 53–61.
9. Яцишин Ю. В. Модель управління містом на основі термодинамічних законів / Ю. В. Яцишин, Н. Б. Шаховська // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія Інформаційні системи та мережі. – 2000. – № 406. – С. 239–247.
10. Добрынина Н.Ф. Математические модели распространения знаний и управление процессом обучения студентов / Н. Ф. Добрынина // Научно-теоретический журнал «Фундаментальные исследования». – 2009. – № 7. – С. 7–9.
11. Артеменко В.Б. Гибрид агент-ориентированной модели оценки знаний участниками дистанционного обучения / В. Б. Артеменко // Образовательные технологии и общество. – 2011. – № 2. – С. 7423–434.
12. Петраш А. Методи інформаційно-математичного моделювання навчального процесу / А. Петраш // Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі : матеріали 3-ої наук.-практ. конф., 18–20 жовт. 2011 р., Львів / Нац. ун-т «Львів. політехніка»; [редкол.: Д. В. Федасюк та ін.]. – Л. : Вид-во Львівської політехніки, 2011. – С. 128–132.
13. Сергиенко И. В. Идентификация параметров системы конвективно-диффузионного переноса / И. В. Сергиенко, В. С. Дейнека // Кибернетика и системный анализ. – 2009. – № 1. – С. 42–63.

Стаття надійшла до редакції 26.01.2015.

Після доробки 06.04.2015.

Бомба А. Я.¹, Назарук М. В.², Кунанець Н. Е.³, Пасичник В. В.⁴

¹Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інформатики та прикладної математики Ровенського державного гуманітарного університету, Ровно, Україна

²Аспірант кафедри інформаційних систем і мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Д-р соц. ком., старший науковий співробітник, доцент кафедри інформаційних систем і мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

⁴Д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних систем і мереж Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

ОБОБЩЕННАЯ ДИФFUЗИНОПОДОБНА МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОГО ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА ЗНАНИЙ

Решена задача разработки обобщенной диффузноподобной модели процессов перераспределения потенциала знаний в пределах школьного образовательного уровня города с учетом пополнения знаний агентов. Объектом исследования является процесс передачи потенциала знаний в образовательной среде на уровне школ города. Предметом исследования являются методы и средства построения обобщенной диффузноподобной модели информационного процесса распространения потенциала знаний. Предложено образовательную среду города подавать в виде сетевого графа, вершины которого изображают агентов, которые учатся и участвуют в учебно-воспитательных и образовательных процессах. Введено понятие потенциала знаний агентов, подаваемого как характеристика определенной совокупности, суммы знаний того или иного индивида, накопленной в течение соответствующего жизненного периода. Предложен оригинальный модельный подход к информационным процессам распространения потенциала знаний, основанный физических аналогиях, а именно явлении диффузии. Обобщенно математическую диффузноподобную модель процессов перераспределения потенциала знаний между агентами, относящихся к одному образовательному социокоммуникационному сообществу (клика), а также между агентами различных кликов в пределах школьного образовательного уровня города. Показано влияние библиотек на пополнение потенциала знаний агентов в пределах клика и представлены результаты численных экспериментов.

Ключевые слова: образовательная среда города, агент, клика, потенциал знаний.

Bomba A. Y.¹, Nazaruk M. V.², Kunanec N. E.³, Pasichnyk V. V.⁴

¹Dr.Sc., Professor, Head of the Department of Computer Science and Applied Mathematics, Rivne State Humanitarian University, Ukraine

²Postgraduate student of Information Systems and Networks department, National University «Lviv polytechnic», Lviv, Ukraine

³Dr.Sc., Senior Researcher, Associate Professor of Information Systems and Networks department, National University «Lviv polytechnic», Ukraine

⁴Dr.Sc., Professor, Professor of Information Systems and Networks department, National University «Lviv polytechnic», Ukraine

SUMMARIZED DIFFUSION-LIKE MODEL OF INFORMATIONAL PROCESS OF THE KNOWLEDGE POTENTIAL PROPAGATION

The task of development of a generalized diffusion-like model of redistribution processes of knowledge potential in the city socio communicative environment considering replenishment knowledge agents have been decided. Object of research is the process of transferring of knowledge potential in the educational environment at city schools level. The subjects of research are the methods and tools for building a generalized diffusion-like model of information dissemination process of knowledge potential. The educational environment of the city have been offered to present as network graph, whose vertices represent people (agents), who study and participate in educational processes. The notion of knowledge potential of agents that presented as a characteristic of the certain set, the sum of knowledge of an individual's accumulated during the corresponding period of life have been introduced. The original model approach to information processes dissemination of knowledge potential based on physical analogies, namely the phenomenon of diffusion have been offered. The mathematical and diffusion model of processes redistribution of knowledge potential between agents, that are belonging to the one educational social and communication community (clique) and between agents of different clicks within the limits of school educational level of the city was generalized. The influence of libraries on replenishment the knowledge potential of agents within the limits of click shown and the results of numeral experiments have been presented.

Keywords: educational environment of the city, agent, clique, knowledge potential.

REFERENCES

- Bomba A. Ja., Nazaruk M. V., Pasichnyk V. V. Pobudova dyfuzijnopodibnoi' modeli informacijnogo procesu poshyrennja znannjevoogo potencialu, *Visnyk Nacional'nogo universytetu «L'vivs'ka politehnika»*, 2014, № 800: Komp'juterni nauky ta informacijni tehnologii', pp. 35–45.
- Nazaruk M. V., Pasichnyk V. V. Modeljuvannja mis'kogo osvith'ogo seredovyssha jak profil'noi' social'noi' merezhi, *Mizhnarodnyj nauko-vechnyj zhurnal «Informacijni tehnologii' ta komp'juterna inzhenerija»*. Vinnycja, VNTU, 2013, No. 3 (28), pp. 42–47.
- Budnyk A. F. Teplomasperenos u procesah i materialah dyzajnu materialiv: Navchal'nyj posibnyk. Sumy, Vyd-vo SumDU, 2008, 158 p.
- Lande D. V. Modelirovanie dinamiki informacionnyh potokov, *Fundamental'nye issledovanija*, 2012, No. 6, pp. 652–654.
- Dodonov A. G., Lande D. V., Zhigalo V. V. Setevye informacionnye potoki kak sodержatel'naja sostavl'jajushhaja informacionno-analiticheskijh sistem, *Restracija, zberigannja i obrobka danih*, 2010, No. 1, pp. 39–48.
- Lande D. V. Model' diffuzii informacii, *Informacionnye tehnologii i bezopasnost'.* Menedzhment informacionnoj bezopasnosti. *Sbornik nauchnyh trudov Instituta problem registracii informacii*, 2007, Vyp. 10, pp. 51–67.
- Shyshkina M. P. Systemy ta zasoby modeljuvannja znannja u jedynomu informacijno-osvith'omu prostori, *Aktual'ni problemy psihologii'*: *Psychologichna teorija i tehnologija*, 2009, No. 6, pp. 317–327.
- Sjavavko M. S., Tretjak O. M. Nechitko-interval'ni metody ocinky ryzyku ta entropii' povedinky social'no-ekonomichnoi' systemy, *Ekonomichna kibernetika*, 2006, No. 3–4(39–40), pp. 53–61.
- Jacyshyn Ju. V., Shahovs'ka N. B. Model' upravlinnja mistom na osnovi termodinamichnyh zakoniv, *Visnyk Nacional'nogo universytetu «L'vivs'ka politehnika».* *Serija Informacijni systemy ta merezhi*, 2000, No. 406, pp. 239–247.
- Dobrynina N. F. Matematicheskie modeli rasprostraneniya znaniy i upravlenie processom obuchenija studentov, *Nauchno-teoreticheskij zhurnal «Fundamental'nye issledovanija»*, 2009, No. 7, pp. 7–9.
- Artemenko V. B. Gibrid agent-orientirovannoj modeli ocenki znaniy uchastnikami distancionnogo obuchenija, *Obrazovatel'nye tehnologii i obshhestvo*, 2011, No. 2, pp. 423–434.
- Petrash A. Metody informacijno-matematicheskogo modeljuvannja navchal'nogo procesu, *Innovacijni komp'juterni tehnologii' u vyshhij shkoli : materialy 3-oi' nauk.-prakt. konf., 18–20 zhovt. 2011 r., L'viv / Nac. un-t «L'viv. politehnika» ; [redkol.: D. V. Fedasjuk ta in.]*. Leningrad, Vyd-vo L'viv. politehniki, 2011, pp. 128–132.
- Sergienko I. V., Dejneka V. S. Identifikacija parametrov sistemy konvektivno-diffuzionnogo perenosa, *Kibernetika i sistemnyj analiz*, 2009, No. 1, pp. 42–63.

УПРАВЛІННЯ У ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМАХ

УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

CONTROL IN TECHNICAL SYSTEMS

УДК 004.738.5

Алексеева К. А.¹, Берко А. Ю.², Висоцька В. А.³

¹Аспірант кафедри «Соціальні комунікації та інформаційна діяльність» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

²Д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри «Загальна екологія та екоінформаційні системи» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

³Асистент кафедри «Інформаційні системи та мережі» Національного університету «Львівська політехніка», Львів, Україна

ТЕХНОЛОГІЯ УПРАВЛІННЯ КОМЕРЦІЙНИМ WEB-РЕСУРСОМ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Запропоновано метод управління контентом як етап його життєвого циклу в системах електронної контент-комерції, який ґрунтується на застосуванні нечіткої логіки. Метод управління контентом описує процеси формування комерційних web-ресурсів в системах електронної контент-комерції та спрощує технологію управління контентом. У роботі проаналізовано основні проблеми електронної контент-комерції та функціональних сервісів опрацювання контенту. Запропонований метод дає можливість створити засоби опрацювання web-ресурсів та реалізувати підсистему управління контентом. Завдання управління контентом: формування та ротація оперативних і ретроспективних баз даних; персоналізація роботи користувачів, збереження персональних запитів користувачів і джерел, ведення статистики роботи; забезпечення пошуку в базах даних; генерація вихідних форм; інформаційна взаємодія з іншими базами даних; формування та опрацювання web-ресурсу. Підсистема управління контентом реалізована шляхом його кешування (генерує сторінку один раз; надалі вона завантажується з кешу, який оновлюється автоматично по закінченню деякого терміну або при внесенні змін до певних розділів web-ресурсу, або за командою адміністратора) або інформаційних блоків (збереження блоків на етапі редагування web-ресурсу та збирання сторінки з цих блоків при її запиті користувачем).

Ключові слова: web-ресурс, комерційний контент, контент-аналіз, Інтернет-маркетинг, нечіткі дані, нечітка логіка, ситуаційна модель управління, лінгвістична оцінка, лінгвістичне значення, система електронної комерції.

НОМЕНКЛАТУРА

ІТ – інформаційні технології;

СЕКК – система електронної контент-комерції;

ПЗ – програмне забезпечення;

ROI – коефіцієнт окупності інвестицій (англ. Return on Investment);

ROR – коефіцієнт прибутковості е-бізнесу (англ. Rate of Return);

$X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_X}\}$ – множина вхідних даних $x_i \in X$ з різних джерел при $i = \overline{1, n_X}$;

$Q = \{q_1, q_2, \dots, q_{n_Q}\}$ – множина запитів $q_d \in Q$ користувачів при $d = \overline{1, n_Q}$;

$H = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_H}\}$ – множина внутрішніх параметрів $h_k \in H$ СЕКК при $k = \overline{1, n_H}$;

$C = \{c_1, c_2, \dots, c_{n_C}\}$ – множина комерційного контенту $c_r \in C$ при $r = \overline{1, n_C}$;

$V = \{v_1, v_2, \dots, v_{n_V}\}$ – множина зовнішніх параметрів

впливу $v_l \in V$ при $l = \overline{1, n_V}$;

$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_{n_Z}\}$ – множина сторінок $z_w \in Z$ web-ресурсу в СЕКК при $w = \overline{1, n_Z}$;

$T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_T}\}$ – час $t_p \in T$ транзакції опрацювання web-ресурсу при $p = \overline{1, n_T}$;

$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n_Y}\}$ – колекція статистичних даних $y_j \in Y$ роботи СЕКК, $j = \overline{1, n_Y}$;

α – оператор формування комерційного контенту,

β – оператор управління комерційним контентом,

γ – оператор супроводу комерційного контенту;

$u_f = \{u_{1f}, u_{2f}, \dots, u_{n_{Uf}}\}$ – множина умов формування комерційного контенту c_r ;

$u_m = \{u_{1m}, u_{2m}, \dots, u_{n_{Um}}\}$ – множина умов управління комерційним контентом c_r ;

$u_s = \{u_{1s}, u_{2s}, \dots, u_{n_{Us}}\}$ – множина умов супровід комерційного контенту c_r ;

$User(q_d)$ – формування запиту q_d користувачем системи;

$User(z_w)$ – перегляд користувачем відповіді на запит q_d ;

β_1 – оператор редагування та модифікації комерційного контенту;

β_2 – оператор визначення ваги блоку комерційного контенту;

β_3 – оператор розрахунку значень параметрів управління контентом;

β_4 – оператор формування та подання сторінки web-ресурсу;

β_5 – оператор формування множини кешованого контенту;

C_T – стан комерційного контенту C в момент часу T ;
 k_1, \dots, k_7 – вагові коефіцієнти параметрів комерційного контенту, визначені у такий спосіб, що $k_1 + k_2 + k_3 + k_4 + k_5 + k_6 + k_7 = 1$;

d_1^*, \dots, d_7^* – нормовані нечіткі значення параметрів управління контентом;

$\omega_1(c_j)$ – коефіцієнт розташування блоку у контенті;

$\omega_2(c_j)$ – коефіцієнт ключових слів в блоці;

$\omega_3(c_j)$ – коефіцієнт статистичної важливості термів;

$\omega_4(c_j)$ – коефіцієнт наявності додаткових термів;

$\omega_5(c_j)$ – коефіцієнт наявності та обсягу термів із запиту користувача;

W – множина кешованого комерційного контенту.

ВСТУП

Стрімкий розвиток Інтернет сприяє зростанню потреб оперативного отримання даних різноманітного характеру і реалізації нових форм інформаційного обслуговування через сучасні ІТ. В Інтернет через web-ресурси електронної контент-комерції продають весь спектр комерційного контенту: наукові та публіцистичні статті, музику, книги, фільми, фото, програмне забезпечення тощо. Відомими корпораціями, які розвивають електронну контент-комерцію, є Google через Play Market, Apple – Apple Store, I-Tunes, Amazon – Amazon.com та інші [1–3]. Управління комерційним контентом є однією із основних задач, які вирішують протягом його життєвого циклу. Процес управління передбачає моніторинг, контроль, встановлення та підтримання низки параметрів, які визначають технологічні, споживчі, змістові, комерційні та інші якості контенту. До таких параметрів відносять, зокрема актуальність, старіння, повнота, точність, релевантність, автентичність, достовірність тощо. Особливістю параметрів управління комерційним контентом є складність у визначенні їх точних значень. У такому випадку доцільним є застосування методів та засобів управління, які ґрунтуються на принципах ситуаційного управління [4] та нечіткої логіки [5]. Сьогодні системи і технології управління, які працюють із використанням нечітких значень набули значного поширення в різноманітних сферах – від функціонування побутової техніки до керування складними технологічними, виробничими, медико-біологічними, соціальними та іншими процесами

[6]. Набутий на сьогодні досвід у цьому напрямі дає змогу застосувати принципи нечіткої логіки в задачах управління комерційним контентом.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Основними задачами опрацювання web-ресурсів є формування, управління та супровід контенту. Формування контенту α є відображенням контенту c_r в новий стан c_{r+1} , що відрізняється появою нової частини контенту Δc , яка доповнює попередній стан $c_{r+1} = c_r + \Delta c$ при $c_r \in C$, $t_p \in T$, $c_{r+1} \in C$, $t_{p+1} \in T$, тобто $\alpha: (c_r, t_p, X, u_f) \rightarrow (c_{r+1}, t_{p+1})$.

Управління комерційним контентом β є відображенням контенту c_r в новий стан c'_r , який відрізняється значеннями визначальних параметрів $h_k \rightarrow h'_k$, що задовольняють наперед визначеним вимогам $\beta: (q_d, z_w, c_r, h_k, u_M, t_p) \rightarrow (c'_r, h'_k, z_{w+1}, t_{p+1})$ при $q_d \in Q$, $h_k \in H$.

Супровід контенту γ є відображенням контенту c_r в колекцію значень y_i , які утворюються як результат аналізу, моніторингу, оцінювання взаємодії з користувачем, пошуковими системами та іншими web-ресурсами, що є основою для прийняття рішень щодо формування та управління контентом, тобто $\gamma: (c_r, q_d, v_l, h_k, z_w, u_S, t_p) \rightarrow Y_i$.

В даній роботі засобом, що забезпечує розв'язання задач управління комерційним контентом із врахуванням всіх його особливостей, обрано нечітку логіку [5]. За її допомогою значення необхідних параметрів, які складно чи неможливо визначити в ході процесів управління можна змінити і нечіткими лінгвістичними аналогами. Основним завданням даної роботи є визначення порядку і способів формування і застосування таких нечітких даних у технологічних засобах управління комерційним контентом. Для цього, зокрема необхідно виконати такі завдання: специфікація змісту і порядку розв'язання задач управління комерційним контентом; визначення параметрів, які характеризують основні властивості об'єкта управління; розроблення порядку формування нечітких значень (фазифікації [5]) параметрів управління комерційним контентом; побудова процедур управління комерційним контентом на основі нечітких значень.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Теоретичний чинник управління web-ресурсами в СЕКК пов'язаний із розробленням ІТ опрацювання комерційного контенту. В наукових роботах Д. Ланде, В. Фурашева, С. Брайчевского, О. Григорьева досліджено та розвинуто математичні моделі опрацювання електронних інформаційних потоків [2, 3]. В роботах Б. Бойка (B. Boiko), С. Макківер (S. McKeever), Е. Роклі (A. Rockley) розроблені моделі життєвого циклу web-контенту [7–18]. Корпорації EMC, IBM, Microsoft Alfresco, Open Text, Oracle і SAP розробили специфікації Content Management Interoperability Services на інтерфейс web-сервісів, для забезпечення взаємодії систем управління контентом е-бізнесу [19–22]. З наукового погляду цей сегмент ІТ потребує значно ширшого дослідження. Кожний окремих проект реалізують як правило з початку, на основі своїх ідей та рішень. Тому актуальною є задача створення комплексу

технологічних засобів на основі теоретичного обґрунтування методів, моделей і принципів управління web-ресурсами в СЕКК, побудованих за принципом відкритих систем, які дозволяють керувати процесом збільшення обсягів реалізації комерційного контенту.

Задачі, які розв'язують у процесі управління комерційним контентом мають певні особливості, які дають змогу описувати цей процес моделлю, що класифікується Д. Поспеловим [4], як модель ситуаційного управління. За принципами такої моделі управління певним об'єктом зорганізується в умовах його унікальності, відсутності формальних описів та чітких критеріїв оптимальності або їх неповноти, постійної зміни об'єкта управління та його параметрів [4]. Комерційний контент, як об'єкт управління, повністю відповідає таким умовам. Сьогодні у складних процесах та ІТ управління, підтримки прийняття рішень, аналізу, прогнозування тощо, часто замість точних значень певних величин використовують їх нечіткі лінгвістичні аналоги. Такий підхід набуває все більшої популярності через свою універсальність, простоту та активний розвиток методів та ІТ штучного інтелекту. Цей спосіб розв'язання задач, пов'язаних з прийняттям рішень, застосовують, коли отримання точних значень деякої величини є ускладненим, тривалим, трудомістким, дорогим чи неможливим; значення є недостовірним чи неточним; точність визначення значень не є необхідною; у процесах управління чи прийняття рішень суттєвим є не саме значення певної величини, а його кваліфікація, оцінка, кате-

горія або клас; використовується не безпосереднє значення деякої величини, а його співвідношення з іншими величинами та в окремих інших випадках. Перелічені чинники мають місце і у процесах та ІТ управління web-контентом. Найвідомішими засобами, які сьогодні використовують для створення ІТ на основі застосування нечітких значень є класична нечітка логіка Л. Заде [5], логіка антонімів Я. Голоти [23], семіотичні моделі Д. Поспелова [4], методика семантичного диференціювання Ч. Осгуда [24]. Вибір методів і засобів подання нечітких даних значною мірою залежить від характеру задач, предметної області, способу визначення значень окремих величин, їх інтерпретації, порядку застосування тощо.

Основу, на якій ґрунтуються методи і ІТ управління комерційним web-ресурсом складають Інтернет-маркетинг (англ. Internet marketing, online-маркетинг) в поєднанні з Інтернет-інтеграцією, інформаційним менеджментом, Public Relation, службою роботи з покупцями та продажем у різних сферах [1–3]. Маркетинговий підхід до управління комерційним контентом забезпечує реалізацію основної мети процесів управління – підтримання значень технологічних, змістових, комерційних, споживчих параметрів контенту, на рівні, необхідному для його ефективної реалізації. Інтернет-маркетинг використовує всі аспекти та основні елементи традиційного маркетингу у поєднанні з новими методами дослідження та аналізу даних за допомогою сучасних ІТ (рис. 1) [1–3].

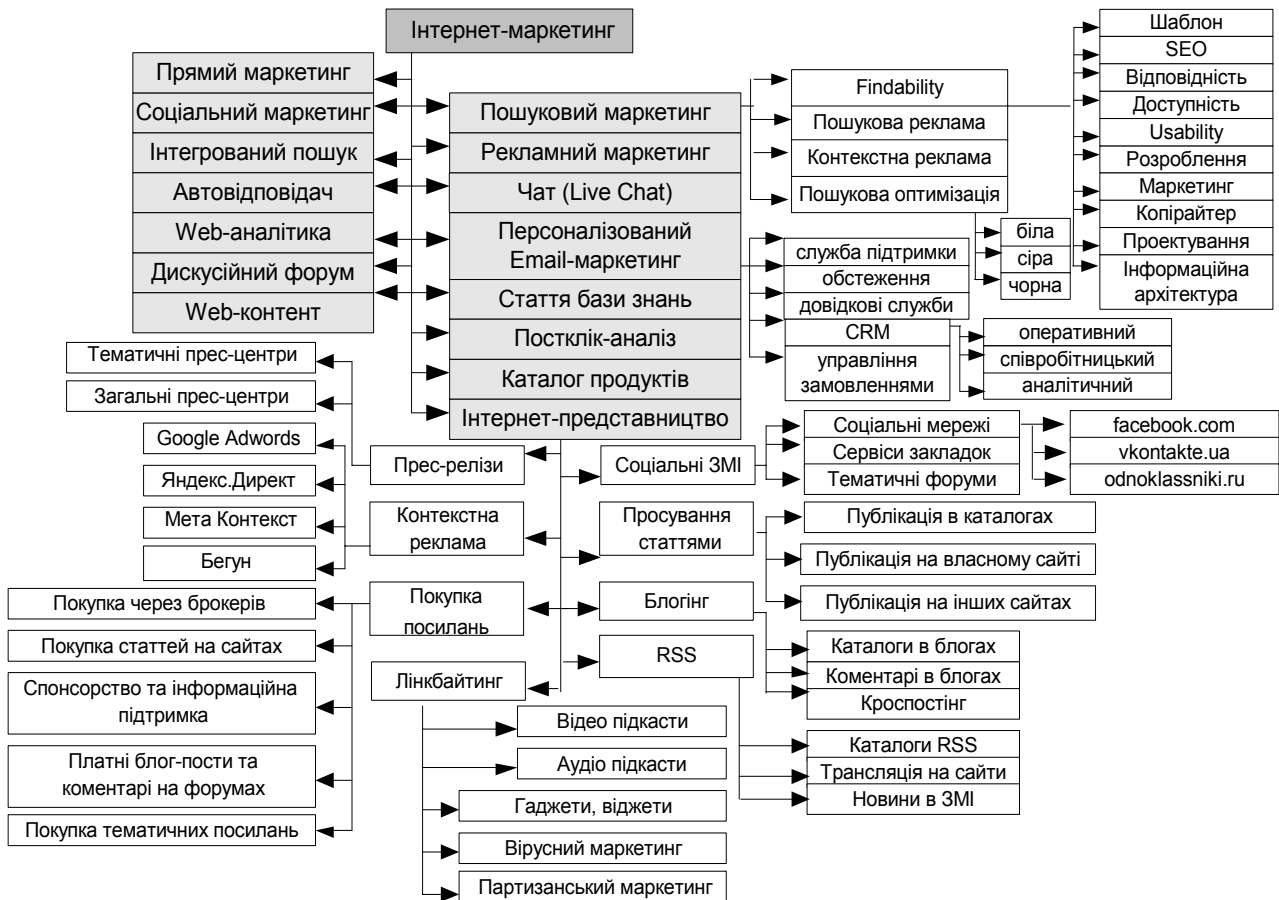


Рисунок 1 – Напрями Інтернет-маркетингу

Перебування у постійному контакті з користувачами є ефективним завдяки автоматичному відстеженню статистики, для аналізу якої використовують ROI, ROR і конверсію або ефективність відвідування web-ресурсу – відношення кількості відвідувачів, що виконали цільові дії (приховані/прямі вказівки продавців, рекламодавців, авторів, модераторів, тобто реєстрацію, покупку, підписку, відвідування певної сторінки, перехід за посиланням), до загальної кількості відвідувачів [1]. Успішна конверсія по-різному трактується продавцями/авторами (купівля зацікавленого продукту споживачем, натиснувши на відповідний банер), рекламодавцями/постачальниками (дії, очікувані від відвідувачів, наприклад, реєстрація, підписка на розсилку, скачування ПЗ). Мета застосування Інтернет-маркетингу як принципу управління контентом – отримання максимального ефекту від потенційної аудиторії web-ресурсу з можливістю миттєвого одержання статистики продажів, відвідувань, попиту тощо (табл. 1) [1–3]. Процес проектування та створення IT управління web-контентом на основі результатів Інтернет-маркетингу є ітеративним і протікає від аналізу, проектування, розроблення плану до створення прототипу і експериментальних випробувань до формування специфікацій, верстки, створення шаблону, формування контенту та розміщення згідно структури web-ресурсу.

Для побудови систем і IT управління контентом в роботі застосовано модель ситуаційного управління [4]. Таку модель застосовують у випадках, коли об'єкт деякої системи і процеси управління ним мають низку специфічних рис, які відрізняють його від традиційних. Цими особливими рисами, згідно [4], є такі.

1. Унікальність, об'єкт та засоби управління ним реалізують із максимальним врахуванням його специфічних показників, спрямованих на досягнення власної особливої мети деякої системи.

2. Відсутність формалізованої мети функціонування системи, до складу якої входить об'єкт управління, що виникає внаслідок розмитості, багатоплановості, складності специфікації чи недермінованості кінцевого результату.

3. Відсутність чіткого критерію оптимальності, коли найкращий результат характеризується неоднозначним, інтервальним або нечисловим значенням.

4. Динамічність – здатність об'єкта управління та системи, до складу якої він входить змінювати свої властивості та поведінку.

5. Неповнота опису – ситуація, за якої значення деяких параметрів управління відсутні, невідомі, неточні чи недостовірні.

6. Можливість вільного вибору варіантів прийняття рішень та вироблення дій з управління об'єктом – передбачає відсутність або мінімізацію обмежень, які накладають на поведінку об'єкта та засобів управління ним.

Web-контент як об'єкт управління в межах системи повністю відповідає таким вимогам. Доцільним є побудова процесів та IT управління ним за ситуаційною моделлю [4]. Ситуаційна модель управління передбачає неповноту та неточність деяких параметрів, тому для роботи з ними є необхідним застосування спеціальних IT. Характерною особливістю всіх підходів до вирішення різноманітних задач через застосування лінгвістичних оцінок замість конкретних значень [4, 5, 23, 24] є заміна конкретного значення деякої величини v_i , яку використовують у розв'язанні певної задачі, лінгвістичною оцінкою f_j , $j = \overline{1, m}$, що є певним узагальненням чи результатом кваліфікації початкового значення. Наприклад, кількість будь-чого, що перевищує 80% від загальної можна кваліфікувати як *багато*, менш ніж 20% як *мало* тощо [5]. Основу такого перетворення складає відображення $\mu: v_i \rightarrow f_j$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, яке встановлює відповідність між чіткими (числовими) та нечіткими (лінгвістичними) значеннями величини. В різних методологіях таке відображення має різні назви та способи реалізації. Зокрема, в [24] – це семантичне диференціювання через застосування спеціальної шкали, в [5] – функція належності, яка не лише встановлює саму відповідність, але і задає певну міру, що характеризує вагу отриманого значення, у [4] для таких цілей використовують спеціалізовані логічні та мовні засоби, логіка антонімів [23] передбачає використання опозиційних пар значень в сукупності з функцією міри. Загальним для них є заміна числових величин лінгвістичними оцінками; використання семантично коректних значень, придатних для сприйняття людиною, які мають зрозумілу інтерпретацію; спрощення процедур розв'язання певної категорії задач через зменшення кількості варіантів використання певних величин [4].

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Нехай процес управління контентом подано такою схемою зв'язків $User(q_d) \rightarrow q_d \rightarrow Q \rightarrow H(c_r, q_d) \rightarrow \beta(q_d, c_r, h_k, t_p) \rightarrow z_w \rightarrow User(z_w)$. Оператор управління контентом $\beta: C \rightarrow Z$ подано суперпозицією $\beta = \beta_4 \circ \beta_3 \circ \beta_2 \circ \beta_1$. Множина операторів $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4\}$ є адекватною в процесі управління контентом, тобто $\beta = \langle C, Q, H, U, T, Z, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \rangle$.

1. Оператор редагування та модифікації контенту подано як $\beta_1: (c_r, h_k, u_l, t_p) \rightarrow c'_r$.

2. Оператор формування пошукових образів контенту подано як $\beta_2: (c'_r, y_j, u_l, t_p) \rightarrow c''_r$.

3. Оператор формування значень параметрів управління подано як $\beta_3: (c''_r, h_k, u_l, t_p) \rightarrow h'_k$.

Таблиця 1 – Переваги управління контентом за принципами Інтернет-маркетингу

Назва	Визначення
Інтерактивність	Принцип організації системи, при якій мета досягається обміном контенту між елементами системи та навколишнім середовищем
Пошуковий маркетинг	Процес збільшення відвідуваності з пошукових систем, формування списків результатів пошуку та рекламних оголошень
Точний таргетинг	Рекламний механізм, що дозволяє виділити зі всієї аудиторії ресурсу цільову, яка задовольняє задані критерії для показу їй реклами
Постклік-аналіз	Механізм збільшення результативності та конверсії web-ресурсу

4. Оператор формування та подання web-сторінки подано як $\beta_4(c_r'', h_k', z_w, q_d, t_p) \rightarrow z_{w+1}$, де $h_k \in H$, $u_l \in U$. Формування комерційного web-ресурсу подано як

$$z_w = \left\{ \bigcup_{r=1}^{n_c} c_r \left| \begin{array}{l} \forall c_r \in C_{q_d}, \exists q_d \in Q, \exists h_k \in H_{c_r}, c_r \notin C_{q_d}^-, h_k \notin H_{c_r}^-, \\ C = C_{q_d} \cup C_{q_d}^-, H = H_{c_r} \cup H_{c_r}^-, d = \overline{1, n_Q}, k = \overline{1, n_H} \end{array} \right. \right\}. \quad (1)$$

ІТ управління контентом – комплекс методів та засобів забезпечення підтримки значень визначальних параметрів контенту $h_k \rightarrow h_k'$ у відповідності до вимог за набором критеріїв управління контентом, тобто $z_{w+1}(h_k', c_r'', t_{p+1}) = \beta(q_d, z_w, c_r, h_k, u_M, t_p)$.

Застосування маркетингової стратегії у процесах управління контентом передбачає основною метою управління максимізацію обсягів його реалізації. Досягнення цієї мети реалізується шляхом моніторингу, контролю та встановлення на рівні нормативних низки показників $H = \{h_1, h_2, \dots, h_{n_y}\}$, які визначають основні технологічні та споживчі властивості контенту. На практиці у ІТ управління контентом використовують, зокрема, такі параметри як актуальність, повнота, релевантність, автентичність, достовірність, популярність, прибутковість контенту. Для web-ресурсу може бути визначено додаткові параметри, які характеризують його маркетингову цінність та здатність до виконання визначених завдань.

Аналіз перелічених показників показує, що визначення їх точних значень на практиці є достатньо складним, інколи неможливим завданням. Той факт, що контент комерційного web-ресурсу за своїми властивостями відповідає вимогам моделі ситуаційного управління [4] дає змогу організувати процес вироблення управлінських рішень на основі неповних, неточних чи нечітких значень у без втрати ефективності та якості кінцевого результату. Це дає змогу замінити значення параметрів, за якими здійснюється управління контентом деякими узагальненими величинами, які дають змогу формувати рішення щодо управління та оцінювати результат виконання відповідних змін. Це однією особливістю параметрів, які визначають властивості контенту є відсутність формальних методів і процедур встановлення значень для багатьох з них. Наприклад, показник актуальності контенту h_1 визначають на основі показників прибутковості h_6 та популярності h_7 з врахуванням змісту контенту. Показник достовірності контенту h_1 є суб'єктивним значенням, яке визначається модератором чи адміністратором відповідного web-ресурсу через експертне оцінювання. Такий підхід створює можливість застосування принципів нечіткої логіки [5], згідно з якими результати оцінювання подають у вербальній лінгвістичній формі і управління здійснюють на основі не власне значень, а їх нечітких аналогів. Тому в ІТ управління контентом замість значень параметрів $h_1 - h_7$ використовують їх нечіткі відповідники $h_1^* - h_7^*$.

Застосування нечіткої логіки у процесах і системах управління передбачає роботу схемою: чітке значення \rightarrow

визначення функції належності \rightarrow фазифікація (перехід до нечіткості) \rightarrow нечіткі обчислення \rightarrow дефазифікація (перехід до точних значень). Особливості контенту і використання моделі ситуаційного управління для створення ІТ вимагають застосування іншого способу формування і застосування нечітких значень параметрів у процесах управління. Першим кроком є безпосереднє формування вербальної експертної оцінки h_i^* , $i = \overline{1, n}$ значення i -го параметра управління без встановлення його точного значення та визначення функції належності. За формою подання та інтерпретацією нечіткі оцінки різних параметрів є різними. Для їх спільного використання у процесах і засобах управління контентом наступним кроком є їх нормування – зведення різноманітних нечітких значень параметрів $h_1^* - h_7^*$ до єдиного синтаксису та інтерпретації. Нормування здійснюють шляхом семантичного диференціювання [24] із застосування спеціальної шкали. Така дія передбачає заміну вербальної оцінки h_i^* , $i = \overline{1, n}$ числовим значенням d_i^* , $i = \overline{1, n}$ із врахуванням змісту та взаємного співвідношення лінгвістичних значень. При цьому числові значення не задають жодних кількісних понять, а лише формалізують відповідні нечіткі вербальні оцінки та співвідношення між ними. Достатньо зручним вважають використання шкали семантичного диференціювання в діапазоні числових значень $[0;1]$ (табл. 2).

На основі нормованих нечітких оцінок формують інтегрований показник $D(C_T)$ маркетингового стану комерційного контенту, який характеризує загальну відповідність його властивостей комерційним та технологічним вимогам управління

$$D(C_T) = k_1 d_1^* + k_2 d_2^* + k_3 d_3^* + k_4 d_4^* + k_5 d_5^* + k_6 d_6^* + k_7 d_7^*.$$

Основним критерієм управління контентом із застосуванням такого критерію є:

(1) $D_{\min}(C_T) \leq 1$ – входження значення інтегрованого показника маркетингового стану контенту до діапазону припустимих значень;

(2) $D(C_T) \rightarrow \text{Max}$ – досягнення локального максимуму, який відповідає найкращому маркетинговому стану контенту на момент часу T .

На основі застосування критерію модератор/адміністратор приймає рішення про потребу чи відсутність потреби зміни стану контенту з метою досягнення максимального комерційного ефекту. ІТ управління контентом використовує такі способи оперативної зміни стану комерційного web-ресурсу для виконання вимог критерію управління.

1. Генерація web-сторінок за запитом користувача реалізовано такою схемою: модератор \rightarrow редагування контенту \rightarrow база даних контенту \rightarrow подання контенту \rightarrow web-ресурс та подано як

$\beta_Q = \langle C, Q, H, U, T, Z, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4 \rangle$. Етап редагування та модифікації контенту подано оператором вигляду $c_j(t_{r+1}) = \beta_1(c_j, t_r, h_k, u_l)$ при $c_j(t_{r+1}) \in C$. Етап формування множини web-сторінок описано оператором $Z(t_r) = \beta_4(q_i, C, \beta_3(\beta_2(C), t_r))$, де

$$z_i = \left\{ \bigcup_{j=1}^m c_j(q_i, t_r) \left| \begin{array}{l} \forall c_j \in C_q, c_j \notin C_q^-, C_q = \beta_3(\beta_2(C_q)), \exists q_i \in Q_c, \exists h_k \in H_c, h_k \notin H_c^-, \\ C = C_q \cup C_q^-, Q_c \subset Q, H = H_c \cup H_c^-, k = \overline{1, n_H}, i = \overline{1, n}, r = \overline{1, w} \end{array} \right. \right\}.$$

Таблиця 2 – Варіанти лінгвістичних та нормованих оцінок параметрів контенту

Параметр	Назва параметра	Зміст параметра	Лінгвістичні значення	Нормоване значення
h_1^*	актуальність	показник відповідності даних та відомостей які містить контент значенням, дійсним на даний момент часу	актуальний	1
			частково актуальний	0,5
			неактуальний	0
h_2^*	повнота	міра наявності в складі контенту web-ресурсу даних, що відповідають потребам всіх категорій користувачів	повний	1
			достатньо повний	0,75
			недостатньо повний	0,5
			неповний	0,25
h_3^*	релевантність	характеристика співвідношення загального обсягу контенту web-ресурсу, з обсягом даних, затребуваних користувачами	висока	1
			достатня	0,75
			середня	0,5
			низька	0,25
h_4^*	автентичність	міра яка оцінює авторство, належність та зв'язок з джерелом походження інформації, яку містить контент web-ресурсу	автентичний	1
			частково автентичний	0,5
			неавтентичний	0
			відсутня	0
h_5^*	достовірність	показник відповідності змісту реальним значенням та надійності джерела інформації	висока	1
			достатня	0,75
			середня	0,5
			низька	0,25
h_6^*	популярність	характеристика попиту, яка визначає кількість ефективних відвідувань web-ресурсу	висока	1
			достатня	0,75
			середня	0,5
			низька	0,25
h_7^*	прибутковість	характеристика обсягу фінансових надходжень від використання комерційного контенту	надприбутковий	1
			прибутковий	0,75
			незбитковий	0,5
			збитковий	0,25
			критичний	0

Вагу блоку визначають як суму коефіцієнтів контенту $\omega = \|C\| = \beta_2(C, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4, \omega_5)$.

2. Генерація web-сторінок при редагуванні web-ресурсу модератором полягає у створенні набору статичних сторінок при внесенні змін до контенту або web-ресурсу за такою схемою: модератор \rightarrow редагування контенту (web-ресурсу) \rightarrow база даних контенту \rightarrow web-ресурс. Управління контентом подано як $\beta_E = \langle C, H, T, Z, \beta_1, \beta_2, \beta_3 \rangle$. Етап формування web-сторінок описано як $Z(t_r) = \beta_3(C, H, t_r, \beta_1, \beta_2)$. Метод не враховує інтерактивність між відвідувачем і web-ресурсом.

3. Змішаний тип генерації сторінок web-ресурсу поєднує переваги перших двох типів та має таку схему: модератор \rightarrow редагування контенту \rightarrow база даних контенту \rightarrow збирання блоків контенту \rightarrow кеш контенту \rightarrow подання контенту \rightarrow web-ресурс. Управління контентом змішаного типу подано як

$$\beta_M = \langle C, Q, H, T, Z, W, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5 \rangle, \quad \text{при}$$

$$W = \beta_5(C, \beta_3(\beta_2(\beta_1(C, t_r, H, U))), t_{r+1}) \quad \text{або}$$

$$W = \beta_5(Z, \beta_3(\beta_2(\beta_1(C, t_r, H, U))), t_{r+1}), \text{ де}$$

$$w_l = \left\{ \bigcup_{i=1}^n c_i \mid \forall c_i \in C_Q, C_Q \subset C, C_Q = \beta_3(\beta_2(C)) \right\},$$

$$w_l = \left\{ \bigcup_{j=1}^m z_j \mid z_j \in Z_c, \forall c_j \in C_z, \exists c_j \in Z_c, \forall c_j \in z_j, C_z = \beta_3(\beta_2(C)) \right\}.$$

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для детального аналізу функціонування ІТ управління web-ресурсами було розроблено та впроваджені десять систем різного типу (табл. 3) з підтриманням для кожної з них власних підходів до організації життєвого циклу контенту.

Таблиця 3 – Реалізація опрацювання web-ресурсів в розроблених СЕКК

Web-ресурс	URL web-ресурсу	Тип	Наявність підсистеми		
			формування	управління	супровід
Фотогалерея Висоцьких	fotogalereja-vysocjkykh.com	журнал	+/-	+	+/-
Вголос	vgholos.com.ua	газета	+	+	+
Татяна	tatjana.in.ua	журнал	-	+/-	+/-
Прес-Тайм	presstime.com.ua	газета	+/-	+	+
AutoChip	www.autochip.vn.ua	журнал	-	+	+/-
Курси валют	kursyvalyut.com	газета	+	+	-
Добрий ранок	dobryjranok.com	газета	+/-		+/-
Інформація для бізнесу	goodmorningua.com	газета	+/-	+/-	-
Львівська школа № 3	zsh3lviv.in.ua	газета	-	-	-
Victana	victana.lviv.ua	журнал	-	+/-	+

5 РЕЗУЛЬТАТИ

В табл. 4–7 подані результати роботи розроблених систем згідно Google Analytics за період часу 2010–2014 р.

Таблиця 4 – Поведінка відвідувачів

Тип відвідувача	Відвідування	Внесок до загального значення:
New Visitor	1 104 194	35,77%
Returning Visitor	1 982 615	64,23%

Таблиця 5 – Технології

Назва	Значення
Відвідування	3 086 819%
Сторінки/відвідування	2,27
Сер. тривалість відвідування	00:03:02
% нових відвідувань	35,73%
Показник відмов	63,39%

6 ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз результатів опрацювання контенту дозволяє визначити причин формування цільової аудиторії за набором характеристик функціонування СЕКК. 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. При наявності всіх етапів життєвого циклу контенту суттєво збільшується обсяг відвідувань користувачів.

ВИСНОВКИ

У статті розв'язана задача розроблення ІТ формування, управління та супроводу контенту у вигляді теоретично обґрунтованої концепції шляхом автоматизації опрацювання web-ресурсів в СЕКК для збільшення обсягів продажу контенту постійному користувачу, активного залучення потенційних користувачів та розширення меж цільової аудиторії.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що вперше розроблено методи формування, управління та супроводу контенту, які базуються на принципах уніфікованості, універсальності і загальності через лінгвістичний аналіз контенту, що дало змогу реалізувати стандартизовані програмні засоби опрацювання web-ресурсів в СЕКК. Удосконалено структуру СЕКК, яка на основі модулів опрацювання web-ресурсів та шляхом розподілу процесів формування, управління та супроводу контенту, що дає можливість реалізації етапів його життєвого циклу. Отримали подальший розвиток моделі життєвого циклу контенту, які завдяки оперативній організації процесу опрацювання web-ресурсів в СЕКК підвищують ефективність та рентабельність функціонування аналогічних систем. Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що розроблено та впроваджено програмні засоби для формування, управління та супроводу контенту з метою досягнення більшого ефекту від роботи на рівні власника (підвищення рентабельності, зростання інтересу користувачів) та користувача (зрозумілість, спрощення інтерфейсу, уніфікація процесів опрацювання web-ресурсів та розширення вибору функціональних можливостей) СЕКК.

Перспективи подальших досліджень полягають у застосуванні запропонованого підходу для розроблення рекомендацій з проектування структури СЕКК шляхом деталізації етапів опрацювання web-ресурсів та реалізації підсистем формування, управління та супроводу контенту, що дасть змогу ефективно просто підтримувати життєвий цикл контенту на рівні розробника систем.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в рамках наукових досліджень кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка» на тему «Дослід-

Таблиця 6 – Вихідний параметр: кількість відвідувань

Кількість відвідувань	Відвідування	Перегляди сторінок	Частка в загальному обсязі	
			Відвідування	Перегляди сторінок
1	1 104 194	1 747 476	35,77%	24,89%
2	248 146	474 620	8,04%	6,76%
3	126 535	267 233	4,10%	3,81%
4	84 933	187 771	2,75%	2,67%
5	64 765	149 478	2,10%	2,13%
6	52 896	124 112	1,71%	1,77%
7	45 104	107 373	1,46%	1,53%
8	39 476	96 071	1,28%	1,37%
9–14	172 195	431 313	5,58%	6,14%
15–25	191 648	504 396	6,21%	7,19%
26–50	239 860	664 731	7,77%	9,47%
51–100	233 159	684 453	7,55%	9,75%
101–200	201 626	630 126	6,53%	8,98%
201+	282 272	950 916	9,14%	13,55%
Всього	3 086 818	7 020 069	–	–

Таблиця 7 – Зацікавленість. Вихідний параметр: тривалість відвідування

Тривалість відвідування	Відвідування	Перегляди сторінок	Частка в загальному обсязі	
			Відвідування	Перегляди сторінок
0–10 сек.	2 017 353	2 083 177	65,35 %	29,67 %
11–30 сек.	119 744	270 527	3,88 %	3,85 %
31–60 сек.	144 070	374 595	4,67 %	5,34 %
61–180 сек.	289 271	960 500	9,37 %	13,68 %
181–600 сек.	269 319	1 266 576	8,72 %	18,04 %
601–1800 сек.	190 228	1 118 690	6,16 %	15,94 %
1801+ сек.	56 824	946 004	1,84 %	13,48 %

ження, розроблення і впровадження інтелектуальних розподілених інформаційних технологій та систем на основі ресурсів баз даних, сховищ даних, просторів даних та знань з метою прискорення процесів формування сучасного інформаційного суспільства».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Клифтон Б. Google Analytics: профессиональный анализ посещаемости веб-сайтов / Б. Клифтон. – М. : Вильямс, 2009. – 400 с.
- Основы моделирования и оценки электронных информационных потоков / [Д. Ландэ, В. Фурашев, С. Брайчевский, О. Григорьев]. – К. : Інжиніринг, 2006. – 348 с.
- Ландэ Д. Основы интеграции информационных потоков : монография / Д. Ландэ. – К. : Інжиніринг, 2006. – 240 с.
- Поспелов Д. Ситуационное управление: теория и практика / Д. Поспелов. – М. : Наука. – 1986. – 288 с.
- Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию решений / Л. Заде. – М. : Мир, 1976. – 165 с.
- Гриняев С. Нечеткая логика в системах управления [Электронный ресурс] / С. Гриняев // Компьютерра-Онлайн. – 2001. – № 38 (415). – Режим доступа: <http://www.computerra.ru/offline/2001/4>. – Назва з титул. екрана.
- CM Lifecycle Poster [Electronic resource] / Content Management Professionals. – Retrieved 20 July 2010. – Access mode: <http://www.cmprosold.org/resources/poster/>. – Title from the screen.
- Hackos J. Content Management for Dynamic Web Delivery / J. Hackos. – Hoboken : Wiley, 2002. – 432 p.
- Halvorson K. Content Strategy for the Web / K. Halvorson. – Reading : New Riders Press, 2009. – 192 p.
- McGovern G. Content Critical / G. McGovern, R. Norton. – Upper Saddle River : FT Press, 2001. – 256 p.
- McKeever S. Understanding Web content management systems: evolution, lifecycle and market / S. McKeever // Industrial Management & Data Systems (MCB UP). – 2003. – № 103 (9). – P. 686–692.
- Nakano R. Web content management: a collaborative approach / R. Nakano. – Boston : Addison Wesley Professional, 2002. – 222 p.
- Papka R. On-line News Event Detection, Clustering, and Tracking : thesis for the degree doctor of philosophy / R. Papka. – Amherst : Massachusetts University, 1999. – 154 p.
- Woods R. Defining a Model for Content [Electronic resource] / R. Woods. – 2010. – Access mode: http://www.contentmanager.net/magazine/article_785_defining_a_model_for_content_governance.html. – Title from the screen.
- Rockley A. Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy / A. Rockley. – Reading : New Riders Press, 2002. – 592 p.
- Stone W.R. Plagiarism, Duplicate Publication and Duplicate Submission: They Are All Wrong! / W. R. Stone // IEEE Antennas and Propagation, 2003. – Vol. 45. – № 4. – P. 47–49.
- Sullivan D. Invisible Web Gets Deeper [Electronic resource] / D. Sullivan // Search Engine Report. – 2002. – Access mode: <http://searchenginewatch.com/sereport/article.php/2162871>. – Title from the screen.
- The Content Management Possibilities Poster [Electronic resource] / Metatorial Services, Inc. – Retrieved 20 July 2010. – Access mode: <http://metatorial.com/pagea.asp?id=poster>.
- EMC. Content Management Interoperability Services. Appendices. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. – Hopkinton : EMC, 2008. – 17 p.
- EMC. Content Management Interoperability Services. Part I. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. – Hopkinton : EMC, 2008. – 76 p.
- EMC. Content Management Interoperability Services. Part II – REST protocol binding. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. – Hopkinton : EMC, 2008. – 79 p.
- EMC. Content Management Interoperability Services. Part II – SOAP protocol binding. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. – Hopkinton : EMC, 2008. – 37 p.
- Голота Я. Логика антонимов и нечеткая логика: сходства и различия / Я. Голота // International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'98). – С.-П., 1998. – С. 208–210.
- Osgood C. The nature and measurement of meaning / C. Osgood // Psychological Bulletin, 1952. – 49. – P. 197–237.

Стаття надійшла до редакції 09.02.2015.

Після доробки 09.12.2015.

Алексеева К. А.¹, Берко А. Ю.², Высоцкая В. А.³

¹Аспирант кафедры «Социальные коммуникации и информационная деятельность» Национального университета «Львовская политехника», Украина

²Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Общая экология и экоинформационные системы» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

³Ассистент кафедры «Информационные системы и сети» Национального университета «Львовская политехника», Львов, Украина

ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОММЕРЧЕСКИМ WEB-РЕСУРСОМ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Предложен метод управления контентом как этап его жизненного цикла в системах электронной контент-коммерции базирующийся на использовании нечеткой логики. Метод управления контентом описывает процессы формирования коммерческих web-ресурсов в системах электронной контент-коммерции и упрощает технологию управления контентом. В работе проанализированы основные проблемы электронной контент-коммерции и функциональных сервисов управления контентом. Предложенный метод позволяет создать средства обработки web-ресурсов и реализовать подсистему управление контентом. Задачи управления контентом: формирование и ротация оперативных и ретроспективных баз данных; персонализация работы пользователей, сохранение персональных запросов пользователей и источников, ведение статистики работы; обеспечение поиска в базах данных; генерация выходных форм; информационное взаимодействие с другими базами данных; формирования и обработки web-ресурса. Подсистема управления коммерческим контентом реализована путем его кэширования (генерирует страницу один раз, в дальнейшем она загружается из кэша, который обновляется автоматически по истечению некоторого срока или при внесении изменений к некоторым web-ресурса, или по команде администратора) или информационных блоков (сохранение блоков на этапе редактирования web-ресурса и сборка страницы из этих блоков при ее запросе пользователем).

Ключевые слова: web-ресурс, коммерческий контент, контент-анализ, Интернет-маркетинг, нечеткие данные, нечеткая логика, ситуационная модель управления, лингвистическая оценка, лингвистическое значение, система электронной коммерции.

Aliexieieva K. A.¹, Berko A. Y.², Vysotska V. A.³

¹Post-graduate student of Social communications and Information Activity Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

²Dr.Sc., Professor, Head of Department of General Ecology and Ecoinformation Systems, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

³Assistant, Information Systems and Networks Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine

TECHNOLOGY OF COMMERCIAL WEB-RESOURCE MANAGEMENT BASED ON FUZZY LOGIC

The method of content management as its life cycle stage in electronic content commerce systems based on Fuzzy Logic is proposed. The method of content management describes the commercial web resources forming in electronic content commerce systems and automation technology that simplifies the content management. The main problems of electronic content commerce and functional services of content management are analyzed. The proposed method gives an opportunity to create an instrument of web resources processing and to implement the subsystem of content management. Tasks of content management are: operational and retrospective database formation and rotation; the user experience personalization; personal user queries and sources storing; operation statistics analysis; search providing in database; initial forms generation on information resources; information interaction with other databases; Web resource formation and processing. Content management subsystem is implemented through its caching (generates a page once; then it is several times faster loaded from the cache, which is updated automatically after a certain period of time or when making changes to specific sections of an Web resource, or by administrator command) or information blocks formation (blocks conservation in the Web resources editing stage and page collection from these blocks at the user request its).

Keywords: web resources, commercial content, content analysis, Internet Marketing, fuzzy data, fuzzy logic, situational control model, linguistic evaluation, linguistic values, electronic commerce systems.

REFERENCES

1. Clifton B. Google Analytics: professionalny analiz poseschaemosti Web-saytov. Moscow, Vilyams, 2009, 400 p.
2. Lande D., Furashev V., Braychevsky S., Grigorev O. Osnovy modelirovaniya i otsenki elektronnyh informatsionnyh potokov. Kiev, Inzhiniring, 2006, 348 p.
3. Lande D. Osnovy integratsii informatsionnyh potokov: monografiya. Kiev, Inzhiniring, 2006, 240 p.
4. Pospelov D. Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika. Moscow, Nauka, 1986, 288 p.
5. Zade L. Ponyatie lingvisticheskoy peremennoy i ego primenenie k prinyatiyu resheny. Moscow, Mir, 1976, 165 p.
6. Grinyayev S. Nechetkaya logika v sistemah upravleniya [Electronic resource], Kompyuterra-Onlayn, 2001, No. 38 (415), Access mode: <http://www.computerra.ru/offline/2001/4>. Title from the screen.
7. CM Lifecycle Poster [Electronic resource] / Content Management Professionals. – Retrieved 20 July 2010. – Access mode: <http://www.cmprosold.org/resources/poster/>. – Title from the screen.
8. Hackos J. Content Management for Dynamic Web Delivery. Hoboken, Wiley, 2002, 432 p.
9. Halvorson K. Content Strategy for the Web. Reading, New Riders Press, 2009, 192 p.
10. McGovern G., Norton R. Content Critical. Upper Saddle River : FT Press, 2001, 256 p.
11. McKeever S. Understanding Web content management systems: evolution, lifecycle and market, Industrial Management & Data Systems (MCB UP), 2003, No. 103 (9), P. 686–692.
12. Nakano R. Web content management: a collaborative approach. Boston, Addison Wesley Professional, 2002, 222 p.
13. Papka R. On-line News Event Detection, Clustering, and Tracking : thesis for the degree doctor of philosophy. Amherst, Massachusetts University, 1999, 154 p.
14. Woods R. Defining a Model for Content [Electronic resource]. 2010, Access mode: http://www.contentmanager.net/magazine/article_785_defining_a_model_for_content_governance.html. Title from the screen.
15. Rockley A. Managing Enterprise Content: A Unified Content Strategy. Reading, New Riders Press, 2002, 592 p.
16. Stone W. R. Plagiarism, Duplicate Publication and Duplicate Submission: They Are All Wrong!, IEEE Antennas and Propagation, 2003, Vol. 45, No. 4, pp. 47–49.
17. Sullivan D. Invisible Web Gets Deeper [Electronic resource], Search Engine Report, 2002, Access mode: <http://searchenginewatch.com/sereport/article.php/2162871>. Title from the screen.
18. The Content Management Possibilities Poster [Electronic resource] / Metatorial Services, Inc. – Retrieved 20 July 2010. Access mode: <http://metatorial.com/pagea.asp?id=poster>.
19. EMC. Content Management Interoperability Services. Appendices. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. Hopkinton, EMC, 2008, 17 p.
20. EMC. Content Management Interoperability Services. Part I. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. Hopkinton, EMC, 2008, 76 p.
21. EMC. Content Management Interoperability Services. Part II – REST protocol binding. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. Hopkinton, EMC, 2008, 79 p.
22. EMC. Content Management Interoperability Services. Part II – SOAP protocol binding. Version 0.5 / EMC, IBM, Microsoft. Hopkinton, EMC, 2008, 37 p.
23. Golota Y. Logika antonimov i nechetkaya logika: skhodstva i razlichiya, International Conference on Soft Computing and Measurement (SCM'98), C.-P., 1998, pp. 208–210.
24. Osgood C. The nature and measurement of meaning, Psychological Bulletin, 1952, 49, pp. 197–237.

АНАЛІЗ ПРОГРАМ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАТРОННИХ СИСТЕМ

Розв'язано задачу розробки методичного забезпечення для моделювання мехатронних систем на структурному і функціональному рівнях абстракції. Об'єктом дослідження був процес моделювання мехатронних систем і систем автоматизованого управління. Предмет дослідження складають програми інжинірингу і автоматизованого проектування технічних систем, універсальні математичні процесори (CAE, CAD і CAS-системи відповідно). Ціль роботи: підвищити ефективність процесу прийняття рішень по вибору оптимального програмного і математичного забезпечення для моделювання мехатронних систем інженерами-електроніками.

Дослідження мехатронних систем дозволили виявити їх особливості як мультидомених об'єктів, і загальні риси – як підсистем автоматизованого управління, на основі чого сформовані основні вимоги до програм моделювання. Аналіз математичного і програмного забезпечення CAE, CAD і CAS та експерименти по моделінгу й симуляції при каузальному і мультидомениму підходах, дозволили визначити критерії для порівняльного аналізу та сформувавши рекомендації по вибору програми для моделювання, оптимальної для досягнення визначених цілей дослідження мехатронних систем. На основі аналізу програм, розроблено універсальну методику моделювання та оптимізації мехатронних систем в циклі їхнього автоматизованого проектування.

Ключові слова: мехатроніка, системи автоматичного управління, моделінг, симуляція, методика моделювання.

НОМЕНКЛАТУРА

BG – bond graph;
 CAE – Computer Aided Engineering;
 CAS – Computer Algebra System;
 ECAD – Electronics Computer Aided Design;
 MCAD – Mechanical Computer Aided Design;
 delta – відхилення поточного положення «вхід →» від уставки «вхід +»;
 h_value – поточне положення штока клапана;
 S_value – площа просвіту поточного вікна клапана;
 Win – частота обертання ведучої шестерні редуктора;
 Wout – частота обертання веденої шестерні редуктора;
 ДС – динамічна система;
 ММ – математична модель;
 МС – мехатронна система;
 ПЗ – програмне забезпечення;
 САР – система автоматичного регулювання;
 САУ – система автоматичного управління;
 ТАУ – теорія автоматичного управління;
 ФП – функціональний перетворювач.

ВСТУП

Електронні пристрої часто використовуються в мехатронних системах, які здатні забезпечувати рух виконавчого органу під керуванням впливами електронної системи управління. МС є синергетичним поєднанням механічної підсистеми та підсистем силової й інформаційної електроніки, отже, при проектуванні МС необхідно використовувати принципи системотехніки, при одночасному детальному аналізі фізичних явищ в кожній з підсистем. Зрозуміло, що такий аналіз вимагає притягнення інженерів із відповідних галузей, але на верхньому рівні абстракції, МС можна представити системою автоматичного регулювання, або управління, проектуванням якої можуть займатися інженери з електронної техніки. Специфічний погляд на МС, як на об'єкти досліджень та моделювання для спеціаліста з електроніки представлений в даній статті.

Моделювання МС вимагає використання програмного забезпечення, що здатне забезпечити дослідження

на різних ієрархічних рівнях – це програми автоматизованого проектування (CAD), інжинірингу (CAE) та універсальні математичні процесори (CAS) [1–3]. Кожна з цих систем накладає свої особливості на процес моделінгу та симуляції (modeling & simulation) [1], які можуть вплинути на якість моделювання МС в цілому.

Незважаючи на наявність публікацій по темі моделювання МС, вони представляють собою або суто теоретичні матеріали, або стосуються тільки інженерів-механиків та системотехніків [4]. Наразі для дослідників з електронної галузі відсутні об'єктивні рекомендації по вибору найбільш придатного ПЗ для моделювання МС, отже їхня розробка є актуальною задачею. Тому цілком даної роботи є розвиток методичного та математичного забезпечення автоматизованого проектування МС, а саме вироблення методики та практичних рекомендацій для вибору оптимального програмного і математичного забезпечення, зокрема обґрунтування можливості використання ECAD, тобто систем автоматизованого проектування в електроніці для моделювання МС на основі нового підходу в моделінгу.

Об'єктом дослідження є процес моделювання мехатронних систем і систем автоматизованого управління, предмет дослідження – математичне забезпечення CAE, CAD та CAS-систем, придатне для моделінгу та симуляції МС.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для досягнення поставленої цілі необхідно дослідити специфічні та загальні риси МС як різновиду динамічних технічних систем, визначити способи їхнього моделінгу та вимоги, що висувають обрані підходи до математичного забезпечення на прийнятому рівні абстракції, зокрема, на симуляцію в програмах моделювання електронного домену, тобто в ECAD.

Для порівняльного аналізу програм необхідно сформувати вектор критеріїв якості, ранжувати їх. Експерименти, проведені в різному ПЗ при різних підходах, та результати аналізу програм різного класу (CAE, CAD та CAS), дозволяють узагальнити підходи у моделюванні МС як САУ на рівні методики, визначити область адекватності такого моделювання.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Мехатронні системи, як один з видів ДС [4] призначені для реалізації заданого руху й основу їх становить деякий виконавчий механізм та привод – електромеханічний, гідравлічний або якийсь інший. Прикладами сучасних мехатронних пристроїв є модулі верстатів і промислових роботів, побутова техніка тощо.

Зазвичай, МС моделюються на верхньому рівні абстракції (макрорівні), де розрізняють структурний (блочний) і фізичний мультидоменний підходи, кожний з яких має свої переваги та недоліки [4]. При цьому за кожним з двох методів можуть стояти певні особливості математичного ядра обраного програмного забезпечення. Точність моделювання залежить від кількості врахованих властивостей системи, точність симуляції – від правильно відібраних користувачем інструментів та врахування особливостей використаного ПЗ. Зважаючи на невідомий розвиток як МС, так і засобів їхнього дослідження, аналіз ПЗ та підходів у моделюванні [5], є актуальною задачею, розв'язання якої буде сприяти підвищенню якості прийнятих рішень при проектуванні МС.

Будь-яка МС вимагає управління (тобто є САУ), і повинна бути ідентифікована для побудови її моделі з метою створення необхідного керуючого пристрою який забезпечує складний координований рух механічної частини [4]. За поведінкою моделі певної МС можна, у деякому наближенні, судити про поведінку реальної системи, що через складність або неможливість проведення випробувань на реальній системі має сенс [2–7]. Оскільки МС включають в себе електромеханічні перетворювачі з електронною комутацією (актуатори), датчики, силові напівпровідникові перетворювачі, мікроконтролери та персональні комп'ютери, це гарантує широкий спектр досліджень для спеціаліста з електронної техніки.

Моделювання МС включає наступні етапи:

- побудову та дослідження моделей цифрової та силової електроніки, моделі безперервної (механічної) частини;
- дослідження характеристик системи в цілому (як САУ/САУ).

Таким чином, необхідно використовувати як доменне моделювання (на першому етапі), так і каузальне (на другому етапі). Проведений літературний огляд показав, що рекомендується використовувати MCAD [4, 5], CAE [8–16], CAS [17], теорію графів (системний рівень абстракції, при якому система не розбивається на структурні елементи-підсистеми) та ланцюги Маркова [6, 7, 9]. Авторами представлені різні способи класифікації програм, наприклад – поділ на програми статичного та динамічного моделювання [6].

Більшість робіт мають теоретичне значення, опис програмних продуктів (CAS та CAE) [1, 8, 9] призначений в основному для спеціалістів із системотехніки. Можливість використання ECAD для моделювання МС не розглядається. Однак, на нашу думку і спеціалістам з електроніки необхідні чіткі рекомендації по вибору доступних ПЗ, в якому МС при прийнятному підході моделюється адекватно. З CAD-систем для проектування МС використовується MCAD [5], які призначені для твердотільного багатовимірного моделювання механічних систем. При цьому основу моделювання становить дослідження механічних конструкцій.

CAE системи дозволяють досліджувати системи на макрорівні, тобто аналізувати та оптимізувати систему із ціллю прийняття рішення щодо топології (структурний підхід) та функціональних можливостей в цілому (системний підхід). На даний момент існує багато програм CAE, які дозволяють моделювати ДС різної природи (біологічні, економічні, соціальні, технічні), причому деякі є вузькоспеціалізованими, а інші – більш універсальними: Vensim, PThink, Dynamo, Stella, Powersim, MedModel, Arena, GPSS, Stratum, Scilab, Berkeley Madonna, NI MATRIX, ACSLx, Modular Modeling System (MMS), Virtual Test Bed (VTB), JModelica.org, Yenka (Crocodile Technology), MATLAB\Simulink, Simscape, MapleSim, Dynast, Multisim, Dymola, PSIM, SamSim, SimApp, SimulationX, Simplorer, VisSim, SystemModeler, 20-sim, ПК MBTU та інших, опис яких може бути знайдено у [1, 2, 10–16].

В деяких CAE, зокрема в 20-sim, є бібліотеки, що включають моделі різних електромеханічних пристроїв (Mechatronics Toolbox) [10, 11]. Більшість цих моделей закривають всі аспекти функціонування конкретних мехатронних пристроїв, і з цієї точки зору дуже корисні проектувальникам, що займаються розробкою МС. Редактор фільтрів і проектувальник регуляторів також мають важливе значення при створенні САУ та їх аналізі; наприклад, в 20-sim вони мають зв'язок з редактором лінійних систем (Linear System Editor), який у свою чергу дає можливість синтезувати та перетворювати динамічні дискретні та безперервні ланки.

Оскільки МС можуть бути представлені безпосередньо диференціальними рівняннями, то для прогнозування їх поведінки у часі також можуть бути використані математичні пакети CAS, які можуть розв'язувати диференціальні рівняння (чисельно чи у символічній формі): Maple, MATLAB, Mathcad, Mathematica, Maxima, SymPy, O-Matrix, SciPy, Octave, NumPy, Python(x,y), MuPAD, Sage та інші [1, 17].

Незважаючи на те, що розглянуті програми (крім CAS) є об'єктно-орієнтованими, їх поєднують певні принципи моделювання та симуляції, які можна узагальнити як підхід. Оскільки МС, як варіант ДС є складною агрегативною системою [7], її можна моделювати, використовуючи мультидоменний підхід, але, в той же час, МС будується як САУ, які традиційно аналізуються при каузальному підході, тому для ефективного дослідження МС постає задача вибору оптимального підходу та такого ПЗ, що його підтримує. Розглянемо ці підходи з точки зору спеціаліста з електроніки для формування критеріїв по вибору найбільш прийнятної ПЗ для досліджень на верхніх рівнях абстракції: системному та структурному.

Як зазначено вище, МС – є ієрархічною конструкцією з елементів, поєднаних у підсистеми різних рівнів, які можуть бути різної фізичної природи (з різних доменів). Оскільки на структурному рівні моделювання структура моделей відповідає структурі досліджуваного об'єкта, модель МС буде композицією блоків, які взаємодіють між собою через функціональні зв'язки. Оскільки в енергетичних ланцюгах потік енергії може змінювати напрямки, то для елементів фізичних схем входи і виходи не визначені. При такому підході необхідно обирати програми акаузального (мультидоменного) моделювання [2, 6–8].

Як показав аналіз таких програм, техніка акаузально-го моделювання заснована на використанні бібліотеки моделей елементів пристроїв з різних енергетичних доменів (електричних, механічних, гідравлічних і т. д.), з яких можна скласти схему заміщення у вигляді фізичної принципової схеми, яка описується системою алгебро-диференціальних рівнянь. Доменний підхід реалізується в більшості ECAD систем, та в деяких CAE програмах, наприклад, в Simscare, 20-sim, Dymola тощо [2, 10–16]. Цей підхід відрізняється від прийнятого в ТАУ тим, що в ММ використовуються не абстрактні сигнали, а величини, що безпосередньо характеризують фізичний стан об'єкта (струми, потенціали, тиски, сили й т. п.).

Сутність іншого підходу полягає в тому, що на етапі моделінгу (розробки ММ) можна перейти до набору диференціальних рівнянь (після процедури каузалізації), після чого всі фізичні особливості окремих частин системи будуть загублені. Варіантом такого підходу є каузальне моделювання, де блоки можна розглядати як перетворювачі вхідних сигналів у вихідні, при цьому зберігається причинно-наслідковий зв'язок. Каузальні моделі використовуються на системному (найвищому) рівні абстракції для оцінки працездатності системи. Оскільки структурні блоки мають входи і виходи, побудовані згідно з цією технікою моделі іноді називають спрямованими сигнальними графами. Окремим випадком даної техніки моделювання є використання графів зв'язків (BG) [5]. Каузальне моделювання використовується, наприклад, в пакетах Simulink, VisSim, SimApp, SamSim. Недолік цього підходу – великий обсяг попередніх перетворень, крім того структура моделі не нагадує реальну систему, або взагалі може не мати схеми заміщення і являти собою набір рівнянь.

Сформуємо критерії по вибору оптимального ПЗ шляхом аналізу особливостей та якості моделювання при вищезазначених підходах до моделінгу з урахуванням особливостей математичного забезпечення МЗ програм різного класу (CAE, ECAD, CAS).

3 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

Дослідження моделей, засобів симуляції та постпроцесорів [3] різних програм показало, що з каузальним моделюванням частіше за все пов'язаний явний вирішувач (solver) для симуляції, який являє собою бібліотеку класичних підпрограм чисельного інтегрування, що реалізують явні методи інтегрування. Як відомо, явні методи, можуть втрачати стійкість для жорстких математичних моделей (які властиві мехатронним системам), крім того, можливі алгоритмічні збої за причин топологічних вироджень [2, 3]. Отже, можна зробити висновок, що результати моделювання будуть неадекватними для систем із великим розкидом постійних часу, а при наявності структурних сингулярностей – моделювання взагалі стає неможливим. Деякі сучасні CAE здатні ці проблеми розв'язувати в автоматичному режимі, що підтверджено аналізом структур із алгебраїчними петлями в середовищі 20-sim [2, 10].

CAE-системи 20-sim, Maplesim, SystemModeler, Simplorer, Simscare, Amesim [1, 11, 12], незалежно від підходу до моделювання, можуть використовувати неявні та

явні методи інтегрування, що дозволяє моделювати в часовій області об'єкти, задані як каузально, так і у вигляді фізичних принципів схем, для чого в математичний опис додається процедура каузалізації, після якої можна використовувати методи явного інтегрування, як це реалізовано в пакетах Simmechanics і Simpowersystems (підсистеми Simulink [17]).

З фізичним мультидоменним моделюванням зазвичай пов'язують ітераційний вирішувач, який реалізує неявні методи інтегрування, при якому на кожному кроці інтегрування спочатку формується нелінійна система алгебраїчних рівнянь, яка далі розв'язується ітераційним методом (наприклад, Ньютона). Виявленими особливостями неявних методів є те, що не потрібно штучно розривати систему, щоб організувати потік обчислень, крім того, вони мають велику область стійкості [3], що забезпечує надійність симуляції.

ECAD призначені, перш за все, для проектування в електронному домені (на схемотехнічному рівні), але коли вони збагатилися можливостями поведінкового (behavioral) моделювання спочатку для цифрових схем, а потім й для аналогових, це дозволило підвищити рівень абстракції до функціонального та, навіть, системного рівня [2], і розширити клас об'єктів для моделювання. На відміну від поведінкових моделей цифрових пристроїв (написаних для подійного детермінованого алгоритму симуляції), поведінкові моделі безперервних об'єктів спираються на алгоритм неявного чисельного інтегрування, що лежить в основі симуляції при акаузальному підході та надають можливості побудови досить складних алгоритмів для емуляції функціонування об'єктів. Таким чином, використання ECAD для дослідження МС і САУ є одним з факторів забезпечення адекватності результатів.

В ECAD можна також скласти моделі МС на основі стандартних блоків САУ. Однонаправленість сигналу в блоках та елементах САУ досягається гальванічним розв'язком входів і виходів через джерела струму і напруги, що керуються напругою, отже каузальну за характером модель можна побудувати в акаузальній по суті програмі, що можна назвати квазікаузальним підходом у моделюванні. Зв'язки між ФП в МС, представлені як САУ, наведено на рисунку 1: тонкі стрілки моделюють інформаційні потоки, товсті – енергетичні.

Для прийняття оптимального рішення при виборі ПЗ для оцінки придатності програми для моделювання МС, складено таблицю 1, де визначено основні показники для порівняння найбільш популярних систем CAD, CAS та CAE. Знаки в графі «Отримання безкоштовної версії» означають ступінь легкості отримання та працездатність безкоштовних (студентських/пробних) версій, тобто ергономічність.

В розділі ECAD представлені програми моделювання, а не проектування [3], тобто вони можуть не мати менеджера проекту та конструктора друкованих плат. Загальний виявлений недолік CAE та CAS систем – слабкі демоверсії та вища, порівняно із ECAD, вартість професійних версій. Більшість програм ECAD не має інструментів оптимізації регуляторів, однак, поведінкове моделювання та квазікаузальний підхід дозволяють адекватно оцінити основні характеристики МС та САУ на макрорівні.

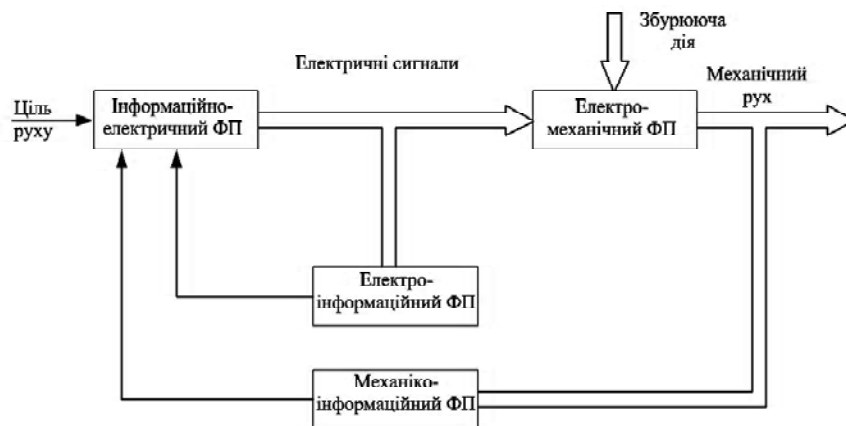


Рисунок 1 – Інформаційні й енергетичні потоки в САУ мехатронної системи

Таблиця 1 – Порівняння можливостей CAD / CAS / CAE

Критерії для порівняння	ECAD			CAS				CAE		
	MicroCap	Multisim	Spice	MATLAB	MathModelica	MapleSim	Simscape	VisSim	20-sim	Dymola
Моделювання (modeling)										
на основі рівнянь	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+
каузальний	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
акаузальний підхід та/або квазікаузальний підхід	+	+	+	-	+	+	+	-	+	+
Мова програмування моделей										
власна	+	+		+	-	+	+	+	+	-
Spice/Modelica	+		+	-	+	+	-	-	-	+
Бібліотеки										
електричні/електронні	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+
термічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
гідрравлічні	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
механічні (одновимірні)	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+
автомобільних систем	-	-	-	-	+	+	+	+	-	+
Взаємодія										
конвертування до інших форматів	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
імпорт із Simulink					-	+		-	-	-
експорт до Simulink					-	+		+	+	+
Отримання безкоштовної версії	+	-	-	-	-	+	-	+	+	-
Можливості розробки моделей										
обмежені		•								•
середні	•							•	•	
широкі			•	•	•	•	•			
Інтерактивні веб-публікації	-	-	+	+	-	+	+	-	-	-

Для прийняття рішення стосовно вибору ПЗ для моделювання МС можна керуватися наступними практичними порадами:

1. Оскільки кожна мехатронна система має об'єкт та пристрій управління, система для моделювання повинна володіти широкими можливостями щодо синтезу, аналізу та оптимізації САУ. Отже, первинні дослідження на макрорівні із ціллю оптимізації топології САУ/МС та параметрів регулятора можна рекомендувати проводити в САЕ-системах, зокрема в 20-sim, або в VisSim.

2. Якщо для подальших досліджень необхідно зберегти специфіку фізичних процесів в підсистемах МС, рекомендується застосовувати програми фізичного мультидоменного моделювання, які забезпечують природну форму представлення моделі та стійкість процесу симуляції. Для спеціаліста з галузі електронної техніки можна рекомендувати підхід, який можна назвати квазікаузальним, або фізичний підхід, в якому механічну частину емулювати поведінковими елементами з електронного домену ECAD [2, 3].

3. Після виконання аванпроекту і генерації технічного завдання можна продовжити моделювання в ECAD та в MCAD. Оскільки MCAD мають суто специфічні риси твердотільного багатовимірного моделювання механічних систем, тому для дослідження мехатронних систем на верхньому рівні абстракції, а тим більше – САУ, вони не є придатними.

Отже, вибір програми моделювання МС для інженера-електроніка здійснюється за такими критеріями:

- здатність обраного ПЗ представляти і досліджувати модель МС як САУ;
- ергономічність та потужність ПЗ: можливість вибору підходу, способу моделінгу, метода інтегрування та оптимізації, простота отримання демо-версій та оновлень ПЗ та МЗ.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Для прийняття вибору щодо підходу та засобу моделювання необхідно провести моделювання тестової задачі та порівняти результати. Також необхідно визначити область адекватності моделей, побудованих за різними підходами для різних програм. Отже, для опису однієї і тієї ж реальної мехатронної системи може бути використаний різний математичний апарат, в залежності від цілей дослідження і вимог точності та адекватності. Розглянемо різні способи моделінгу на прикладі коливальної ланки, яка може емулювати динамічну підсистему МС/САУ, для цього складемо моделі в САЕ-програмі 20-sim [10, 11] трьома способами: блок-схемою (рисунок 2); фізичною схемою у вигляді електричного фільтра другого порядку із параметрами: напругою (V_source) 50 В, індуктивністю (Inductor) 0,0001 Гн, ємністю (Capacitor) 0,00001 Ф, опором (Resistor) 10 Ом (рисунок 3); зв'язаним графом (рисунок 4) із елементами, що емулюють втрати (Resistance), накопичення кінетичної (Inductance) та потенційної енергії (Capacitance), генерацію потенціалу (Stimulus). Початкові умови – нульові.

Обґрунтуємо експериментально можливість використання ECAD для дослідження МС. Використовуючи квазікаузальний підхід, складемо в ECAD-програмі MC9 математичну модель САР для клапану, моторизованого асинхронним двигуном АВЕ-042-4М (рисунок 5).

Модель контуру складається з наступних ланок з бібліотеки макросів:

- ланка визначення величини помилки, реалізована на алгебраїчному суматорі (вихід: delta), при цьому уставку можна задавати джерелом імпульсної напруги);

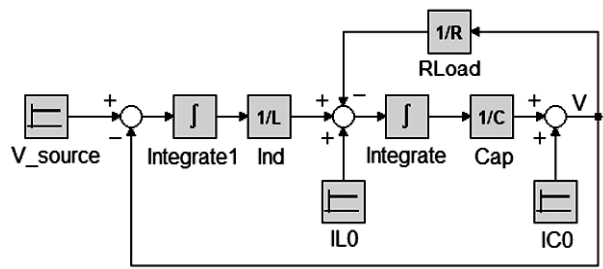


Рисунок 2 – Блок-схема (бібліотека «Signal»), що представляє ММ коливальної ланки

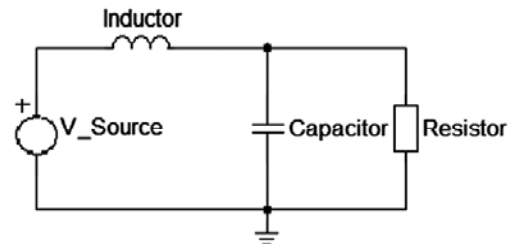


Рисунок 3 – Фізична схема (бібліотека «Iconic diagrams») фільтра

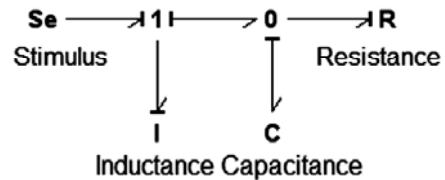


Рисунок 4 – Модель ланки в формі зв'язаного графа (бібліотека «Bond Graph»)

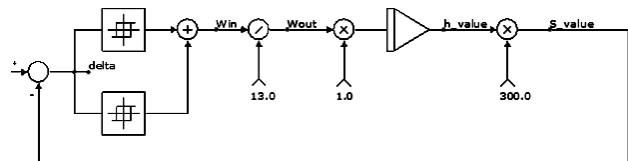


Рисунок 5 – Структурна схема моделі САР клапану в MC9

- ланка зони нечутливості (вихід: Win до 1300 об/мін, або 21,6 об/с), реалізована на двох тригерах Шмідта (ланки гістерезису) із сполученими межами петель;
- ланка редуктора як блок ділення на передаточне число 13:1 (вихід Wout 100 об/мін);
- ланка інтегратора, яка моделює обертально-поступальну передачу із передаточним числом 1 мм/об, вихідна величина – h_value (мм);
- ланка множення на 300 для розрахунку вихідної величини S_value (мм²).

Моделі ланок САР складаються з поведінкових елементів та джерел, що керуються напругою, які забезпечують направленість сигналу через гальванічний розв'язок. Отже, програма класу ECAD має інструментальні можливості для формування моделей САР та мехатронних систем, завдяки наявності поведінкових елементів та можливості реалізації на їхній основі квазікаузального підходу.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

Математична еквівалентність схем рис. 2–4 підтверджується результатами симуляції, а саме розгортками процесу в часі (аргумент – time), представленими на рисунку 6.

Блок-схема детально зображує каузальні зв'язки і є графічною аналогією формули, побудованою з елементів з бібліотеки Block із вихідним сигналом Signal_V (верхня крива). Фізична схема оперує компонентами з електричного домену (бібліотека Iconic), а аналізованою функцією є напруга на резисторі VoltageResistor (середня крива). Експеримент із коливальною ланкою показав, що найбільш компактною формою ММ є зв'язаний граф (бібліотека Bond) із вихідною функцією ResistanceEffort (нижня крива рис. 6).

Вочевидь, що результати симуляції моделей різних форм є ідентичними, отже можна використовувати будь-яку форму подання моделі, але необхідно враховувати, що відмінність структурного і фізичного мультидоменного моделювання полягає не тільки у формі завдання вихідної інформації на етапі моделінгу, але і в використовуваних методах чисельного інтегрування диференціальних рівнянь на етапі симуляції.

Внаслідок обмежень формату статті, ми не можемо навести тут всі результати проведених досліджень [2, 10], представимо тільки загальні висновки: користувач повинен сформулювати найбільш раціональну, з погляду на алгоритм симуляції обраного ПЗ, концепцію моделі, при цьому слід враховувати можливість запобігання алгоритмічних збоїв. Тобто на перше місце пропонуються брати до уваги особливості методів симуляції, а не моделінгу. Для спеціаліста з електроніки важливими критеріями є наявність в бібліотеках моделей з електронного домену та процедур синтезу регуляторів.

Результати аналізу моторизованого клапану в МС9 представлені на рисунку 7.

Функції емулюються через напругу у відповідних вузлах: площа просвіту – $V(S_value)$ (верхня крива) та частота обертання двигуна – $V(WIN)$ (нижня крива).

За результатами моделювання видно роботу ланки зони нечутливості, яка переводить клапан в переривчастий режим

роботи при швидкості зміни уставки, меншій за швидкість позиціонування штока клапана. Зміна частоти та напрямку обертання двигуна від 0 до 21,6 об/с також моделюється адекватно, отже використання ECAD-програм для дослідження МС є принципово можливим. Клас підсистем МС можна розширити на системи із перетворенням частоти (для систем плавного пуску), управління кроковими двигунами тощо.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Можна рекомендувати ECAD, а демо-версії ECAD – в межах дисциплін учбового процесу при підготовці спеціалістів напрямку «Електроніка» для дослідження мультидоменних МС та САУ. Для акаузального моделювання ECAD має обмеження, через необхідність емуляції об'єктів неелектричної природи через їхні поведінкові моделі в базисі: генератори потенціалу та потоку, ємність, індуктивність, електричний опір та гіратор. Цей базис є універсальним та складається з елементів, що абстрактно моделюють основні фізичні поняття (подібно до мови BG – це градієнт потенціалу (зусилля), потік, інерційні елементи, розсіювач енергії та гіратор). Квазікаузальне моделювання в більшості ECAD-систем обмежується задачами дослідження САР без мікроконтролерів.

Незалежно від обраного ПЗ, можна використовувати загальні підходи в моделюванні МС та САУ в ПЗ, інструменти якого дозволяють відтворити цю модель на прийнятному рівні абстракції, а солвер буде здатний надійно, без алгоритмічних збоїв здійснити симуляцію.

Методику моделінгу можна представити в наступному вигляді:

- а) вибір підходу та форми представлення моделі;
- б) вибір компонентів моделі з інструментального набору обраного ПЗ;
- в) топологічне з'єднання компонентів моделі (структурний синтез);

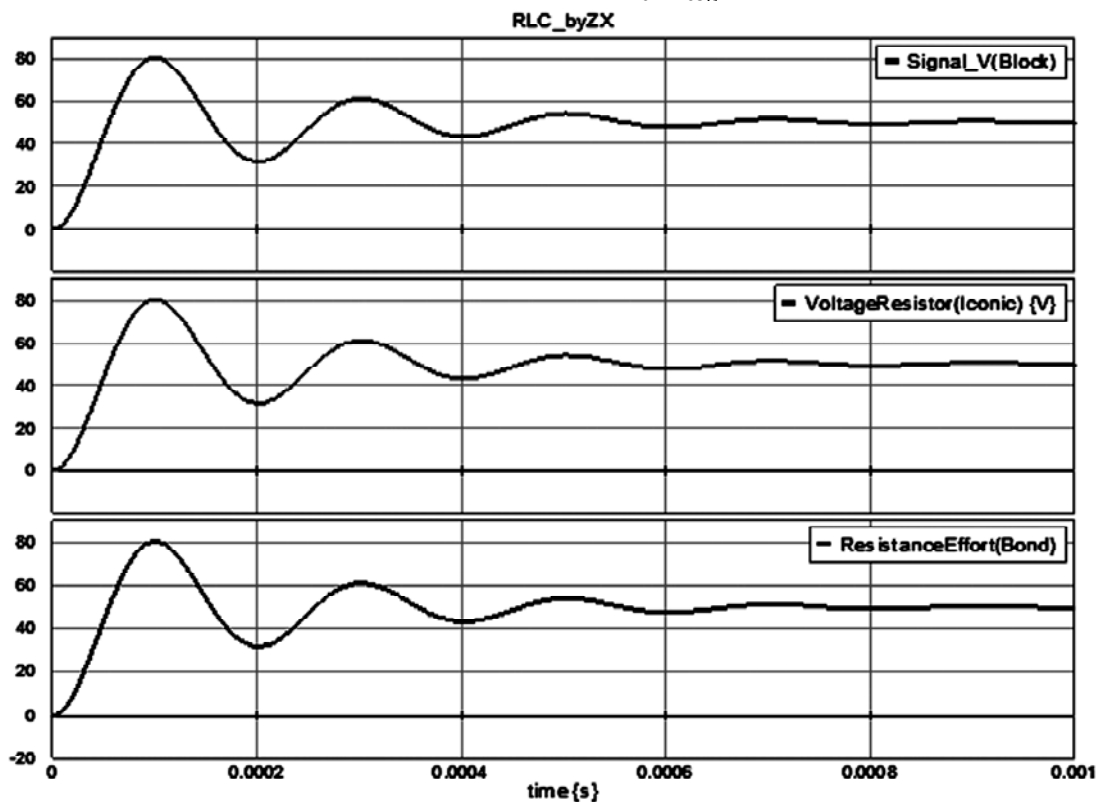


Рисунок 6 – Результати симуляції коливальної ланки трьома моделями

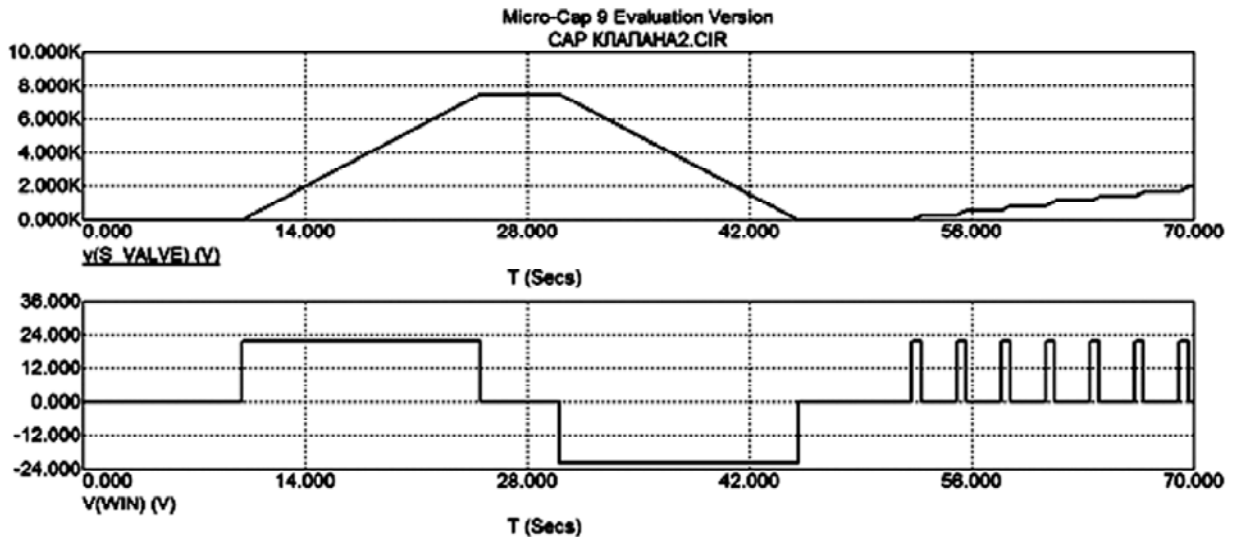


Рисунок 7 – Результати моделювання МС в програмі MicroCap 9.0: зміна просвіту вікна клапана (верхня крива); частота обертання двигуна клапана (нижня крива)

- г) параметричний синтез та апріорна корекція моделі;
- д) компонентно-топологічна (апостеріорна) корекція моделі.

Етап симуляції можна поділити на три складові:

- а) вибір алгоритму моделювання (відповідно до обраного підходу) та його параметрів;
- б) обирання фазових змінних для моніторингу;
- в) запуск симуляції та використання постпроцесора для візуалізації результатів.

Точність моделювання та, як слідство, якість прийнятих рішень залежить не тільки від кількості врахованих факторів на етапі моделювання та специфіки обраного ПЗ, але й від грамотно підібраних математичних засобів на етапі симуляції та оптимізації. Треба також відзначити, що задача вибору методу симуляції (алгоритму моделювання) дуже комплексна, багатокритеріальна, залежить від багатьох факторів і є темою окремого дослідження [2].

Етап параметричної оптимізації не відноситься до етапу симуляції, але залежить від нього: якщо симуляція призводить до неадекватних результатів, то проводити оптимізацію, у загальному випадку, не має сенсу (окрім випадків, коли варіюється параметр моделі, що відповідає за її жорсткість). Оптимізація є невід'ємною складовою сучасних ЕСАД та САЕ (наприклад, для знаходження коефіцієнтів регуляторів при налагодженні САУ) [2, 10].

Методика проведення оптимізації:

- а) вибір алгоритму оптимізації і його настройка;
- б) вибір параметрів моделі, що потребують оптимізації;
- в) встановлення критерію, або критеріїв оптимізації;
- г) запуск оптимізації та використання постпроцесора.

ВИСНОВКИ

В роботі вперше систематизовано підходи та засоби для моделювання мехатронних систем, що розглядаються як різновид САУ, орієнтовано на дослідника, який є спеціалістом в галузі електроніки. Рекомендовано в якості інструмента моделювання МС використовувати ЕСАД системи, які дозволяють моделювати САУ та МС в домені електроніки завдяки наявності інструментів поведінкового моделювання. Запропоновано також квазікаузальний підхід моделювання МС в ЕСАД, теоретично та експериментально визначені його особливості, та область адекватності. Виходячи з вимог цільової групи, визначені специфіка та обмеження при моделюванні МС в САЕ та в ЕСАД.

Вперше, на основі визначених критеріїв виконано порівняльний аналіз програм САЕ, САС та ЕСАД з огляду на їхню застосовність для моделювання МС, на основі чого вироблені рекомендації по вибору програми та універсальна методика моделювання, що має практичну цінність для інженерів-електронників, які проектують системи автоматичного регулювання та управління механічними об'єктами; отримані практичні та теоретичні результати можуть бути використані в процесі навчання студентів напряму «Електроніка», зокрема в курсах «Моделювання систем», «Теорія автоматичного управління».

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні критеріїв якості моделювання на область симуляції та оптимізації й розвитку методичного забезпечення автоматизованого проектування САУ/МС.

ПОДЯКИ

Роботу виконано в межах науково-дослідної роботи «Теоретичне та експериментальне дослідження мікро- та наноструктурних матеріалів» кафедри мікро- та наноелектроніки Запорізького національного технічного університету.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Simulation Tools [Electronic resource]. – Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
2. Василенко О. В. Моделювання електронних систем / О. В. Василенко. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – 128 с.
3. Василенко О. В. Моделювання в електроніці : навчальний посібник / О. В. Василенко, А. В. Переверзев. – Запоріжжя : ЗДІА, 2003. – 160 с.
4. Подураев Ю. В. Мехатроника: основы, методы применения : учеб. пособие / Ю. В. Подураев. – М. : Машиностроение, 2006. – 256 с.
5. Воронин А. В. Моделирование мехатронных систем : учебное пособие / А. В. Воронин. – Томск : ТПУ, 2008. – 137 с.
6. Клиначев Н. В. Обзор архитектурного построения программ математического моделирования динамических систем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
7. Норенков И. П. Автоматизированное проектирование / И. П. Норенков. – М. : Логос, 2000. – 188 с.
8. Клиначев Н. В. Введение в дисциплину «Основы моделирования систем» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://model.exponenta.ru/lectures/sml_01.htm
9. Колесов Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы: учебное пособие / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.

10. Petrenko Y. I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim / Y. I. Petrenko // Матеріали XVII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів Запорізької державної інженерної академії. – Запоріжжя : ЗДІА, 2013. – С. 48–49.
11. Differ Ir. H. G. 20-sim 4.3: Reference Manual / Ir. H. G Differ. – 2012.– 1099 с. [Electronic resource]. – Access mode: www.controllab.nl/en/products/books.html
12. Simscape Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
13. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://samsim2002.chat.ru>
14. SimApp, Ordering Information [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
15. VisSim Product Overview [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
16. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual, Version 5.3a [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>
17. Differential Algebraic System Solver [Electronic resource]. – Access mode: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>

Стаття надійшла до редакції 25.12.2014.

Після доробки 27.02.2014.

Василенко О. В.

Канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікро- і наноелектроніки, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя, Україна

АНАЛИЗ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАТРОННЫХ СИСТЕМ

Решена задача разработки методического обеспечения для моделирования мехатронных систем на структурном и функциональном уровнях абстракции. Объектом исследования являлся процесс моделирования мехатронных систем и систем автоматизированного управления. Предмет исследования составляют программы инжиниринга и автоматизированного проектирования технических систем, универсальные математические процессоры (CAE, CAD и CAS-системы соответственно). Цель работы: повысить эффективность процесса принятия решений по выбору оптимального программного и математического обеспечения для моделирования мехатронных систем инженерами-электронщиками.

Исследования мехатронных систем позволили выявить их особенности как мультидоменных объектов, и общие черты – как подсистем автоматизированного управления, на основе чего сформированы основные требования к программам моделирования. Анализ математического и программного обеспечения CAE, CAD и CAS и эксперименты по моделированию и симуляции при каузальном и мультидоменном подходах, позволили определить критерии для сравнительного анализа и сформировать рекомендации по выбору программы для моделирования, оптимальной для достижения поставленных целей исследования мехатронных систем. На основе анализа программ, разработана универсальная методика моделирования и оптимизации мехатронных систем в цикле их автоматизированного проектирования.

Ключевые слова: мехатроника, системы автоматического управления, моделинг, симуляция, методика моделирования.

Vasylenko O. V.

PhD, Associate Professor, Associate Professor of Department of Micro- & Nanoelectronics, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

ANALYSIS OF PROGRAMS FOR MECHATRONIC SYSTEMS MODELING

The problem of development of methodological support for simulation of mechatronic systems for structural and functional levels of abstraction has been solved. Object of study is the simulation process of mechatronic systems and automated control systems. The subject of the research are programs of engineering and computer-aided design of technical systems, universal mathematical processors (CAE, CAD and CAS-system, respectively). The purpose of the work is to improve the efficiency of decision-making process for engineers of electronics in selecting the best software and mathematical base for modeling of mechatronic systems.

Mechatronic systems research revealed their features as multidomain objects and features in common – as subsystems of automated control, which are allow forming the main requirements for simulation programs. The analysis of mathematical base and software of CAE, CAD and CAS-systems and results of experiments on modeling and simulation at the causal and multi-domain approaches, made possible to determine the criteria for comparative analysis and to generate recommendations for choosing optimal modeling program for achieving the goals of study of mechatronic system. Based on the analysis of programs, the universal method of modeling and optimization of mechatronic systems in a cycle of computer-aided design has been developed.

Keywords: mechatronic systems, automatic control systems, modeling, simulation, modeling methodology.

REFERENCES

1. Simulation Tools [Elektronic resource]. Access mode: http://www.idsia.ch/~andrea/Andrea_Rizzoli_Home_Page/Sim_Tools.html
2. Vasylenko O. V. Modeljuvannja elektronnyh system. Zaporizhzhja, Zaporiz'ka derzhavna akademija, 2013, 128 p.
3. Vasylenko O. V., Pereverzjev A. V. Modeljuvannja v elektronici: uchbovyj posibnyk. Zaporizhzhja, Zaporiz'ka derzhavna akademija, 2003, 160 p.
4. Poduraev Ju. V. Mehatronika: osnovy, metody primenenija: uchebnoe posobie. Moscow, Mashinostroenie, 2006, 256 p.
5. Voronin A. V. Modelirovanie mehatronnyh sistem: uchebnoe posobie. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2008, 137 p.
6. Klinachev N. V. Obzor arhitekturnogo postroenija programm matematicheskogo modelirovanija dinamicheskikh sistem [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.exponenta.ru/educat/news/klinachev>
7. Norenkov I. P. Avtomatizirovannoe proektirovanie. Moscow, Logos, 2000, 188 p.
8. Klinachev N. V. Vvedenie v disciplinu «Osnovy modelirovanija sistem» [Elektronnij resurs]. Access mode: http://model.exponenta.ru/lectures/sml_01.htm
9. Kolesov Ju. B., Senichenkov Ju. B. Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy: Uchebnoe posobie. SPb, BHV-Peterburg, 2006, 224 p.
10. Petrenko Y. I. Research of algorithms and development of modeling and simulation technique of automatic control systems in 20-sim, *Materialy XVII NTK studentiv, magistrantiv, aspirantiv i vykladachiv ZDIA*. Zaporizhzhja, ZDIA, 2013, С. 48–49.
11. Differ Ir. H. G. 20-sim 4.3: Reference Manual, 2012, 1099 p. [Electronic resource]. – Access mode: www.controllab.nl/en/products/books.html
12. Simscape Overview [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.mathworks.com/products/simscape/index.html>
13. О программе для моделирования систем автоматического управления SamSim [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://samsim2002.chat.ru>
14. SimApp, Ordering Information [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.simapp.com/order-simapp.php>
15. VisSim Product Overview [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://www.vissim.com/products/vissim.html>
16. Dymola Dynamic Modeling Laboratory User's Manual, Version 5.3a [Elektronnij resurs]. Rezhim dostupu: <http://www.inf.ethz.ch/personal/cellier/Lect/MMPS/Refs/Dymola5Manual.pdf>
17. Differential Algebraic System Solver [Elektronic resource]. Rezhim dostupu: <http://acronyms.thefreedictionary.com/DASSL>

¹Д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электропривод и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

²Аспирант кафедры электропривод и автоматизации промышленных установок Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СХОДИМОСТИ ОПТИМИЗАЦИОННОГО ФУНКЦИОНАЛА МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАГНЕЗИТОВЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Исследованы условия сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий. Показано, что сигналы различной физической природы удобно представить в виде соответствующих совокупностей параметров. Устойчивая работа многопараметрической системы управления достигается путем представления их в виде сомножителей, что позволяет более эффективно реализовать данную методику для решения инженерных задач при оптимизации промышленных линий с множеством параметров, характеризующие как отдельные этапы так и технологический процесс в целом. Поскольку другие их сочетания приводят к существенному расхождению оптимизационного функционала и неопределенностям. На ряду с вышеизложенным необходимо учитывать линейные и не линейные зависимости между анализируемыми параметрами и их совокупностями. Разработаны математическая и компьютерная модели оптимального автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления магнетитовых огнеупорных изделий. Результаты моделирования согласуются с полученными на реальной технологической линии в условиях эксплуатации, что подтверждает работоспособность предлагаемой методики.

Ключевые слова: условия сходимости, оптимизационный функционал, многопараметрическая автоматизированная система управления, технологический процесс.

НОМЕНКЛАТУРА

$\xi(x, t)$ – оптимизационный функционал;
 $\zeta(x, t)$ – совокупность сигналов управления;
 $q(x, t)$ – параметры, контролирующие ход технологического процесса;
 $r(x, t)$ – сигналы исполнительных механизмов;
 x – координаты;
 t_1, t_2 – временные интервалы;
 N, M, K – конечные условия соответствующих стадий техпроцесса;
 i, j, k – начальные условия соответствующих стадий техпроцесса;
 α, γ, χ – нормировки;
 T – период наибольшей частотной составляющей сигналов техпроцесса;
 ν – порядковый номер гармоники;
 φ – согласующая переменная функция от обобщенного временного параметра протекания технологического процесса;
 z – обобщенный временной параметр протекания технологического процесса;
 t – временная ось;
 a – пределы периода;
 $\varphi', \varphi'', \varphi'''$ – совокупности сигналов различной физической природы, определяющих режимы работы и состояние исполнительных механизмов – гидро, пневмо- и электроприводов;
 Δt – разность во времени между реальным процессом и директивным заданием;
 $S_N(\beta)$ – ограничивающая область;

$\psi(\beta)$ – обобщенный нормируемый параметр;
 β – линейное преобразование для согласования области исследований;
 f – временная функция;
 $G_\Sigma(t, \nu)$ – периодическая функция;
 a_{\min}, a_{\max} – статически заданные параметры характеризующие технологический процесс;
 δ – интервал времени, в котором исследуется периодическая функция;
 ν – частота.

ВВЕДЕНИЕ

В мировой и отечественной практике промышленности широко внедряются технологические линии приготовления различных многокомпонентных изделий (огнеупоров, ячеистых бетонов, высококачественных сталей). Такая тенденция объясняется тем, что к таким изделиям предъявляются более высокие требования к качеству и технико-экономическим показателям. Эти требования могут быть достигнуты путем оптимизации автоматизированного управления технологическими процессами.

На стадиях отработки и внедрения предложенной методики оказалось, что на отдельных стадиях технологического процесса имели место существенные отклонения от директивного задания. Анализ причинно-следственных факторов показал, что в таких случаях многопараметрический оптимизационный функционал не обеспечивал соответствующих режимов исполнительных механизмов. Это вызвано неопределенностью условий сходимости обобщенных параметров многопара-

метрической системы автоматизированного управления [1, 2]. Таким образом, потребностью практики сформирована научно-практическая задача, требующая дальнейшего исследования и развития.

Целью настоящей работы является исследование и анализ условий сходимости оптимизационного функционала автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом приготовления магнетитовых огнеупорных изделий.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть мы имеем оптимизационный функционал исполнительных механизмов (1) технологического процесса приготовления магнетитовых изделий [1–2]

$$\xi(x, t) = \int_{t_1}^{t_2} \zeta(x, t) \cdot q(x, t) \cdot \rho(x, t) dt, \quad (1)$$

$$\text{где } \zeta(x, t) = \sum_{i=1}^N \alpha_i(t), \quad q(x, t) = \sum_{j=1}^M \gamma_j(t), \quad \rho(x, t) = \sum_{k=1}^K \chi_k(t).$$

На основании которого, отыскивается оптимальное автоматизированное управление.

Тогда задача исследования взаимосвязей между параметрами различной физической природы сводится к анализу условий сходимости оптимизационного функционала многопараметрического технологического процесса приготовления магнетитовых огнеупорных изделий.

С целью придания полученному выражению физического смысла необходимо показать, что разность между директивным и реальным режимом стремится к нулю.

2 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

Вопросам технологических объектов посвящено довольно большое число публикаций [3–9], однако системы многопараметрического автоматизированного управления технологическими процессами требуют дальнейшего развития. Такие технологические линии характеризуются большим количеством управляющих систем и исполнительных механизмов различной физической природы, принципов работы и назначения. При этом необходимым условием является согласование оптимальных режимов гидро-, пневмо-, электроприводов, которые располагаются на различных участках технологической линии. В совокупности они определяют энергетическое состояние оборудования в целом и обобщенного директивного режима протекания технологического процесса, качество выпускаемой продукции, технико-экономические показатели.

Предложены критерии достижения оптимального автоматизированного управления многопараметрическим технологическим процессом при линейной и нелинейной взаимосвязях между обобщенными параметрами: управляющими, контролирующими и состояния исполнительных механизмов [4–5]. Это позволило: существенно снизить непроизводительные потери и время работы исполнительных механизмов в режимах холостого хода; обеспечить замкнутый цикл техпроцесса и использование технологических отходов [10]. Однако недостатком работ посвященным многопараметрическим

системам автоматизированного управления [1, 2, 4, 5] является отсутствие анализа разности условий сходимости между реальным технологическим процессом и директивным заданием, что ограничивает его физическое представление.

3 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование условий сходимости оптимизационного функционала, необходимо выполнить для поиска оптимального управления технологическим процессом в рамках директивного задания. В качестве примера на рис. 1, поз.5 показан директивный график поступления технологической смеси в соответствующие технологические емкости, а поз.7 характеризует реальный технологический процесс [1]. Очевидно, что с течением времени рабочие режимы исполнительных механизмов изменяются по различным периодическим законам, что обусловлено несоблюдением условий сходимости трех обобщенных параметров. Имеющие место расхождения поясняются нарушением условий сходимости оптимизационного функционала, инерционными свойствами исполнительных механизмов, износом и изменениями механических параметров, колебаниями давления в воздушной магистрали и напряжения в питающей сети, а также неравномерностью потока компонентов технологической смеси. Это подтверждает целесообразность исследования возможных условий сходимости обобщенных параметров для обеспечения оптимального управления многопараметрическим технологическим процессом.

Оптимизационный функционал многопараметрической системы управления технологическим процессом должен удовлетворять следующему уравнению [5]:

С целью анализа условий сходимости, воспользуемся нормировкой и оптимизационный функционал (1) представим в следующем виде:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) = (c_1 \cdot 0,5) + \sum_{v=1}^N [c'_v \cdot \cos(v\pi t/a) + c''_v \cdot \sin(v\pi t/a)], \quad (2)$$

где

$$c_1 = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) dz; \quad (3)$$

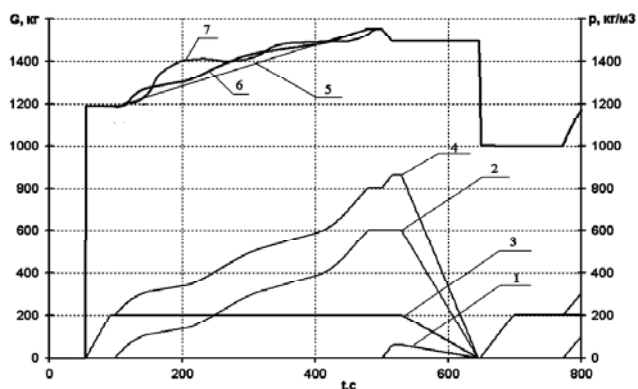


Рисунок 1 – Зависимости изменения веса (G, кг) и плотности (ρ , кг/м³) компонент технологической смеси, где 1 – специальные добавки, 2 – основная сухая смесь, 3 – вода, 4 – технологическая смесь, 5 – директивный режим, 6 – оптимизационный функционал, 7 – реальный технологический режим

$$c'_v = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot \cos(v\pi z/a) dz; \quad (4)$$

$$c''_v = a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot \sin(v\pi z/a) dz; \quad (5)$$

$$\cos(v\pi t/a) = \cos v2\pi t = \cos v\omega t = \cos(2\pi t/T) = \cos(2\pi t/2a); \quad (6)$$

Условиям сходимости функции за пределами периода ($\gg 2a$) на временной оси (t) соответствует стремление функционала к нулю, согласно следующему выражению:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) - [\varphi'(t \pm \Delta t) + \varphi''(t \pm \Delta t) + \varphi'''(t \pm \Delta t)] \cdot 3^{-1} \rightarrow 0 \Big|_{v \rightarrow \infty} \quad (7)$$

Путем подстановки значений постоянных (3)–(5) в (2) и последующих преобразований приходим к сумме следующих интегральных уравнений:

$$\begin{aligned} \xi_{\Sigma}(t, v) &= (2a^{-1}) \int_{-a}^a \varphi(z) dz + a^{-1} \sum_{v=1}^N \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot [\cos(v\pi z/a) \times \\ &\times \cos(v\pi t/a) + \sin(v\pi z/a) \cdot \sin(v\pi t/a)] dz = \\ &= a^{-1} \int_{-a}^a \varphi(z) \cdot [0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi - t)/a] dz = \\ &= a^{-1} \int_{-a-t}^{a-t} \varphi(t + \beta) \cdot [0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a)] d\beta. \quad (8) \end{aligned}$$

На основании физического представления протекающего технологического процесса анализ уравнения (8) показал, что более информативным является второй множитель. Поэтому для решения поставленной задачи целесообразно исследовать область, ограниченную следующим выражением:

$$S_N(\beta) = 0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a). \quad (9)$$

Умножая уравнение (9) на $2\sin(\pi\beta/a)$, приходим к следующему условию для периодического сигнала:

$$\begin{aligned} S_N(\beta) \cdot \sin(\pi\beta/2a) &= \sin(\pi\beta/2a) + \sum_{v=1}^N 2\sin(\pi\beta/2a) \cdot \cos(v\pi\beta/a) = \\ &= \sin(\pi\beta/2a) + \sum_{v=1}^N [\sin(v+0,5) \cdot (\pi\beta/a) - \\ &- \sin(v-0,5)(\pi\beta/a)] = \sin(\beta+0,5)(\pi\beta/a). \end{aligned}$$

После ряда преобразований приходим к равнозначному равенству, которое позволяет оценить степень сходимости многопараметрического функционала в следующем виде:

$$\begin{aligned} S_N(\beta) &= [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1} = \\ &= 0,5 + \sum_{v=1}^N \cos(v\pi\beta/a). \quad (10) \end{aligned}$$

Подставляя (10) в интегро-дифференциальное уравнение (8), приходим к выражению для частичной суммы ряда Фурье вида:

$$\begin{aligned} \xi_{\Sigma}(t, v) &= a^{-1} \int_{a_{\min} - \Delta t}^{a_{\max} - \Delta t} \{[\varphi(z + \beta) \sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \times \\ &\times [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta, \quad (11) \end{aligned}$$

Поскольку $\varphi(z)$ периодическая функция, изменяющаяся во времени с периодом $2a$, то в силу (10), вторые подынтегральные множители также периодические с параметром β . Это позволяет исследовать уравнение (11) и интегрировать его в пределах суммы периодов на интервале $a_{\min} < a < a_{\max}$ (т. е. сдвинуто вправо с сохранением физической сущности исследуемого процесса)

$$\xi(t, v) = \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \varphi(z + \beta) \cdot \psi(\beta), \quad (12)$$

где

$$\psi(\beta) = [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1}. \quad (13)$$

Интегрируя (12) по параметру β в пределах $a_{\min} < a < a_{\max}$ приходим к следующему равенству:

$$a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} \{ \sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) [2\sin(\pi\beta/2a)]^{-1} \} d\beta = (2a)^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_{\max}} d\beta = 1. \quad (14)$$

На основании того, что подынтегральное выражение является четной функцией параметра β , выражение (14) мы вправе представить в виде следующей системы:

$$\left. \begin{aligned} a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_n} [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) \cdot (2\sin(\pi\beta/2a))^{-1}] d\beta &= 0,5; \\ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} [\sin((v+0,5)(\pi\beta/a)) \cdot (2\sin(\pi\beta/2a))^{-1}] d\beta &= 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

На основании физического представления и анализа системы (15) очевидно, что обобщенная функция множества параметров оптимизационного функционала в совокупности не должна превышать условий нормировки. На практике это обозначает формирование возможных погрешностей или пределов сходимости относительно номинальных режимов. Поскольку нам необходимо оценить условие сходимости, которое физически характеризует минимально возможные расхождения относительно номинальных параметров, то покажем, что подынтегральные функции системы (15) стремятся к нулю при $v \rightarrow \infty$. Это соответствует увеличению количества параметров, изменяющихся во времени по сложным периодическим законам. Ограничиваясь двумя осредненными параметрами и полагая, что третий остается неизменным, умножаем правое равенство (15) на

$\varphi'(t + \Delta t)$, а второе на $\varphi'(t + \Delta t)$ и складывая результат приходим к следующему выражению:

$$[\varphi'(t - \Delta t) + \varphi'(t + \Delta t)] \cdot 0,5 = a^{-1} \int_{a_{\min}}^{a_n} \{\varphi(t - \Delta t) \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta +$$

$$+ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} \{\psi'(t + \Delta t) \cdot [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta. \quad (16)$$

Вычитая (16) из (11) приходим к следующему равенству:

$$\xi_{\Sigma}(t, v) - [\varphi'(t - \Delta t) + \varphi'(t + \Delta t)] \cdot 0,5 = a^{-1} \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta +$$

$$+ a^{-1} \int_{a_n}^{a_{\max}} [\varphi'(t + \beta) - \varphi'(t - \beta)] \times$$

$$\times [\sin((v + 0,5)(\pi\beta/a))] \cdot [2 \sin(\pi\beta/2a)]^{-1}\} d\beta. \quad (17)$$

С целью придания полученному выражению физического смысла покажем, что разность между директивным и реальным режимом стремится к нулю.

При этом рассмотрим случай, когда оба слагаемых в (17), которые представляют изменение во времени совокупности двух информационных сигналов и неизменном третьем, стремятся к нулю при увеличении членов в спектре частот ($v \rightarrow \infty$) стремящихся к бесконечности. С этой целью исследуем второй интеграл уравнения (17). Для периодической функции его удобно представить в следующем виде:

$$G_{\Sigma}(t, v) = G'_{\Sigma}(t, v) + G''_{\Sigma}(t, v), \quad (18)$$

где

$$G'_{\Sigma}(t, v) = \pi^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x - \Delta t)] \cdot v_{\Sigma}^{-1} \times$$

$$\times (\pi v/2a) \cdot \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta;$$

$$G''_{\Sigma}(t, v) = a^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x, -\Delta t)] \times$$

$$\times [2 \sin(v\beta/2a)]^{-1} \cdot \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta, \quad (19)$$

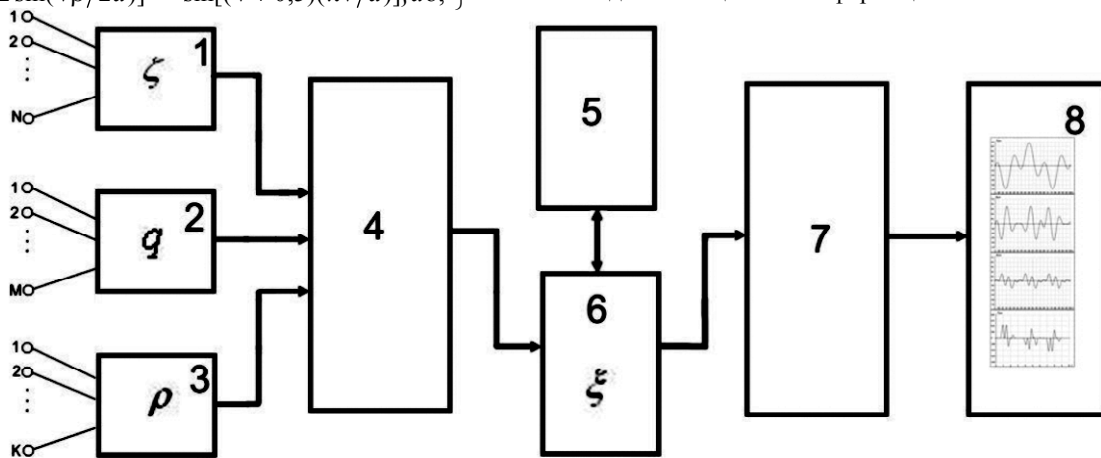


Рисунок 2 – Структурная схема компьютерной модели условий сходимости оптимизационного функционала, где: 1 – совокупность сигналов управления, 2 – параметры, контролирующие ход технологического процесса, 3 – сигналы исполнительных механизмов, 4 – блок нормировки, 5 – директивное задание, 6 – результирующий сигнал, 7 – блок логического анализа условий сходимости обобщенных параметров, 8 – результаты моделирования

– периодическая функция удовлетворяет следующим граничным условиям $(\delta_0 \div \delta_{\max}) < (a_{\min} \div a_{\max}) = 2a$.

Очевидно, что в первом уравнении системы (19) $(\pi v/2a) \cdot [\sin(\pi v/2a)]^{-1} \rightarrow 1$ при $v \rightarrow \infty$. Поэтому, при ограничении временного интервала $0 < v_1 < 2\delta \ll 2a$ до удвоенного периода первой гармоники $1 < (\pi v/2\delta) \cdot [\sin(\pi v/2\delta)]^{-1} < 2$ при действительной сумме $v = 1, 2, 3, \dots, N$ $|\sin(v + 0,5)(\pi v/a)| \leq 1$. Следовательно, первый интеграл в (19)

$$\pi^{-1} \int_0^{\delta} [f(t + \Delta t) - f(x - \Delta t)] \cdot v_{\Sigma}^{-1} \cdot (\pi v/2a) \times$$

$$\times \sin[(v + 0,5)(\pi v/a)]\} d\delta \leq (2\delta) \cdot \pi^{-1} [|f(x + \Delta t)| + 1]. \quad (20)$$

Отсюда следует, что при соблюдении номинальных режимов исполнительных механизмов технологической линии обобщенный функционал не должен превышать заданной погрешности, что на практике представляет довольно сложную инженерную задачу.

4 ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Компьютерное моделирование условий сходимости оптимизационного функционала осуществлялось согласно структурной схеме приведенной на рис. 2. Здесь приняты следующие обозначения.

При этом учитывалось, что во втором интеграле выражение (19) числитель и знаменатель представляют собой кусочно-непрерывную и кусочно-гладкую функции, которые при $v \rightarrow \infty$ стремятся к наименьшему значению. Исследования выполнялись на двух моделях.

В первой модели оптимизационный функционал представлялся в виде суммы обобщенных параметров согласно выражению (2), а во второй – в виде сомножителей (1). Результаты исследований, при выполнении условий нормировки, приведены на рис. 3–7. Физико-тригонометрическая интерпретация полученных результатов, соответствующих модельной задаче (2) приведена на рис. 3. С целью упрощения, в модели учитывалась, что два обобщенных информационных сигнала отобра-

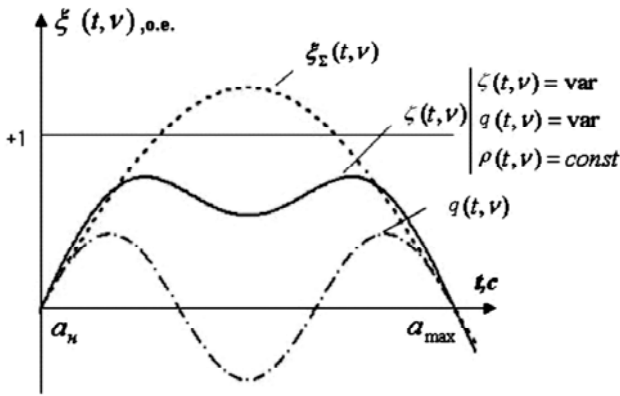


Рисунок 3 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала

жали наиболее неблагоприятное их сочетание, а третий оставался неизменным в течении времени. Так, например, совокупность первого информационного канала изменяется во времени по синусоидальному закону $\zeta(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot \sin(\pi t/a)$, а второй – по несинусоидальному $q(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot \sin(\pi t/a) + 3^{-1} \cdot \sin(3\pi t/a)$. Результирующий оптимизированный сигнал $\xi_{\Sigma}(t, \nu) = \zeta(t, \nu) + q(t, \nu)|_{\rho(t, \nu)=const}$ соответствовал следующему выражению: $\xi_{\Sigma}(t, \nu) = 4\pi^{-1} \cdot 3^{-1} \cdot \sin(3\pi t/a)$.

В качестве примера на рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования, которое осуществлялось на основе собственной программы написанной в среде Visual Basic. Модель 1 для случая, когда обобщенные параметры изменялись во времени по периодическому закону (условные обозначения $\zeta(t, \nu)$ и $q(t, \nu)$). При этом информация по третьему каналу принималась неизменной $\rho(t, \nu) = const$ и изменялась в пределах нормировки. Моделирование выполнялось для наиболее неблагоприятного сочетания информационных сигналов. Результирующий сигнал $\xi_{\Sigma}(t, \nu)$ изменялся по несинусоидальному закону. При этом по абсолютной величине он превышал нормирующий на 30–45%. Очевидно, что при большом количестве информационных сигналов, представленных в нормированном виде, погрешность оптимизационного функционала будет увеличиваться. Особенно характерно это проявляется для случаев, когда информационные сигналы во времени изменяются по вероятностному несинусоидальному закону, что следует из результатов теоретических исследований.

На практике, в компьютерной и математической моделях, а также на экспериментальной установке, за оптимальное значение можно принимать номинальное или директивное задание. Условная единица характеризует нормировку в области допустимых отклонений параметров. Очевидно, что при наиболее неблагоприятных сочетаниях информационных сигналов погрешность управления будет увеличиваться, что соответствует превышению оптимизационного функционала $\xi_{\Sigma}(t, \nu)$ относительно условий нормировки.

Во второй модели оптимизационный функционал представлялся в виде множителей обобщенных параметров согласно выражению (1). Результаты исследований, при выполнении условий нормировки, приведены

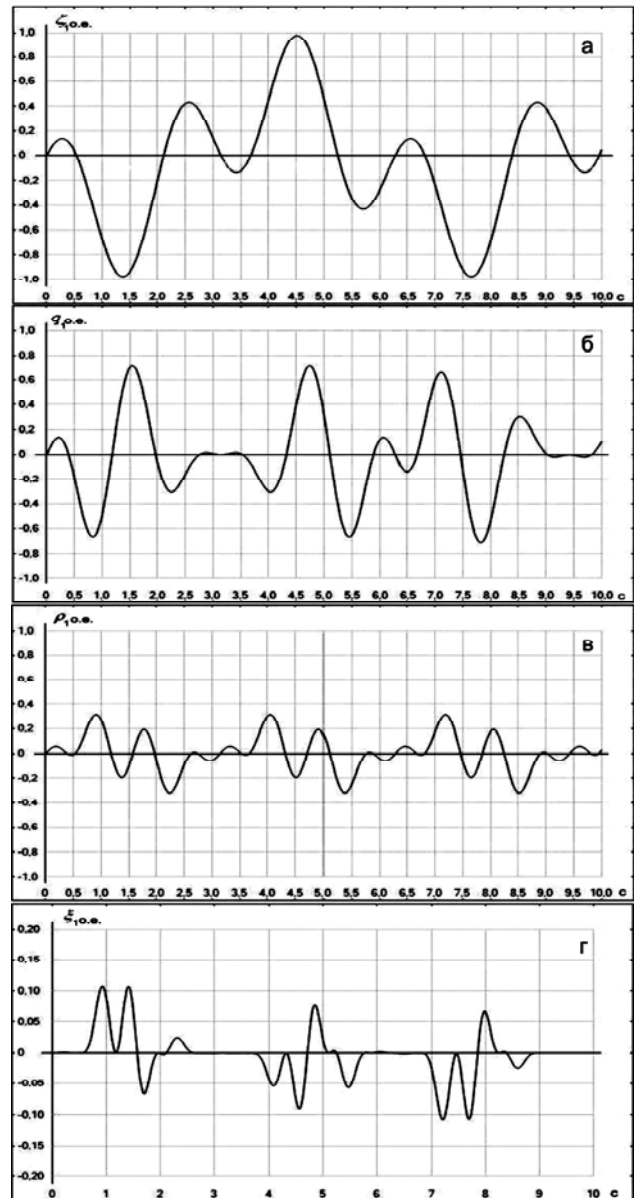


Рисунок 4 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала 1-я серия, где а, б, в – совокупности информационных сигналов ξ, q, ρ , соответственно ; г – результирующий сигнал

на рис. 4–5. Здесь показано серии опытов при различных сочетаниях трех обобщенных параметров, изменяющихся во времени по различным периодическим законам. Из приведенных графических зависимостей видно, что даже для случая, когда один из обобщенных параметров превышает условие нормировки, оптимизационный функционал не превышает 0,08–0,5 уровня нормировки. Физически это обозначает, что погрешность между директивным и реальным управлением многопараметрическим технологическим процессом существенно уменьшается по сравнению с первой моделью.

Очевидно, что оптимизационный функционал более рационально представлять в виде обобщенных множителей. Для других технологических процессов необходимо анализировать его особенности, характерные признаки, а также режимы и условия эксплуатации исполнительных механизмов и управляющих систем.

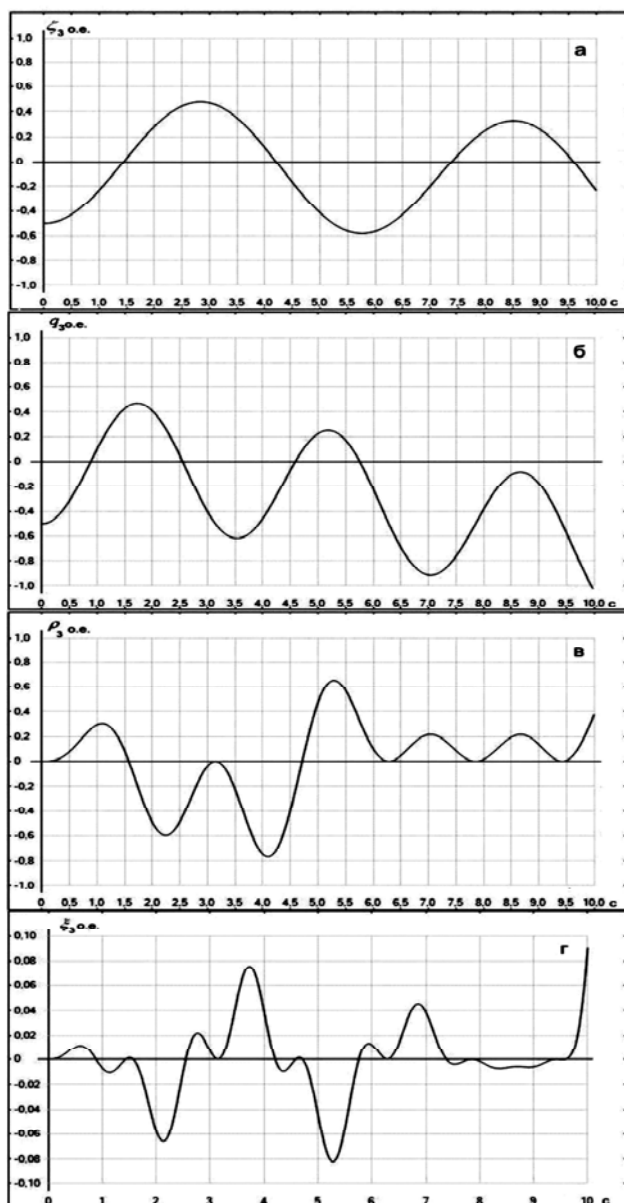


Рисунок 5 – Физико-аналитическая интерпретация условий сходимости оптимизационного функционала 4-я серия, где а, б, в – совокупности информационных сигналов ξ , q , ρ , соответственно ; г – результирующий сигнал

5 РЕЗУЛЬТАТЫ

Таблица 1 – Предельные значения оптимизационного функционала ξ и соответствующих совокупностей информационных сигналов ξ , q , ρ

Совокупности информационных сигналов	1-я серия	2-я серия	3-я серия	4-я серия
ξ	0,98	0,98	0,48	0,98
q	0,76	0,76	0,48	0,98
ρ	0,32	1	0,65	0,77
ξ	0,11	0,45	0,09	0,41

Основные положения теоретических исследований и компьютерного моделирования сопоставлялись с результатами, полученными на действующей технологической

линии приготовления огнеупорных изделий. Оптимизационный функционал отображался в виде всевозможных сочетаний совокупностей обобщенных сигналов как показано на рис. 1. При неизменяемых во время цикла директивных значениях компонентов, как видно из рис. 1, в процессе приготовления реальная отработка исполнительных механизмов технологической линии в отдельные моменты времени отличается от директивных (поз. 7 рис. 1).

Наибольшие отклонения наблюдаются в начальной и конечной фазах техпроцесса. Это поясняется инерционными свойствами исполнительных механизмов, износом и изменениями их механических параметров, колебаниями давления в воздушной магистрали и напряжения в питающей сети, а также неравномерностью потока компонент технологической смеси. При этом оптимизационный функционал принимает соответствующие значения и осуществляет автоматизировано корректировку поступления соответствующих компонентов в дозаторы-смесители. Анализ полученных экспериментальных данных показал, что использование оптимизационного функционала (поз. 6 рис. 1) в системе автоматизированного управления технологическим процессом позволяет уменьшить погрешность от 6% до 3%, а также сократить технологические простои исполнительных механизмов линии между отдельными операциями.

6 ОБСУЖДЕНИЕ

Вопросам исследования оптимального управления многопараметрическими объектами посвящено довольно большое количество публикаций [1–10]. Полученные решения учитывают характерные особенности, условия и режимы различных исполнительных механизмов и управляющих систем. По этому не один из предложенных подходов не может использоваться для решения поставленной задачи. Методологический подход для технологических линий с пневмо-, гидро-, и электроприводами наиболее полно изложены в публикациях [2, 4–6]. Однако в последних работах отсутствует всесторонний анализ условий сходимости оптимизационного функционала при различных сочетаниях информационных каналов исполнительных механизмов и управляющих систем. Отсутствие таких исследований приводит к ряду неопределенностей при различных сочетаниях информации и рассогласовании режимов исполнительных механизмов. Решение этого вопроса позволяет осуществлять оптимальное автоматизированное управление при линейных и не линейных взаимосвязях между контролируемыми и управляющими параметрами. Эффективность предложенного методологического подхода проверено на компьютерной модели и на технологической линии приготовления магнетитовых огнеупорных изделия. Это подтверждает возможность отображать одновременно работу пневмо-, гидро- и электроприводов в сочетании с управляющими устройствами. Его целесообразно использовать на стадиях отработки отдельных этапов или наладке.

Также целесообразно продолжить дальнейшие исследования оптимизационного функционала при линейных, нелинейных и комбинированных взаимосвязях между параметрами исполнительных механизмов и управляющих систем многопараметрической технологической линии.

ВИВОДИ

В результаті проведеного аналізу отримано, що при розробці системи автоматизованого управління многопараметричним технологічним процесом оптимізаційний функціонал цілеспрямовано формувати по сукупностям відповідуючих інформаційних сигналів однакової фізичної природи і належності.

Наукова новизна результатів, отриманих в статті, полягає в програмно-аналітичному аналізі на базі якого здійснюється пошук і управління оптимальним режимом управління многопараметричного комплексу з урахуванням нелінійних взаємозв'язків.

Практична значимість отриманих результатів полягає в тому, що при впровадженні на промислових підприємствах розробленої методики автоматизованого аналізу поточних параметрів на основі яких здійснюється оптимальне управління технологічним процесом дасть суттєвий економічний ефект.

Сходимость оптимізаційного функціоналу в значимій ступені залежить від вибору і відповідності початкових і граничних умов, а також від узгодження їх з параметрами виконавчих механізмів і програмно-логічних пристроїв реальної технологічної лінії.

БЛАГОДАРНОСТІ

Робота виконана в рамках науково-дослідницької теми Запорізького національного технічного університету «Моделювання оптимальних режимів управління многопараметричного технологічного комплексу».

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Мирний В. О. Моделювання оптимальних режимів многопараметричними технологічними об'єктами / В. О. Мирний, Э. М. Кулинич, В. В. Зіновкін // *Современные информационные технологии, средства автоматизации и электропривод*.

вод: Всеукраїнська науково-технічна конференція, Краматорськ, 17–21 грудня 2012 г. : збірник матеріалів. – Краматорськ : ДГМА, 2012. – С. 50–51.

2. Зіновкін В. В. Моделювання умов сходимости оптимізаційного функціоналу многопараметричного технологічного процесу / В. В. Зіновкін, В. О. Мирний // *Наукові праці Донецького національного технічного університету: Серія «Електротехніка та енергетика»*. – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – № 2 (15). – С. 111–115.
3. Сажнев Н. П. Производство ячеистобетонных изделий. Теория и практика / Н. П. Сажнев, В. Н. Гончарик, Г. С. Гарнашевич. – Минск : Стринко, 1999. – С. 4–7.
4. Автоматизована система керування багатопараметричного технологічного процесу приготування газобетону / [В. В. Зіновкін, Е. М. Кулинич, Ю. Н. Умеров, В. О. Мирний] // *Енергетика та системи керування*. – 2009 : Міжнародна конференція, Львів, 14–16 травня 2009 р. : матеріали. – Львів : Львівська політехніка, 2009. – С. 4–42.
5. Кулинич С. М. Підвищення ефективності електронізації процесів керування технологічними комплексами приготування газобетону / С. М. Кулинич : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Е. М. Кулинич. – Херсон, ХНТУ, 2013. – 20 с.
6. Муровцев Д. Ю. Информационные технологии проектирования систем энергосберегающего управления динамическими объектами / Д. Ю. Муровцев // *Системы управления и информационные технологии*. – 2011. – № 4 (46). – С. 82–87.
7. Волошин О. Ф. Процедури послідовного аналізу і відсіювання варіантів комбінаторних оптимізаційних задач з нечіткими функціоналами / О. Ф. Волошин, М. П. Малай, О. О. Швалагін // *Вісник Київського національного університету. Серія : Кібернетика*. – 2010. – № 10. – С. 4–7.
8. Чжан Жель-вей Одна задача синтеза оптимальных систем по принципу максимума / Жель-вей Чжан // *Автоматика и телемеханика*. – 1961. – Т. 22, № 10. – С. 1302–1308.
9. Kalman R. E. Contribution to the theory of optimal control / R. E. Kalman // *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana*. – 1960. – Vol 5, №1. – P. 102–119.
10. Царик А. М. Как начать строительство завода по производству ячеистого бетона» / А. М. Царик // *Теория и практика производства и применения ячеистого бетона в строительстве : 3-й Международный научно-практический семинар : сборник трудов*. – Севастополь, 2007. – С. 15–17.

Статья поступила в редакцию 25.09.2013.

После доработки 10.05.2015.

Зіновкін В. В.¹, Мирний В. О.²

¹Д-р техн. наук, професор, професор кафедри електропривід та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

²Аспірант кафедри електропривід та автоматизації промислових установок Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ЗБІЖНОСТІ ОПТИМІЗАЦІЙНОГО ФУНКЦІОНАЛУ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПРИГОТУВАННЯ МАГНЕЗИТНИХ ВОГNETРИВКИХ ВИРОБІВ

Досліджено умови збіжності оптимізаційного функціоналу багатопараметричного технологічного процесу приготування магнетитових вогнетривких виробів. Показано, що сигнали різної фізичної природи зручно представити у вигляді відповідних сукупностей параметрів. Стійка робота багатопараметричної системи управління досягається шляхом представлення їх у вигляді співмножників, що дозволяє більш ефективно реалізувати дану методику для вирішення інженерних завдань при оптимізації промислових ліній з безліччю параметрів, що характеризують як окремі етапи так і технологічний процес в цілому. Оскільки інші їх поєднання призводять до істотної розбіжності оптимізаційного функціоналу та неточностям. На ряду з вищевикладеним необхідно враховувати лінійні і нелінійні залежності між аналізованими параметрами і їх сукупностями. Розроблено математична та комп'ютерна моделі оптимального автоматизованого управління багатопараметричним технологічним процесом приготування магнетитових вогнетривких виробів. Результати моделювання узгоджуються з отриманими на реальній технологічній лінії в умовах експлуатації, що підтверджує працездатність запропонованої методики.

Ключові слова: умови збіжності, оптимізаційний функціонал, багатопараметрична автоматизована система керування, технологічний процес.

Zinovkin V. V.¹, Mirnyj V. J.²

¹Dr.Sc., Professor, Professor of Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

²Post-graduate student of Department of Electric Drive and Automation of Industrial Plants, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, Ukraine

RESEARCH OF CONVERGENCE CONDITIONS OF THE MULTIPARAMETER OPTIMIZATION FUNCTIONAL OF TECHNOLOGICAL PROCESS OF MUNUFACTURING MAGNESITE REFRACTORY PRODUCTS

The conditions for the convergence of multi-parameter optimization of the functional process of preparation of magnesite refractory products were researched. It is shown that the signals of different physical nature is conveniently represented in the form of corresponding sets of parameters. Stable operation of multiparameter control is achieved by representing them as factors that allows more efficient implementation of this technique for the solution of engineering problems in the optimization of production lines with a set of parameters that characterize both the individual stages and the process as a whole. As other combinations lead to differ materially functional optimization and uncertainties. Along with the above, it is necessary to take into account the linear and non linear dependence between the analyzed parameters and their aggregate. The mathematical and computer models of optimal automated control multivariable process of preparation of magnesite refractory products. The simulation results are consistent with those obtained on a real production line in operation, which confirms the efficiency of the proposed method.

Keywords: terms of convergence, optimization functional, the multiparameter automated control system, technological process.

REFERENCES

1. Mirnyj V. O., Kulinich E'. M., Zinovkin V. V. Modelirovanie optimal'nyx rezhimov mnogoparametricheskimi texnologicheskimi ob'ektami, *Sovremennye informacionnye texnologii, sredstva avtomatizacii i e'lektroprivod: Vseukrainskaya nauchno-texnicheskaya konferenciya. Kramatorsk, 17–21 dekabrya 2012 g. : sbornik materialov.* Kramatorsk, DGMA, 2012, pp. 50–51.
2. Zinovkin V. V., Mirnyj V. O. Modelirovanie uslovij sxodimosti optimizacionnogo funkcionala mnogoparametricheskogo texnologicheskogo processa, *Naukovi praci Donec'kogo nacional'nogo texnichnogo universitetu: Seriya «Elektrotexnika ta energetyka».* Donec'k, DonNTU, 2013, No. 2 (15), pp. 111–115.
3. Sazhnev N. P., Goncharik V. N., Garnashevich G. S. Proizvodstvo yacheistobetonnyx izdelij. Teoriya i praktika. Minsk, Strinko, 1999, pp. 4–7.
4. Zinovkin V. V., Kulinich Ye. M., Umerov Yu. N., Mirnyj V. O. Avtomatyzovana sistema keruvannya bagatoparametrychnogo texnologichnogo procesu prygotuvannya gazobetonu, *Energetyka ta systemy keruvannya, 2009 : Mizhnarodna konferenciya, L'viv, 14–16 travnya 2009 r. : materialy.* L'viv, L'viv's'ka politehnika, 2009, pp. 40–42.
5. Kulinich Ye. M. Pidvyshhennya efektyvnosti avtomatyzacii procesiv keruvannya technologichnymy kompleksamy prygotuvannya gazobetonu: avtoref. dis. ... kand. techn. nauk : 05.13.07 / Ye. M. Kulinich. Kherson, KhNTU, 2013, 20 p.
6. Murovcev D. Yu. Informacionnye texnologi proektirovaniya sistem e'nergoberegayushhego upravleniya dinamicheskimi ob'ektami, *Sistemy upravleniya i iformacionnye tekhnologii,* 2011, No. 4(46), pp. 82–87.
7. Voloshin O. F., Malyar M. P., Shvalagin O. O. Proceduri poslidovnogo analizu i vidsiyuvannya variantiv kombinatornix optimizacijnix zadach z nechitkimi funkcionalami, *Visnik Kyivs'kogo nacional'nogo universitetu. Seriya: Kibernetika,* 2010, No. 10, pp. 4–7.
8. Chzhan Zhel'-vej Odnazadacha sinteza optimal'nyx sistem po principu maksimuma, *Avtomatika i telemexanika,* 1961, Vol. 22, No. 10, pp. 1302–1308.
9. Kalman R.E. Contribution to the theory of optimal control, *Boletin de la Sociedad Matematica Mexicana,* 1960, Vol 5, No. 1, pp. 102–119.
10. Carik A. M. Kak nachat' stroitel'stvo zavoda po proizvodstvu yacheistogo betona», *Teoriya i praktika proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona v stroitel'stve : 3-j Mezhdunarodnyj nauchno-prakticheskij seminar : sbornik trudov.* Sevastopol', 2007, pp. 15–17.

Наукове видання

**Радіоелектроніка,
інформатика,
управління**

№ 3/2015

Науковий журнал

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

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

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 15.10.2015. Формат 60×84/8.
Папір офс. Різогр. друк. Ум. друк. арк. 11,16.
Тираж 300 прим. Зам. № 954.*

69063, м. Запоріжжя, ЗНТУ, друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 2394 від 27.12.2005.